

UNIVERSIDADE VEIGA DE ALMEIDA – UVA
BACHARELADO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

**Inovação na Logística Urbana: Um Estudo sobre Sistemas de Drones
para Entregas**

Leonardo Ayres Lavourinha

RIO DE JANEIRO

2023

UNIVERSIDADE VEIGA DE ALMEIDA - UVA

Leonardo Ayres Lavourinha

Monografia apresentada ao curso de Engenharia da Computação da Universidade Veiga de Almeida, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia da Computação.

Orientador(a): André Lucio de Oliveira

**Inovação na logística urbana: Um estudo sobre sistemas de drones
para entregas**

RIO DE JANEIRO

2023

UNIVERSIDADE VEIGA DE ALMEIDA
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
Rio de Janeiro – RJ
Tel.: (21) 2574-8888

L414 Lavourinha, Leonardo Ayres.
Inovação na logística urbana: um estudo sobre sistemas
de drones para entregas / por Leonardo Ayres Lavourinha. – 2023.
76 f. ; 30 cm.

Orientador: Prof. André Lucio de Oliveira.
Monografia (graduação) – Universidade Veiga de Almeida,
Curso de Graduação em Engenharia da Computação, Rio de
Janeiro, RJ, 2024.

1. Engenharia da computação. 2. Inovação. 3. Drones.
4. Entrega expressa. 5. IA. 6. Rede IoT. I. Oliveira, André Lucio de
(orientador). II. Universidade Veiga de Almeida. Curso de
Graduação em Engenharia da Computação. III. Título.

CDD 004.22
Termo Livre

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UVA
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).



**UNIVERSIDADE VEIGA DE ALMEIDA - UVA
BACHARELADO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO**

Leonardo Ayres Lavourinha

**Inovação na logística urbana: Um estudo sobre sistemas de drones
para entregas**

Monografia apresentada como
requisito parcial à conclusão do curso em
Bacharel em Engenharia da Computação.

APROVADA EM:

CONCEITO:

BANCA EXAMINADORA:

PROF. MSc ANDRÉ LUCIO DE OLIVEIRA

PROF. DSc. EDGAR AUGUSTO GONÇALVES GURGEL DO AMARAL

PROF. DSc DOUGLAS ERICSON MARCELINO DE OLIVEIRA

Coordenação de Engenharia da Computação

Rio de Janeiro



UNIVERSIDADE VEIGA DE ALMEIDA - UVA
BACHARELADO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

Leonardo Ayres Lavourinha

**Inovação na logística urbana: Um estudo sobre sistemas de drones
para entregas**

Monografia apresentada como
requisito parcial à conclusão do curso em
Bacharel em Engenharia da Computação.

APROVADA EM:

CONCEITO: 9,0

BANCA EXAMINADORA:

PROF. MSc ANDRÉ LUCIO DE OLIVEIRA

PROF. DSc. EDGAR AUGUSTO GONÇALVES GURGEL DO AMARAL

PROF. DSc DOUGLAS ERICSON MARCELINO DE OLIVERA

Coordenação de Engenharia da Computação

Rio de Janeiro

Dedico este trabalho aos meus pais e familiares e principalmente aos professores que me ajudam neste caminho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho de monografia.

Primeiramente, sou imensamente grato ao apoio imprescindível da minha família e amigos, cujo encorajamento e compreensão foram essenciais durante os momentos desafiadores desta jornada acadêmica.

Agradeço à instituição Universidade Veiga de Almeida, por oferecer os recursos necessários para a realização desta pesquisa, junto aos professores.

E a cada um que desempenhou um papel crucial na concretização deste projeto, e por isso, sou profundamente grato.

“Epígrafe: Se algo é importante o suficiente, você deve tentar. Mesmo se o resultado provável for o fracasso”

Elon Musk

RESUMO

O setor de desenvolvimento de drones para entregas está crescendo rapidamente, impulsionado por empresas como Amazon, FedEx e DHL. Com a previsão de aumento na demanda e no número de drones em operação, é essencial um controle preciso para minimizar o impacto urbano. Este trabalho, por meio de uma análise bibliográfica, explora tecnologias e métodos para tornar as entregas urbanas mais eficientes e confiáveis, destacando a integração da IoT e IA. O estudo examina como a IoT pode coletar e transmitir dados cruciais em tempo real, e como a IA pode usar esses dados para otimizar rotas, prever demandas e ajustar operações, considerando variáveis como tráfego e clima. A combinação de IoT e IA visa aumentar a eficiência logística, reduzir o impacto ambiental e melhorar a satisfação do cliente.

Palavras-Chave: Inovação, Drones, Entrega Expressa, IA, Rede IoT

ABSTRACT

The drone delivery development sector is rapidly expanding, driven by companies such as Amazon, FedEx, and DHL. With the forecasted increase in demand and the number of drones in operation, precise control is essential to minimize urban impact. This paper, through a literature review, explores technologies and methods to make urban deliveries more efficient and reliable, highlighting the integration of IoT and AI. The study examines how IoT can collect and transmit crucial data in real-time, and how AI can use this data to optimize routes, predict demands, and adjust operations, considering variables such as traffic and weather. The combination of IoT and AI aims to increase logistical efficiency, reduce environmental impact, and improve customer satisfaction.

Keywords: Innovation, Drones, Express Delivery, AI, IoT Network

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Drones MK30 Amazon.....	22
Figura 2: Drones DHL.....	23
Figura 3: Drones da empresa Zipline.....	24
Figura 6: Sensor meteorológico.....	32
Figura 7: Sensor GPS.....	33
Figura 8: Sensor lidar.....	34
Figura 9: Estrutura de arquitetura de uma rede IoT.....	38
Figura 10: Estrutura de camadas de uma rede IoT continuação.....	38
Figura 11: Arquitetura de transmissão do protocolo AMQP.....	45
Figura 12: Protocolo de comunicação DDS.....	47
Figura 13: Grafos não dirigidos e dirigidos.....	52
Figura 14: Árvore geradora mínima.....	55
Figura 15: Análise problema caixeiro viajante.....	56
Figura 16: Interpretação ACO.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das exigências de cada classe.....	27
Tabela 2: Algoritmos mais utilizados na geração de rotas.....	35
Tabela 3: Tipos de conexão de uma rede IoT.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACO – Ant Colony Optimization
AI – Artificial Intelligence
AMQP - Advanced Message Queueing Protocol
ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações
APIs - Application Programming Interfaces
AWS - Amazon Web Services
BLE - Bluetooth Low Energy
CIA - Centro de Investigação Aeronáutica
CoAP - Constrained Application Protocol
CV - Computer Vision
DDS - Data Distribution Service
DECEA - Departamento de Controle do Espaço Aéreo
EASA - Agência Europeia para a Segurança da Aviação
EU – União Europeia
EUA – Estados Unidos da América
FAA – Federal Aviation Administration
FCC - Federal Communications Commission
GA – Genetic Algorithms
GIS - Geographic Information System
GPS – Global Positioning System
HTTP – Hypertext Transfer Protocol
ICA - Instrução do Comando da Aeronáutica
IEC - International Electrotechnical Commission
IoT - Internet das Coisas (Internet of Things)
ISO - International Organization for Standardization
Li-Fi - Light Fidelity
LIDAR - Light Detection and Ranging
LoRa – Long Range
LPWAN - Low Power Wide Area Network
LTE – Long Term Evolution
MCA - Manual do Comando da Aeronáutica
ML - Machine Learning
Modbus - Um protocolo de comunicação para automação industrial
MQTT – Message Queuing Telemetry Transport

MTOW - Maximum Take-off Weight
NB-IoT – Narrowband Internet of Things
NLP - Natural Language Processing
PaaS - Platform as a Service
P2P - Peer-to-Peer
RFID – Radio Frequency Identification
RF - Radio Frequency
ROS - Robot Operating System
RPA – Remotely Piloted Aircraft
RPAS - Remotely Piloted Aircraft System
RTK - Real-Time Kinematic
SAR - Synthetic Aperture Radar
SaaS - Software as a Service
SARP – Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada
SLAM - Simultaneous Localization and Mapping
UAV - Unmanned Aerial Vehicle
VANTs - Veículos Aéreos não Tripulado
VTOL – Vertical Take-off and Landing
WSNs - Wireless Sensor Networks

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivos específicos	16
1.2 Justificativa	17
1.3 Organização do trabalho	18
2 Referencial teórico	19
2.1.1 A origem dos drones	19
2.1.2 A evolução do drones na logística	20
2.2 Utilização de drones na logística	21
2.3 Legislação dos VANTs	24
2.3.1 Legislação brasileira	25
Tabela 1: Resumo das exigências de cada classe	27
2.3.2 – Legislação americana	28
2.3.3 Legislação europeia	30
2.4 Integração com internet das coisas (IoT)	31
2.4.1 Os principais sensores de uma internet das coisas (IoT)	31
2.5 Algoritmos de inteligência artificial para otimização de rotas	34
Tabela 2: Algoritmos mais utilizados na geração de rotas	35
2.6 Grafos e suas aplicações	36
3 INTEGRAÇÃO de sistema através do IoT	37
3.1 Arquitetura IoT	37
3.2 Componentes de uma rede IoT	40
3.2.1 Integração do drone com rede IoT	40
3.2.2 Principais tecnologias de transmissão de dados de uma rede IoT	41
Tabela 3: Tipos de conexão de uma rede IoT	43
3.3 Protocolos de comunicação	43
3.3.1 Protocolo de comunicação AMQP	45
3.3.2 Protocolo de comunicação DDS	46
3.3.3 Protocolo de comunicação CoAP	47
3.3.4 Protocolo de comunicação MODBUS	48
4 DESENVOLVIMENTO de IA para análise de rotas	50
4.1 Grafos	51
4.1.1 Grafos dirigidos e não dirigidos	51
4.1.2 Peso das arestas em grafo	52
4.2 Aplicação de grafos em logística	53
4.2.1 Aplicação do algoritmo de dijkstra na logística	54
4.2.2 Aplicação do algoritmo A* na logística	55
4.3 Problema do caixeiro viajante (PCV)	56
4.3.1 Formulação matemática do PCV na logística de drones	57
4.3.2 Algoritmos exatos para solução do PCV	59
4.3.3 Algoritmos heurísticos e metaheurísticos para solução do PCV	60

4.4 Importância do algoritmo colônia de formigas para o PCV e para a IA de análise de rotas por drones.....	61
4.4.1 Inicialização do algoritmo colônia de formigas.....	62
4.4.2 Construção de soluções.....	62
4.4.3 Atualização de feromônio.....	63
4.4.4 Iteração.....	63
4.5 Aplicação de algoritmos genéticos ao problema do caixeiro viajante (PCV) para análise de rotas de drones com IA.....	64
4.5.1 Inicialização.....	64
4.5.2 Avaliação.....	64
4.5.3 Seleção.....	65
4.5.4 Cruzamento.....	65
4.5.5 Mutação.....	65
4.5.6 Iteração.....	66
5 Considerações finais.....	67
5.1 Contribuições para o campo de estudo.....	67
5.2 Perspectivas futuras.....	68
5.3 Propostas para futuros trabalhos.....	69

1 INTRODUÇÃO

No cenário tecnológico contemporâneo, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), conhecidos como drones, emergem como uma inovação disruptiva, desenhando um novo panorama em múltiplas esferas. A versatilidade desses dispositivos transcende fronteiras, desempenhando papéis multifacetados em setores tão diversos quanto agricultura de precisão, monitoramento ambiental e logística avançada. Conforme destacado por Floreano e Wood (2015), "os drones representam uma revolução tecnológica com impacto profundo e diversificado, abrangendo desde a coleta de dados até a entrega de mercadorias em locais de difícil acesso."

Com o avanço das tecnologias, os VANTs através de grandes empresas como a Amazon, DHL, FedEx, entre outras, acabaram entrando no âmbito do transporte de entrega. Estes drones, conhecidos também como VANTs, significam veículo aéreo não tripulado. Estes veículos emergem como uma solução de grande potencial. Sua capacidade de sobrevoar obstáculos terrestres e contornar rotas convencionais apresenta um potencial revolucionário para superar barreiras logísticas. De acordo com Barnhart et al. (2016), "a habilidade dos drones de operar independentemente das infraestruturas terrestres tradicionais os torna ideais para uma ampla gama de aplicações logísticas, oferecendo soluções inovadoras e eficientes."

A utilização destes veículos no transporte de cargas oferece uma oportunidade única para diminuir consideravelmente os prazos de entrega e ao mesmo tempo, reduzir os impactos ambientais inerentes à distribuição tradicional. Como observado por Goodchild e Toy (2018), "a implementação de drones para entregas urbanas não apenas acelera o processo de distribuição, mas também contribui significativamente para a redução da pegada de carbono, uma vez que diminui a dependência de veículos terrestres movidos a combustíveis fósseis."

A utilização destes drones poderá ser de diferentes contextos, que vão desde entregas a áreas urbanas densamente povoadas até regiões remotas de difícil acesso. A capacidade desses dispositivos de oferecer uma rota direta e rápida para as entregas, contornando congestionamentos e obstáculos terrestres, promete revolucionar não apenas a eficiência operacional, mas também a satisfação do cliente. Isto é corroborado por Chiang et al. (2019), que afirmam que "a adaptabilidade dos drones a diferentes ambientes e sua eficiência na navegação direta fazem deles uma ferramenta valiosa para melhorar a logística de última milha, aumentando a satisfação dos consumidores pela rapidez e precisão nas entregas" (Chiang et al., 2019).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa visa explorar tecnologias e métodos para tornar as entregas urbanas mais eficientes e confiáveis através do uso de drones. O principal objetivo é investigar, por meio de uma revisão bibliográfica, a integração de redes de Internet das Coisas (IoT) e sistemas de Inteligência Artificial (IA) para otimizar as rotas de entrega, revolucionando a logística urbana. Para isso, busca-se compreender como as redes IoT podem ser utilizadas para coletar e transmitir dados essenciais, como a localização dos drones, condições ambientais e status das entregas, de maneira contínua e em tempo real.

Além disso, o trabalho detalha uma potencial futura implementação da IA, explorando como os dados coletados podem ser utilizados para identificar padrões, prever demandas e ajustar as operações de entrega conforme necessário. Isso inclui a consideração de variáveis como condições de tráfego, padrões climáticos e prioridades de entrega, visando garantir que as entregas sejam realizadas de forma rápida e segura. Ao combinar IoT e IA, propomos a criação de um sistema de entrega que não apenas melhore a eficiência logística, mas também reduza o impacto ambiental e aumente a satisfação do cliente. O objetivo é demonstrar como a tecnologia pode transformar a maneira como recebemos nossos produtos, tornando as cidades mais inteligentes e as entregas mais ágeis e confiáveis. Esta revisão bibliográfica visa fornecer uma base teórica sólida para futuras implementações, destacando o potencial transformador dessas tecnologias na logística urbana.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar uma pesquisa bibliográfica a fim de identificar e compilar estudos sobre o desenvolvimento de sistemas de Inteligência Artificial (IA) integrados com redes de Internet das Coisas (IoT). Diante disso, entender como esses sistemas podem processar e analisar os dados coletados, visando otimizar as rotas de entrega dos drones, considerando fatores como condições de tráfego, padrões climáticos e prioridades de entrega, buscando garantir que as operações de entrega sejam rápidas e seguras. Essa pesquisa é fundamental para criar um sistema logístico urbano mais eficiente e confiável, beneficiando tanto as empresas quanto os clientes.
- Expor as normas e regulamentos que governam o uso de drones para transporte de cargas nos principais mercados, incluindo Brasil, Europa e Estados Unidos. A compreensão

dessas legislações é essencial para assegurar a conformidade legal e a viabilidade operacional dos sistemas de entrega por drones.

- Explicar o funcionamento de redes IoT, detalhando a arquitetura e os componentes das redes IoT, incluindo os tipos de sensores utilizados, como sensores meteorológicos, de geolocalização (GPS) e LIDAR, bem como os protocolos de comunicação (AMQP, DDS, CoAP, Modbus) necessários para o suporte eficiente da operação dos drones.
- Analisar modelos heurísticos e de teoria dos grafos para demonstrar como esses modelos podem ser aplicados na implementação de sistemas de Inteligência Artificial (IA) para análise dos dados recebidos pelas redes de Internet das Coisas (IoT). Focar na análise de algoritmos específicos, como o Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO) e Algoritmos Genéticos (GA), além de outras técnicas heurísticas e meta-heurísticas.

1.2 Justificativa

A integração de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) em sistemas de entrega urbana representa uma evolução tecnológica significativa que vai além da mera automação, redefinindo fundamentalmente o paradigma logístico contemporâneo. No entanto, a gestão eficiente desses drones em um ambiente urbano apresenta desafios consideráveis, especialmente na coordenação e supervisão de múltiplos dispositivos simultaneamente. A utilização de drones, complementada por uma robusta rede de dispositivos IoT (Internet das Coisas), visa aprimorar a eficiência das entregas por meio de uma otimização precisa das rotas, além de mitigar o congestionamento urbano ao reduzir o número de veículos de entrega nas estradas. Essa inovação é particularmente crítica para entregas urgentes, como medicamentos, onde a velocidade de entrega pode ser crucial. A rede IoT desempenha um papel essencial na coleta e transmissão de dados em tempo real, permitindo a inserção contínua de informações vitais, como localização, condição dos drones e status das entregas. Esse fluxo constante de dados fornece uma base sólida para a tomada de decisões automatizadas e precisas.

Adotando tecnologias avançadas de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina, esta pesquisa busca analisar e otimizar as rotas de entrega. A IA será fundamental na adaptação das operações em tempo real, respondendo a variáveis complexas como condições climáticas, tráfego aéreo e outros imprevistos. Os algoritmos desenvolvidos serão rigorosamente testados em simulações que replicam cenários urbanos, garantindo que os modelos de IA sejam robustos e confiáveis. Essa abordagem integrada, utilizando IoT para a gestão de dados e IA para a tomada de decisões, não só maximiza a eficácia logística, mas também proporciona um sistema adaptável e resiliente. A pesquisa contribuirá para a inovação no campo da logística urbana, oferecendo soluções viáveis para os desafios atuais e futuros.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos principais, cada uma abordando aspectos essenciais do desenvolvimento de sistemas para drones no contexto da inovação e eficiência na logística de entregas urbanas.

No Capítulo 1, são apresentados o contexto e a relevância do uso de Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs) na logística urbana, destacando os avanços tecnológicos que possibilitam o desenvolvimento desses sistemas, mostrando como os drones estão revolucionando a entrega de produtos nas cidades. Também é demonstrado os objetivos gerais e específicos do estudo, explicando a motivação e a justificativa para a realização desta pesquisa.

No Capítulo 2, é dedicado à revisão da literatura sobre drones e suas aplicações na logística. Sendo discutido a evolução histórica dos VANTs, suas principais características e o papel crucial da Internet das Coisas (IoT) e da Inteligência Artificial (IA) na otimização das rotas de entrega. Além disso, abordamos as legislações aplicáveis ao uso de drones nos principais mercados globais, fornecendo um panorama detalhado das regulamentações que impactam a operação desses dispositivos.

No Capítulo 3, será abordada a rede IoT e a arquitetura de uma rede IoT para a implementação de um sistema de entregas utilizando drones. Apresentamos os princípios e fundamentos da rede IoT, destacando a importância da integração de componentes como sensores, dispositivos de comunicação e servidores de dados. Analisamos também os protocolos de comunicação mais adequados, como AMQP, DDS, CoAP e Modbus, destacando suas vantagens, limitações e desafios na aplicação prática. Esta seção oferece uma visão abrangente de como a IoT pode ser integrada de maneira eficiente no contexto das entregas urbanas.

No Capítulo 4, é demonstrado o desenvolvimento de sistemas de IA para a análise e otimização das rotas de entrega. São detalhadas a aplicação de modelos heurísticos e de teoria dos grafos, incluindo a análise de algoritmos específicos como o Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO) e Algoritmos Genéticos (GA) com o objetivo de melhorar a eficiência das rotas de entrega por drones. Também são discutidas técnicas para identificar padrões, prever demandas e ajustar as operações de entrega conforme necessário, garantindo a eficiência e a segurança das operações logísticas.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentados os resultados da pesquisa e as considerações finais. São discutidos os benefícios e as limitações das tecnologias estudadas, além de serem demonstradas as possibilidades para futuras implementações e estudos adicionais. Reflete-se sobre como a integração de drones, IoT e IA pode transformar a logística urbana, tornando as cidades mais inteligentes e as entregas mais ágeis e confiáveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, apresentaremos a história do uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) conhecido também como Drone, suas evoluções na parte da logística, seus atuais desenvolvimentos com as integrações atuais como IoT e IA e as atuais legislações para operar como um serviço de logística (entregas). Este levantamento é fundamental para compreender as diversas utilizações existentes e entender a operação e o desenvolvimento desses veículos. Tais informações são cruciais para a criação de um sistema de entrega expressa e do desenvolvimento do veículo.

2.1.1 A origem dos drones

O desenvolvimento histórico dos primeiros drones, também conhecidos internacionalmente pela sigla RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), começou no final do século XIX. A primeira aplicação significativa dos drones foi para fotografia aérea em 1888. No entanto, o uso extensivo desses dispositivos só foi consolidado no início da década de 1970, com experimentos notáveis realizados pelos Estados Unidos e Israel. Estes experimentos buscavam desenvolver alternativas de combate mais acessíveis, utilizando essas tecnologias emergentes para missões que não requerem presença humana direta, reduzindo riscos e custos operacionais.

Inicialmente concebidos com foco em aplicações militares e de segurança pública, os drones evoluíram para incorporar uma ampla gama de utilizações civis. Por exemplo, a adoção de drones na agricultura de precisão foi significativamente impulsionada pelo avanço tecnológico no setor agrícola, melhorando a eficiência e reduzindo custos de produção. Esses veículos são capazes de operar na atmosfera sem intervenção humana direta, podendo ser controlados remotamente ou operar de forma autônoma. Segundo Carvalho e Lima (2022), a adoção de VANTs para a prática de agricultura de precisão foi impulsionada pelo avanço tecnológico no setor agrícola, reduzindo custos e otimizando a produção. Essa evolução destaca o potencial dos drones para revolucionar não apenas a agricultura, mas diversas outras indústrias, promovendo maior eficiência operacional e inovação.

Globalmente, mais de 40 países estão envolvidos no desenvolvimento de drones, com os Estados Unidos e Israel à frente em inovações e aplicações. No Brasil, o uso de drones, especialmente em projetos militares e na agricultura, ganhou impulso nos anos 80. Empresas brasileiras como AGX Tecnologia, Flight Solutions, XMobots, Airship e Skydrones têm desempenhado papéis significativos no mercado de drones, atendendo a uma variedade de demandas operacionais e comerciais. Embora os drones tenham mostrado um desenvolvimento robusto e uma ampla adoção em diversos setores, alguns ainda consideram que esses sistemas estão em um estágio inicial de desenvolvimento. Segundo o Science & Tech Spotlight (2023), as tecnologias envolvidas nos drones continuam a evoluir

rapidamente, ampliando as possibilidades de realizar missões de alto risco a custos significativamente mais baixos do que as aeronaves tripuladas.

A padronização da terminologia e das operações, como a adoção da sigla RPAS pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), visa manter uma consistência técnica global, essencial para a segurança das operações aéreas. No Brasil, a regulamentação dos voos de Aeronaves Remotamente Pilotadas é gerenciada pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), conforme a legislação do projeto de lei nº 9425, de 2017, que atualmente veta o voo de veículos autônomos no espaço aéreo brasileiro. Segundo o DECEA (2015), órgão que regula e controla o espaço aéreo brasileiro, as regulamentações seguem as regras da OACI.

2.1.2 A evolução do drones na logística

A evolução dos drones tem sido marcada por significativos avanços tecnológicos que ampliam suas aplicações em diversas áreas, incluindo a logística de entregas urbanas. O desenvolvimento e a integração de Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs) em redes de comunicação sem fio têm possibilitado novas abordagens para enfrentar desafios logísticos, especialmente em operações de entrega final.

Os drones multirotores, em particular, têm sido destacados por suas capacidades de realizar entregas eficientes e seguras no contexto urbano, onde as exigências de rapidez e precisão são críticas. A capacidade de operar em espaços reduzidos e a possibilidade de decolagem e pouso vertical são aspectos que fortalecem a aplicabilidade dos drones em ambientes urbanos densamente povoados, apesar das restrições regulatórias existentes que limitam seu uso sobre áreas densamente povoadas sem permissão especial. Segundo a pesquisa da Allied Market Research, os drones estão se tornando uma solução viável para reduzir custos e tempo de entrega, especialmente na última milha, que é conhecida por ser a parte mais cara e complexa do processo de entrega. A integração de drones autônomos em sistemas logísticos é vista como um pilar importante para o futuro da entrega de pequenos pacotes e serviços de entrega de refeições, como exemplificado por testes realizados por empresas como Domino's Pizza e *startups* como Flirtey (Allied Market Research, 2021).

No aspecto de segurança, os drones apresentam desafios significativos, principalmente relacionados ao risco de mal funcionamento durante o voo, que pode resultar em danos a propriedades ou pessoas. A pesquisa também indica que os drones maiores, embora mais eficientes do ponto de vista energético, apresentam maiores riscos e complexidades na gestão de segurança.

2.2 Utilização de drones na logística

A implementação de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para a entrega de encomendas tem evoluído significativamente, com empresas líderes como a Amazon nos Estados Unidos, a DHL na União Europeia, especialmente na Alemanha, e a Zipline, operando predominantemente no continente africano, impulsionando transformações significativas na logística global. Esses dispositivos aéreos emergiram como uma solução inovadora para otimizar entregas, particularmente em regiões onde a acessibilidade é limitada ou a urgência é primordial.

Segundo os dados da logística de entregas aéreas da Amazon (2023), a Amazon Prime Air tem se destacado como pioneira neste segmento, investindo intensivamente em tecnologia para expandir suas operações de entrega via drones. O modelo MK30 da Amazon, conforme podemos ver na Figura 1, por exemplo, é um marco tecnológico que permite entregas em diversas nações, incluindo o Reino Unido, Itália e algumas cidades dos EUA. Este modelo, que tem o dobro da capacidade de voo em comparação com versões anteriores, representa uma melhoria substancial nas operações de entrega, refletindo o comprometimento contínuo da Amazon com a inovação e a eficiência na logística aérea.

A Amazon tem trabalhado há quase uma década para tornar a entrega via drones uma realidade, construindo drones totalmente elétricos que podem entregar pacotes de até 5 libras em menos de uma hora. O novo drone MK30 possui tecnologias de "detecção e evitação" que permitem evitar obstáculos como pessoas, animais de estimação e propriedades, proporcionando segurança e confiabilidade nas entregas (Amazon, 2023)



Figura 1: Drones MK30 Amazon
Fonte: Amazon (2023)

Por sua vez, a DHL tem concentrado esforços no desenvolvimento de drones que transportam cargas pesadas por longas distâncias, chegando a alcançar até 2.500 km. A empresa planeja criar uma rede que incluirá até 4.000 drones do modelo "*Black Swan*", conforme podemos ver na Figura 2, que serão dedicados às operações de entrega. Este ambicioso projeto visa não apenas reduzir os custos operacionais, mas também realizar entregas no mesmo dia para distâncias consideráveis, integrando-se harmoniosamente às operações logísticas já estabelecidas pela DHL. O foco está em maximizar a eficiência da entrega de *e-commerce*, produtos farmacêuticos e remessas urgentes, exemplificando a adaptação estratégica da DHL às novas tecnologias para melhor atender às expectativas modernas de tempo de entrega.

Segundo Matthias Heutger, Vice-Presidente Sênior e Chefe Global de Inovação e Desenvolvimento Comercial na DHL, "a inovação é uma parte essencial do DNA da DHL. Estamos constantemente explorando novas tecnologias para trazer valor aos nossos clientes, e acreditamos que drones de carga serão um elemento na próxima geração de transporte logístico" (sUAS News, 2021; FreightWaves, 2021). O cofundador e CEO da Dronamics, Svilen Rangelov, afirmou que "este acordo de parceria tem o potencial de gerar €1,86 bilhões anuais em receitas para a Dronamics, com planos em andamento para construir e operar mais de 4.000 drones de carga para apoiar a parceria nos próximos anos" (Silicon Canals, 2021).



Figura 2: Drones DHL
Fonte: DHL (2018)

Outra empresa que vem explorando as operações com drones de entrega é a Zipline, especializada em logística em ambientes desafiadores, como diversas regiões da África. A empresa foca na entrega de produtos de alto valor, como medicamentos e sangue, para áreas com infraestrutura precária. Utilizando drones autônomos do tipo avião, lançados através de catapulta, a Zipline garante que comunidades remotas recebam suprimentos rapidamente e com eficiência.

A Zipline iniciou suas operações em 2016 em parceria com o governo de Ruanda, construindo um centro de distribuição em Muhanga. Este centro, conhecido como "o ninho", é equipado com drones e uma pequena equipe que opera os lançadores e gerencia os pousos dos drones. Os drones do tipo de avião como podemos ver na Figura 3, são lançados a 84 km/h e monitorados continuamente por operadores em contato com o controle de tráfego aéreo em Kigali (MIT Technology Review, 2023).

Além de Ruanda, a Zipline expandiu suas operações para outros países africanos, incluindo Gana e Tanzânia, utilizando sua tecnologia para entregar suprimentos médicos rapidamente em locais de difícil acesso. Este serviço tem sido crucial para fornecer sangue e medicamentos em situações de emergências, onde a velocidade e a confiabilidade são essenciais (Omnia Health Insights, 2023).



Figura 3: Drones da empresa Zipline

Fonte: Futuriste (2023)

Apesar das inovações e do potencial transformador dos drones na logística, a adoção em larga escala dessas tecnologias enfrenta barreiras significativas, principalmente de natureza regulatória e tecnológica. Normas para voos, necessidades de monitoramento remoto e exigências de acompanhamento visual são apenas alguns dos desafios que precisam ser superados para garantir operações seguras e eficientes. A regulação precisa evoluir para acompanhar o ritmo das inovações tecnológicas, assegurando que os avanços no uso de drones na logística sejam implementados de forma segura e responsável, maximizando os benefícios enquanto minimizam potenciais riscos para a segurança pública e privacidade.

2.3 Legislação dos VANTs

As leis estabelecidas para a utilização dos VANTs são de suma importância para colocar ordem na utilização deles. Porém elas possuem discussões cruciais à medida que eles se tornam cada vez mais presentes na sociedade.

A rápida evolução desses dispositivos trouxe consigo uma série de possibilidades inovadoras em setores como fotografia, entregas, agricultura, segurança e entretenimento. No entanto, as leis que regem seu uso muitas vezes não acompanham essa evolução tecnológica de forma adequada, levando a lacunas e desafios na regulamentação de questões cruciais, como privacidade, segurança e limites operacionais.

2.3.1 Legislação brasileira

A legislação brasileira para o uso de aeronaves remotamente pilotadas é regulamentada pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e avaliada pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), visando acompanhar os avanços dos drones e garantir a separação adequada do espaço aéreo, a fim de evitar interferências no tráfego das aeronaves comerciais. Essas regulamentações são baseadas nas diretrizes da Portaria do DECEA nº 929/DNOR 8, datada de 15 de maio de 2023 e publicada nesta mesma data. Esta portaria regula o uso exclusivo de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para operações aéreas especiais, entrando em vigor em 3 de julho de 2023. Ela substitui as Portarias anteriores: DECEA nº 109/DGCEA, de 22 de maio de 2020; DECEA nº 110/DGCEA, de 22 de maio de 2020, e DECEA nº 111/DGCEA, de 22 de maio de 2020.

A Portaria DECEA nº 929/DNOR 8, de 15 de maio de 2023, aprova a edição do MCA 56-5, manual que trata das "Aeronaves não tripuladas para uso exclusivo em operações aéreas especiais", que passou a vigorar em 3 de julho de 2023, conforme publicado no Boletim de Comunicações Administrativas (BCA) nº 103 de 06 de junho de 2023, substituindo as portarias anteriores mencionadas, publicadas no BCA nº 096, de 3 de junho de 2020 (DECEA, 2023). Estas atualizações vêm para facilitar a introdução dos drones, porém algumas aplicações ainda se tornam complexas, como a de entrega de encomendas (Unmanned Airspace, 2023).

As aeronaves remotamente pilotadas (RPA), conforme estabelecido pela Instrução de Aviação Civil (ICA) 100-40, são categorizadas em três classes distintas com base no peso máximo de decolagem. Essas classes são detalhadas na Tabela 1 e ilustradas na Figura 4. As classes são definidas da seguinte forma:

- **Classe 3 (Peso menor que 250 g):** a regulamentação para aeronaves modelo e RPAs varia pelo peso. As de até 250g são isentas de requisitos, permitindo voar sem registro na ANAC ou avaliação de risco. Não há restrição de idade para aeromodelos, mas operar um RPA não recreativo requer 18 anos.
- **Classe 3 (Peso maior que 250 g e peso menor ou igual à 25 kg):** As operações com VANTs que possuem MTOW (peso máximo de decolagem da aeronave) maiores que 250 g, deverá ter um operador com mais de 18 anos, seguro para danos a terceiros, caso seja uma operação comercial, para operações recreativas não se visa ser necessário possuir seguro e fazer a solicitação de voo do VANT no sistema SISANT do DECEA. Todas as operações deverão ocorrer afastadas de terceiros numa distância de aproximadamente 30m, a menos que a pessoa esteja ciente desta operação, operar um VANT por vez, com

autonomia e segurança suficiente para a operação é de crucial importância. Para se operar VANTs em linha de visão abaixo de 400 pés (120 Metros) é obrigatório a inscrição no sistema da ANAC SISANT e o plano de voo emitido no sistema SARPAS. Em caso de voo acima de 400 pés ou fora da linha de visão fica necessário o registro de projeto autorizado pelo DECEA com as suas devidas marcas e matrículas nacionais e o certificado para a operação.

- **Classe 2 (Peso variando entre 25 kg e 150 kg):** As regulamentações para aeronaves desta classe são semelhantes às da Classe 3, mas exigem alguns documentos adicionais. Primeiramente, é necessário realizar uma avaliação de risco operacional, conforme descrito na Instrução Complementar IS ANAC E94-003. O piloto remoto deve possuir uma licença e qualificação específicas da ANAC, além de um Atestado Médico Aeronáutico apropriado. Além disso, a aeronave precisa ser registrada na ANAC e deve obter o certificado de aeronavegabilidade para garantir a conformidade com os padrões estabelecidos, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 5 e detalhado na Tabela 1.
- **Classe 1 (Peso maior que 150 Kg):** Equipamentos de grande porte, classificados nesta categoria, devem passar por um rigoroso processo de certificação similar ao exigido para aeronaves tripuladas. Conforme ilustrado no fluxograma da Figura 5, essas aeronaves necessitam ser certificadas pela ANAC e registradas no Registro Aeronáutico Brasileiro (RAB). Além disso, os pilotos responsáveis pela operação dessas aeronaves devem possuir um Certificado Médico Aeronáutico (CMA), licença adequada, qualificação específica e serem maiores de 18 anos.

Segundo as normas brasileiras praticadas pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA, 2023), a operação autônoma de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) é estritamente proibida. Estes veículos devem operar apenas em modos automatizados nos quais um piloto pode intervir a qualquer momento. Para utilizar drones em operações específicas, como a entrega de encomendas, é necessário obter uma autorização prévia temporária. Esta autorização restringe o carregamento de objetos de até 2,5 kg e de cargas de tamanho pequeno, permitindo apenas um objeto por vez e uma distância de até 3 km. Atualmente, todas as operações de entrega no Brasil que utilizam drones estão em fase de testes, sem previsão para a implementação, devido à falta de leis que liberem tais práticas. No Brasil, as regulamentações sobre o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), conhecidos como drones, são rigorosas, sendo expressamente proibido operá-los a menos de 5 quilômetros dos aeroportos e nas proximidades de áreas sensíveis de segurança pública e jurídica, como presídios, prédios governamentais e quartéis.

Conforme ilustrado na Figura 4, o fluxograma detalha minuciosamente o processo de cadastro na ANAC e os requisitos de certificação de aeronavegabilidade para aeronaves modelo e RPAs. O processo inicia-se com a pergunta sobre o uso recreativo da aeronave e segue um caminho baseado no

Peso Máximo de Decolagem (PMD) da aeronave. Se o PMD for menor que 250 g, a aeronave pode não requerer registro na ANAC. Caso o PMD seja superior a 250 g, é necessário determinar se a operação será visual e dentro do limite de 400 pés, o que condiciona a necessidade de registro no SISANT e a obtenção de um certificado de aeronavegabilidade.

A Figura 5 apresenta um fluxograma que esclarece o processo de requerimento de cadastro e certificação de aeronavegabilidade. Inicialmente, é questionado se a aeronave necessita de cadastro e, caso afirmativo, o fluxo segue para determinar se a aeronave precisa de um certificado de aeronavegabilidade. Dependendo do propósito listado e do tipo de certificação, diferentes documentos são necessários, incluindo o Certificado de Autorização de Voo Experimental (CAVE), o Certificado de Aeronavegabilidade (CA) padrão ou restrito, e o Certificado de Aeronavegabilidade Especial para RPA (CAER). Esses fluxogramas facilitam a compreensão dos passos necessários para garantir que as operações de drones estejam em conformidade com a regulamentação brasileira, promovendo a segurança e eficiência nas operações aéreas especiais.

Tabela 1: Resumo das exigências de cada classe

	RPA Classe 1	RPA Classe 2	RPA Classe 3	Aeromodelo
Será requerido cadastro?	Não	Não	Sim	Não
Será requerido registro?	Sim	Sim	Não	Não
Será requerido aprovação de projeto?	Não	Sim	Simplificado	Não
Será requerido processo de certificação?	Sim	Não	Não	Não
Será requerida idade mínima de 18 anos?	Sim	Sim	Sim	Não
Será requerido Certificado Médico?	Sim	Sim	Não	Não
Serão requeridas licença e habilitação?	Sim	Sim	Apenas acima de 400 pés (120 m)	Não, mas limitado a 400 pés (120 m)
Será requerido registro dos voos?	Sim	Sim	Não	Não

Fonte: ANAC (2016)



Figura 4: Regulamentação de Voos dos Drones no Brasil
 Fonte: ANAC (2016)

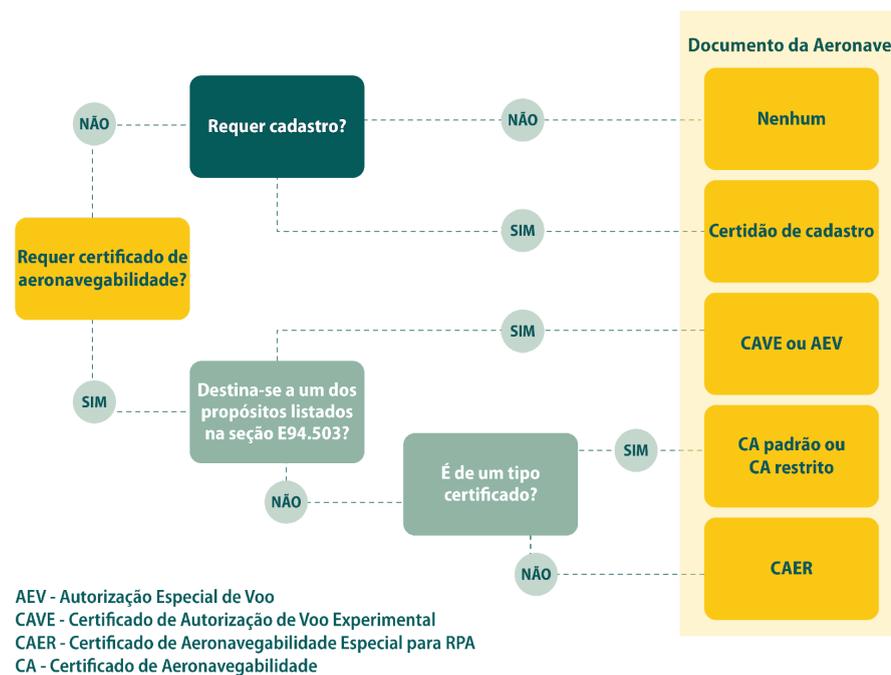


Figura 5: Registros e Certificações para Drones no Brasil
 Fonte: ANAC (2016)

2.3.2 – Legislação americana

Nos Estados Unidos, a regulamentação relacionada aos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS) é um mosaico de regras federais e locais que visam a segurança, privacidade e conformidade das operações desses veículos, evoluindo significativamente nos últimos anos em comparação a outros

países. A Administração Federal de Aviação (FAA) é a principal autoridade responsável pela regulamentação do espaço aéreo nos Estados Unidos. A FAA impõe regras como a exigência de registro de drones comerciais e civis, além da obtenção do Certificado de Piloto Remoto da Parte 107 para operadores, que envolve a realização de testes escritos, demonstrando conhecimentos específicos sobre a operação de drones. Algumas restrições de voo incluem limitações de altitude e proximidade a aeroportos, além de garantir protocolos de segurança específicos para cada operação (Federal Aviation Administration, 2023).

Segundo a Federal Communications Commission (FCC, 2023), a exigência de informações de identificação dos drones (*ID identifier*) visa garantir a segurança de outras aeronaves e prevenir interferências prejudiciais, proibindo o uso de certas frequências de rádio nas operações de drones (Federal Communications Commission, 2023). Além das regulamentações federais da FAA, alguns estados possuem suas próprias leis de drones. Por exemplo, na Califórnia, é necessário registro estadual para todos os drones, com restrições específicas para voos sobre propriedade privada. Na Virgínia, é obrigatória uma licença estadual para operadores de drones, incluindo verificações de antecedentes e restrições de voo em áreas sensíveis, como escolas e prédios governamentais. O Texas impõe limites de altura máxima de voo, restringe a proximidade a aeroportos e proíbe interferências com socorristas. A diversidade de regulamentações estaduais abrange desde restrições de voo até requisitos de registro e licenciamento. Leis locais de ruído, privacidade e permissões também variam entre cidades e estados, impactando a operação dos drones em diferentes áreas do país.

A regulamentação da FAA tem sido essencial na definição de padrões de segurança e operacionais para os drones de entrega. Enquanto empresas como Amazon, UPS e FedEx buscam aproveitar essa tecnologia inovadora para agilizar suas entregas, os regulamentos rigorosos estabelecem restrições significativas ao uso dos VANTs, visando garantir a segurança das operações aéreas e proteger pessoas não envolvidas (Johnson, 2023).

Segundo Flytrex (2023), a regulamentação da FAA tem sido essencial na definição de padrões de segurança e operacionais para os drones de entrega. Enquanto empresas como Amazon, UPS e FedEx buscam aproveitar essa tecnologia inovadora para agilizar suas entregas, os regulamentos rigorosos estabelecem restrições significativas ao uso dos VANTs, visando garantir a segurança das operações aéreas e proteger pessoas não envolvidas.

Para a utilização de VANTs em entregas de encomendas, entre outras operações, é necessária a obtenção da Certificação de Transportadora Aérea Parte 135 Padrão da FAA. Algumas empresas, como a Flytrex, em colaboração com parceiros como a Causey Aviation Unmanned, conseguiram aprovação para realizar entregas por drones. Essas aprovações representam um marco significativo para a indústria de entrega de drones nos EUA, permitindo operações verdadeiramente sob demanda e de longo alcance, inclusive voos sobre pessoas e além da linha de visão visual do piloto (BVLOS). Essa conquista não apenas amplia a flexibilidade operacional, mas também abre portas para um potencial revolucionário nas entregas comerciais por drones (Flytrex, 2023).

Segundo Gary Drenik, em uma entrevista com um representante da empresa Flytrex na revista Forbes (Publicado no site no dia 31. De maio de 2023) comentou a seguinte frase: "a regulamentação tem sido um desafio de longa data para a indústria de entrega de drones. Como os drones são mantidos nos padrões regulatórios que as aeronaves comerciais, espera-se que os serviços de entrega de drones atendam a padrões de segurança igualmente rigorosos"

2.3.3 Legislação europeia

Nos últimos anos, a legislação europeia referente aos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) passou por significativas transformações, sendo regida pela Agência Europeia para a Segurança da Aviação (EASA), o órgão responsável pelo controle e legislação do espaço aéreo europeu. No entanto, cada país pode exigir requisitos específicos para a operação dos drones. Segundo a EASA (2019), essas legislações foram inicialmente aplicadas apenas para aeronaves com mais de 150 kg, mas foram unificadas em março de 2019, estabelecendo especificações técnicas para VANTs em toda a União Europeia (UE). Essas mudanças refletem o compromisso da UE em regular e promover o uso responsável e inovador dos drones, visando impulsionar novos empregos e o crescimento econômico na região.

De acordo com o quadro legislativo de 2008, as legislações se concentravam na segurança operacional, prevenção de atos ilícitos e proteção da privacidade e dados pessoais, ao mesmo tempo em que buscavam reduzir a burocracia e impulsionar a inovação (European Commission, 2008). Essas regras visam oferecer segurança jurídica a um setor que emprega pequenas e médias empresas, facilitando o empreendedorismo. Com base na abordagem de risco e desempenho, a legislação reconhece as distintas complexidades e riscos na aviação civil, simplificando os procedimentos de aprovação para aeronaves menos complexas, como helicópteros ou aeronaves esportivas leves (Smith, 2019).

Segundo a EASA (2019), embora não haja uma exigência específica de seguro para drones abaixo de 20 kg, a maioria dos Estados-Membros da UE requer seguro de responsabilidade civil para operações, mesmo com drones mais leves. A Comissão Europeia está empenhada em desenvolver um quadro abrangente e seguro para a integração dos VANTs no espaço aéreo civil, abordando aspectos de segurança, direitos fundamentais dos cidadãos, controles rigorosos de segurança, responsabilidade de terceiros e apoio ao desenvolvimento de mercado e indústrias europeias (European Commission, 2019).

Conforme relatado pela Comissão Europeia (2021), na União Europeia, a legislação que envolve Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), utilizados para entregas, está em conformidade com as regulamentações aplicadas aos drones. Essas normativas abrangem uma série de aspectos, como registro, restrições de voo, requisitos de segurança e licenciamento, garantindo um ambiente

regulatório abrangente para a operação desses dispositivos aéreos não tripulados. As novas regras ajudam a facilitar operações mais complexas e de longa distância, especialmente em espaços aéreos densamente ocupados e fora da linha de visão do piloto remoto. Isso é particularmente útil para serviços vitais como transporte de amostras médicas e assistência em emergências

2.4 Integração com internet das coisas (IoT)

A integração da Internet das Coisas (IoT) na logística de drones não apenas melhora a eficiência operacional, mas também abre caminhos para novos modelos de negócios na entrega urbana. Conforme Treiblmaier et al. (2022), a utilização de IoT em drones possibilita uma coleta de dados mais rica e detalhada, facilitando o monitoramento em tempo real das condições de voo, status de entrega e condições ambientais. Isso permite que as empresas respondam prontamente a quaisquer intercorrências ou ajustem as rotas de entrega com base em dados atualizados, melhorando assim a eficiência geral e a satisfação do cliente.

Nos armazéns, a tecnologia IoT não só rastreia e gerencia inventários com precisão, mas também coordena de maneira inteligente as atividades de drones para tarefas como inspeção de estoque e manuseio de materiais. Segundo Treiblmaier et al. (2019): “Esses drones automatizados podem identificar produtos e quantidades em tempo real, otimizando o layout do armazém e reduzindo o tempo de ciclo dos pedidos.” A integração de IoT na logística de drones não somente transforma as operações logísticas tradicionais, mas também impulsiona inovações que podem definir o futuro da entrega e gestão urbana. Com a melhoria contínua das tecnologias e a elaboração de regulamentações apropriadas, espera-se que os drones equipados com IoT se tornem uma parte integrante e eficaz do ecossistema logístico moderno (DJI, 2021).

Quanto aos desafios, a integração de sistemas IoT em drones enfrenta questões técnicas complexas, como a integração de diferentes plataformas e a manutenção de comunicações seguras. De acordo com Almeida (2019), as preocupações com a segurança dos dados se acentuam devido à natureza distribuída dos dispositivos IoT, exigindo protocolos robustos de criptografia e autenticação para proteger as informações trocadas. Ademais, a legislação vigente ainda está em processo de adaptação para lidar com as implicações do uso extensivo de drones e IoT em ambientes urbanos, abordando questões de privacidade e segurança aérea.

2.4.1 Os principais sensores de uma internet das coisas (IoT)

Os sensores desempenham um papel fundamental na navegação e programação de entregas de drones, fornecendo dados críticos em tempo real que permitem decisões precisas e eficientes. Alguns dos principais sensores são:

- **Sensores meteorológicos:** Os sensores meteorológicos são essenciais para a operação segura e eficiente de drones em aplicações de logística e entregas urbanas, pois monitoram em tempo real condições atmosféricas como velocidade e direção do vento, precipitação, pressão atmosférica e temperatura, conforme podemos ver na Figura 6 um tipo deste sensor ou parecido, permitindo ajustes de rota e evitando áreas de mau tempo. Esses sensores incluem anemômetros para medir o vento, pluviômetros para precipitação, barômetros para pressão e termômetros para temperatura, contribuindo para a segurança, eficiência operacional e confiabilidade dos drones, para garantir entregas seguras e pontuais mesmo em condições climáticas desafiadoras.



Figura 6: Sensor meteorológico
Fonte: Adaptado de milesight (2022)

- **Sensores de geolocalização (GPS):** O sensor mais importante no sistema é o sensor GPS, pois fornece dados de localização em tempo real, permitindo que o drone siga rotas pré definidas com alta precisão, conforme podemos ver na Figura 7 um tipo deste sensor ou parecido. A navegação precisa é essencial para a eficiência das entregas e a segurança do voo, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas, onde a presença de obstáculos e a necessidade de evitar colisões são críticas. Além disso, o sensor GPS possibilita a

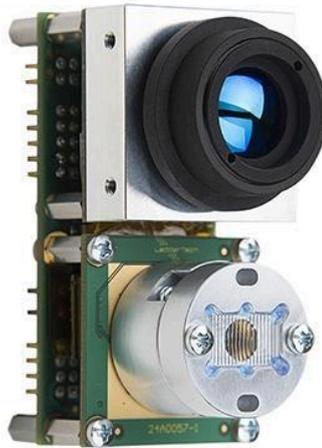


Figura 8: Sensor lidar
Fonte: Greencarcongress (2016)

Os dados destes sensores são coletados e processados por algoritmos de inteligência artificial (IA), que analisam e interpretam as informações em tempo real. Isso permite ajustes automáticos na rota e no comportamento do drone, otimizando o consumo de energia e garantindo entregas rápidas e seguras. Por exemplo, se um sensor meteorológico detectar uma tempestade iminente, o sistema de IA pode redirecionar o drone automaticamente para evitar a área afetada. Com isso, podemos adicionar mais sensores como câmeras de alta resolução e sensores de infravermelho que podem ser utilizados para inspeção visual e monitoramento de áreas de difícil acesso.

2.5 Algoritmos de inteligência artificial para otimização de rotas

A otimização de rotas para drones utilizando algoritmos de Inteligência Artificial (IA) representa uma área de pesquisa de grande relevância, especialmente para as entregas urbanas que buscam eficiência logística. A combinação de veículos terrestres e drones em estratégias de roteamento híbridas tem se mostrado eficaz na redução dos tempos de entrega e dos custos operacionais. Conforme afirmado por Cota, Correa e Souza (2022), os algoritmos híbridos para o problema de roteamento de caminhões e drones com janelas de tempo utilizam uma abordagem bifásica, estabelecendo inicialmente rotas para caminhões e, posteriormente, para drones, abordando desafios como o pouso automático dos drones. Técnicas avançadas como programação inteira mista e branch-and-price permitem modelar sistemas complexos envolvendo múltiplos drones e caminhões, como discutido por Wang e Sheu (2019). Contudo, a necessidade de dados reais para validar esses modelos representa uma barreira significativa para sua implementação prática. Diversos algoritmos

podem ser utilizados para a geração de rotas, conforme resumido na Tabela 1, que destaca os algoritmos mais utilizados e suas respectivas características.

Tabela 2: Algoritmos mais utilizados na geração de rotas

Algoritmo	Descrição
Algoritmo de Dijkstra	Utilizado para encontrar o caminho mais curto entre dois pontos em um grafo.
Algoritmo de Bellman-Ford	Resolve o problema do caminho mais curto, mesmo se os pesos das arestas forem negativos.
Algoritmo A*	Combina a busca de caminho mais curto com heurísticas para melhorar a eficiência.
Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO)	Baseado no comportamento de formigas em busca de comida, é eficaz para encontrar rotas ótimas.
Algoritmo Genético (GA)	Utiliza princípios de seleção natural para otimizar a busca de rotas.
Algoritmo de Vizinhança Variável (VNS)	Método heurístico para resolver problemas de otimização, alterando sistematicamente a estrutura da vizinhança.
Algoritmo de Busca Tabu	Utiliza uma lista tabu para evitar revisitar soluções recentes e encontrar soluções ótimas.
Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO)	Baseado no comportamento coletivo de pássaros e peixes, busca soluções ótimas através de interações sociais.
Algoritmo de Floyd-Warshall	Utilizado para encontrar os caminhos mais curtos entre todos os pares de nós em um grafo.

Fonte: Autor

A integração de aprendizado de máquina, especialmente através de aprendizado profundo e redes neurais, facilita a autonomia dos drones, aprimorando suas capacidades de navegação autônoma e evitando obstáculos em rotas dinâmicas (Zhang et al., 2021). A IA desempenha um papel crucial na adaptação das rotas dos drones às variáveis ambientais complexas, como meteorologia, elevação do terreno e obstáculos urbanos. Algoritmos avançados são capazes de analisar em tempo real as condições meteorológicas para ajustar as rotas, evitando áreas de turbulência, precipitação intensa ou ventos fortes que possam comprometer a segurança e eficiência da entrega. A capacidade de adaptação é vital para a operação em ambientes urbanos, onde a topografia, como edifícios altos e estruturas variadas, influencia diretamente as rotas ótimas (Martins et al., 2019). Além disso, a utilização de sensores avançados, como LIDAR e GPS de alta precisão, integrados a sistemas de IA, permite uma navegação precisa e segura, essencial para a eficiência das entregas.

Apesar da eficácia dos sistemas inteligentes, eles enfrentam desafios significativos, como a regulamentação do espaço aéreo e a integração de sistemas de IA em operações logísticas reais. A regulamentação do espaço aéreo é complexa e varia significativamente entre diferentes jurisdições, exigindo que os sistemas de navegação dos drones sejam programados para evitar áreas restritas ou atravessá-las conforme as regulamentações locais. Segundo a Comissão Europeia, as novas regras do *U-space*, implementadas em 2021, criam condições para operações seguras tanto de drones quanto de aeronaves tripuladas, permitindo a realização de operações mais complexas e de longa distância, especialmente em espaços aéreos de baixa altitude e densamente operados (EUROPEAN COMMISSION, 2023; UNMANNED AIRSPACE, 2023).

Técnicas de otimização, como os algoritmos genéticos e o Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO), têm se mostrado promissoras para encontrar soluções eficientes para problemas complexos de roteamento. Esses algoritmos são capazes de lidar com a complexidade e as variáveis dinâmicas do ambiente de entrega, proporcionando rotas eficientes e viáveis em um curto espaço de tempo (Silva e Ludermir, 2021). Algoritmos Genéticos simulam o processo de evolução natural, começando com diversas rotas possíveis e utilizando operações de cruzamento e mutação para gerar novas rotas. As melhores rotas são selecionadas para a próxima geração, promovendo continuamente a eficiência e a adaptabilidade. Este processo iterativo é essencial para encontrar soluções altamente eficientes e adaptáveis, especialmente em ambientes variáveis (Silva e Lima, 2018).

2.6 Grafos e suas aplicações

A teoria dos grafos é um ramo da matemática que se dedica ao estudo de grafos, estruturas formadas por vértices (ou nós) e arestas (ou arcos). Um grafo representa, de forma visual ou abstrata, um conjunto de objetos onde alguns pares desses objetos estão conectados por links. Essa teoria possui aplicações diversas, abrangendo desde a ciência da computação até a biologia, passando por redes de transporte e muitos outros campos. Um grafo pode ser definido de várias maneiras, sendo uma das definições mais comuns aquela em que um grafo G é composto por um conjunto $V(G)$ de vértices e um conjunto $E(G)$ de arestas, onde cada aresta conecta um par de vértices. Em um grafo simples, não há mais de uma aresta conectando qualquer par de vértices e não há arestas que conectam um vértice a si mesmo. Em contrapartida, em um multigrafo, podem existir múltiplas arestas entre os mesmos vértices e laços que conectam vértices a si mesmos (Anotações de aula, 2023).

Dentro da teoria dos grafos, diversas classificações e propriedades são fundamentais para sua compreensão. Um grafo é denominado "conectado" quando existe um caminho entre quaisquer dois de seus vértices, caso contrário, ele é considerado "desconectado". Uma estrutura particularmente interessante é a "árvore", caracterizada por ser um grafo conectado sem ciclos, ou seja, sem caminhos fechados. Outro conceito essencial é o de "ciclo", que é definido como um caminho que começa e termina no mesmo vértice, sem repetir nenhuma aresta. A análise de ciclos é crucial para entender várias propriedades dos grafos, como a determinação de sua capacidade de ser percorrido totalmente sem repetir arestas e a capacidade de ser percorrido totalmente sem repetir vértices. Um grafo é considerado Euleriano quando existe um ciclo que percorre cada aresta exatamente uma vez, enquanto um grafo é hamiltoniano quando existe um ciclo que visita cada vértice exatamente uma vez. Essas propriedades são vitais para diversas aplicações e problemas teóricos na matemática e na computação (ERDŐS; RÉNYI, 1960; BERGE, 1957; COOK, 2012).

3 INTEGRAÇÃO DE SISTEMA ATRAVÉS DO IoT

A arquitetura de sistemas de Internet das Coisas (IoT), aplicada ao desenvolvimento de drones para a logística urbana, é essencial para o funcionamento eficaz da rede de drones. O detalhamento começa com a descrição dos componentes específicos da rede IoT, que inclui drones, sensores ambientais, dispositivos de comunicação e servidores de dados. Essa abordagem permite discutir os modelos e capacidades técnicas de cada componente, bem como o seu papel crucial no ecossistema IoT.

Dessa forma, estabelece-se uma compreensão sólida das funcionalidades e interações desses elementos, garantindo a integridade e a eficiência da rede. Um aspecto crucial a ser enfatizado é a segurança e o gerenciamento de dados, que são tratados com máxima prioridade devido à sensibilidade e ao volume das informações manipuladas. Na arquitetura proposta, são implementadas estratégias robustas de proteção de dados, incluindo criptografia, autenticação e outras medidas de segurança cibernética, para garantir a integridade e a privacidade das informações. Além disso, os protocolos de comunicação que permitem a troca de informações entre os componentes da IoT são cuidadosamente analisados, destacando aqueles que proporcionam eficiência e confiabilidade. Protocolos como MQTT, AMQP, HTTP e CoAP são examinados, especialmente em como eles lidam com desafios críticos como latência, necessidade de largura de banda e resistência a falhas, que são essenciais para garantir operações bem-sucedidas em ambientes urbanos densamente povoados.

3.1 Arquitetura IoT

A arquitetura de rede da Internet das Coisas (IoT) é fundamental para a eficiência e inovação dos sistemas modernos de entrega, especialmente quando se trata de drones. Esta arquitetura compreende uma variedade de dispositivos integrados, desde sensores simples até complexos sistemas de processamento de dados, todos interconectados para formar uma rede de comunicação eficiente e robusta (Krcic et al., 2014).

Dispositivos IoT são incorporados diretamente a objetos do cotidiano e sistemas industriais, possibilitando uma ampla gama de aplicações práticas e avançadas. No contexto dos sistemas de entrega por drones, a rede IoT desempenha um papel fundamental em todas as etapas do processo logístico. Desde o monitoramento do inventário até a entrega final, sensores IoT coletam e analisam dados em tempo real, essenciais para a navegação precisa e otimização das rotas dos drones. Além disso, sensores integrados monitoram continuamente as condições dos pacotes durante o transporte, garantindo a integridade e segurança dos itens entregues. Esses dispositivos IoT permitem um acompanhamento detalhado e contínuo do status das entregas, proporcionando maior eficiência,

redução de custos operacionais e aumento da satisfação dos clientes ao assegurar que os produtos cheguem ao seu destino nas condições ideais (Hakiri e Berthou, 2015).

A estrutura em camadas da IoT inclui dispositivos de campo como sensores e atuadores (*Sensing Layer*), *gateways* intermediários (*Service Layer*) e sistemas de armazenamento e análise de dados em nuvem (*Network Layer*), conforme observado na Figura 9 e Figura 10. Esta organização permite que cada componente realize suas funções de forma autônoma, enquanto contribui para o objetivo geral de uma entrega eficiente e segura. A camada de dispositivos de campo captura dados essenciais, que são então processados pelos *gateways* e analisados em plataformas de nuvem para gerar *insights* acionáveis (Thawani, 2022).

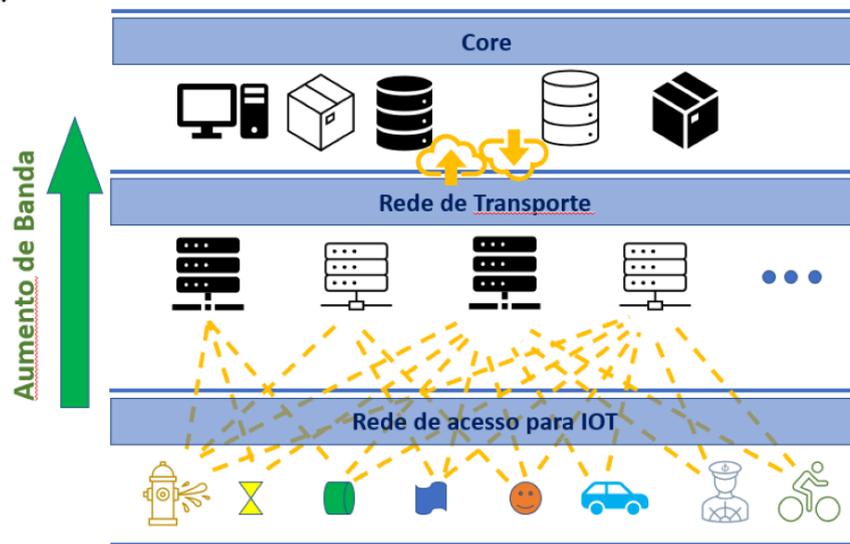


Figura 9: Estrutura de arquitetura de uma rede IoT
 Fonte: Ponto ISP (2022)

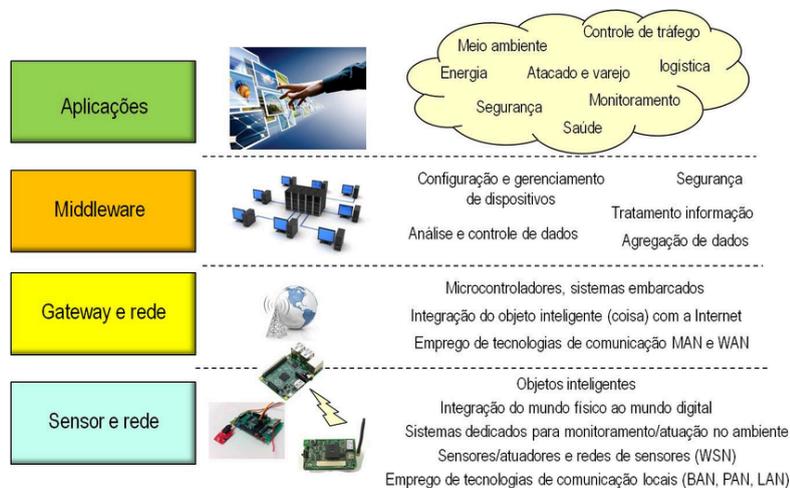


Figura 10: Estrutura de camadas de uma rede IoT continuação
 Fonte: Researchgate (2016)

A arquitetura IoT é dividida em quatro camadas principais, conforme representado na Figura 9 e Figura 10: A camada de sensores, a camada de rede, a camada de serviço e a camada de interface.

- **Camada de sensores (*Sensing Layer*):** É a camada física que contém os sensores responsáveis por coletar dados. Estes sensores capturam informações do ambiente através de diversos tipos de dispositivos, como etiquetas RFID, sensores inteligentes, leitores RFID, dispositivos *Bluetooth* de baixa energia (BLE), entre outros. Utilizando protocolos específicos de aquisição de dados, essa camada é crucial para a coleta de informações que serão processadas posteriormente (KAMAL, 2017).
- **Camada de rede (*Network Layer*):** Camada responsável por transferir os dados coletados pela camada de sensores para a camada de serviço. Esta camada facilita a comunicação entre os sensores e os sistemas de processamento de dados, utilizando tecnologias de rede como WLAN, redes móveis e redes de sensores sem fio (WSNs). A interconexão em nuvem desempenha um papel essencial nesta camada, garantindo o transporte seguro e eficiente dos dados capturados (KRČO; POKRIĆ; CARREZ, 2014).
- **Camada de serviço (*Service Layer*):** Cria e gerencia os serviços necessários para usuários e aplicações. Nessa camada, os dados recebidos da camada de rede são processados e armazenados, oferecendo funcionalidades de lógica de negócios, integração e composição de serviços. Os serviços são organizados em um repositório, tornando-os acessíveis e utilizáveis conforme necessário para diversas aplicações (HAKIRI; BERTHOU, 2015).
- **Camada de interface (*Interface Layer*):** Fornece interfaces para interagir com os serviços oferecidos pela camada de serviço. Esta camada permite que os usuários e aplicativos interajam com os dados e serviços IoT por meio de *front-ends* de aplicativos, APIs e interfaces de contrato. Facilitando a interação entre os usuários e os serviços processados, a camada de interface garante o acesso e controle eficientes dos dados (SETHI; SARANGI, 2017).

Estas camadas, funcionam de forma integrada, garantindo a eficiência e a robustez dos sistemas IoT, permitindo que cada componente desempenhe suas funções específicas de forma autônoma e coesa, contribuindo para um ecossistema eficiente e seguro.

A importância dos componentes IoT no fluxo de trabalho logístico e operacional dos sistemas de entrega por drones não pode ser subestimada. Segundo Hakiri e Berthou (2015), eles possibilitam a comunicação e controle eficaz dos drones, gerenciam o fluxo de trabalho operacional e facilitam a manutenção proativa dos equipamentos. Isso inclui a capacidade de planejar rotas em tempo real, ajustar operações com base em condições variáveis e realizar manutenções preventivas para evitar

falhas durante as entregas. A rede IoT possibilita a criação de sistemas inteligentes capazes de se adaptar dinamicamente às mudanças nas condições ambientais e nas demandas dos clientes.

Algoritmos avançados de aprendizado de máquina podem ser integrados para prever padrões de demanda e ajustar as rotas dos drones em conformidade, aumentando a eficiência e reduzindo o tempo de entrega. A análise preditiva também pode identificar possíveis problemas nos drones antes que ocorram falhas, permitindo intervenções de manutenção mais eficazes. A integração dos componentes IoT aprimora a segurança do sistema de entregas, pois sensores e câmeras internas podem monitorar o ambiente ao redor dos drones, detectando e evitando obstáculos automaticamente. Além disso, sistemas de comunicação seguros garantem que os dados transmitidos entre os drones e os centros de controle sejam protegidos contra interceptação e ataques cibernéticos (Hakiri e Berthou, 2015).

3.2 Componentes de uma rede IoT

Os drones utilizados em sistemas de entrega urbana possuem especificações variadas, como alcance de voo, capacidade de carga e tecnologia de navegação (GPS, sistemas de visão). Essas características são integradas ao IoT para otimizar o planejamento de rotas e entregas. Sensores ambientais, como meteorológicos, de temperatura e umidade, garantem operações seguras e eficientes, fornecendo dados essenciais para a tomada de decisões em tempo real. A comunicação entre drones e centros de controle é realizada por meio de tecnologias como LTE, 5G e comunicações via satélite, garantindo coordenação confiável e segura das tarefas de entrega. Os servidores de dados armazenam e processam as informações coletadas, utilizando computação em nuvem ou servidores locais, com medidas de segurança robustas. A análise desses dados melhora a eficiência das entregas e a otimização das rotas.

3.2.1 Integração do drone com rede IoT

À medida que os drones se tornam cada vez mais presentes no setor de logística urbana, a integração de tecnologias de navegação de ponta com a Internet das Coisas (IoT) é essencial para aumentar a eficácia e a confiabilidade das operações dos drones. Ferramentas de navegação essenciais como GPS, sistemas avançados de visão e diversos sensores ambientais permitem que os drones naveguem em terrenos urbanos complexos, garantindo serviços de entrega precisos e rápidos.

Algumas tecnologias de geolocalização, como o GPS, são os principais sensores que servem de base para a navegação dos drones, fornecendo dados de localização em tempo real que são cruciais para o rastreamento de caminhos e destinos com precisão. Sistemas de visão, que incorporam tecnologias de imagem sofisticadas como câmeras e, às vezes, LiDAR (*Light Detection and Ranging*),

capacitam os drones a identificar e evitar obstáculos, o que é crucial para manter a segurança em ambientes densamente povoados ou complexos. Além disso, sensores ambientais, que monitoram variáveis como temperatura, umidade e qualidade do ar, otimizam o desempenho dos drones com base nas condições atmosféricas atuais, protegendo contra falhas do sistema induzidas por fatores ambientais (ALSAMHI et al., 2019).

A integração da rede com os drones aumenta significativamente a eficiência operacional e a otimização de rotas. Através da IoT, os drones comunicam-se dentro de uma rede de dispositivos conectados, facilitando a troca e o processamento de dados em tempo real. Segundo Alsamhi et al. (2019), os drones podem ajustar suas rotas de voo de maneira responsiva de acordo com atualizações de tráfego ou condições meteorológicas transmitidas via redes IoT.

Na linha de frente da transformação da logística urbana, a Internet das Coisas (IoT) redefine o papel dos drones em ambientes densamente urbanizados. Essa tecnologia permite uma integração impecável e eficiente entre drones e a infraestrutura de logística, como armazéns e centros de despacho, transformando-os em componentes de um sistema coeso e otimizado. Essa rede interconectada não só melhora a precisão nas entregas ajustando rotas e horários, mas também eleva a confiabilidade e a eficiência dos serviços prestados (ALSAMHI et al., 2019).

Com isto, a rede IoT é crucial para a implementação de sistemas de manutenção preditiva em drones, utilizando uma rede de sensores para monitoramento contínuo de condições operacionais e de saúde. Com essa tecnologia, é possível antecipar falhas antes que elas ocorram, minimizando paradas não planejadas e reduzindo custos de manutenção. Através da IoT, os drones são integrados a plataformas de gerenciamento de frota que centralizam o controle e a supervisão das operações, permitindo o rastreamento em tempo real, o monitoramento do progresso das entregas e ajustes dinâmicos nas rotas com base em dados atualizados continuamente. A interoperabilidade proporcionada pelos padrões de comunicação abertos da IoT garante que diversos dispositivos e sistemas possam cooperar eficientemente, destacando o papel da IoT na revolução da logística moderna e na adaptação dos drones para a complexidade dos cenários urbanos atuais (ALSAMHI et al., 2019).

3.2.2 Principais tecnologias de transmissão de dados de uma rede IoT

No desenvolvimento de sistemas para drones, especialmente para a logística de entregas urbanas, a escolha de tecnologias de comunicação para transmissão de dados é crucial. Essas transmissões devem ser altamente confiáveis e de baixa latência. Como visto na Tabela 2, as tecnologias incluem LTE (*Long Term Evolution*), 5G, comunicações via satélite, LoRa (*Long Range*), *Wi-Fi*, *Bluetooth* e NB-IoT (*Narrowband IoT*), cada uma com suas características específicas que influenciam na eficiência e segurança das operações. As principais tecnologias de comunicação de uma rede IoT são:

- **LTE:** Amplamente utilizado devido à sua cobertura extensa e capacidade de fornecer comunicação de alta velocidade. Esta tecnologia permite que drones operem em áreas urbanas e rurais, garantindo uma conexão constante com os centros de controle. No entanto, o LTE pode enfrentar limitações em termos de latência e largura de banda quando comparado a outras tecnologias mais avançadas. Além disso, a rede LTE é robusta e já bem estabelecida, o que facilita a integração de drones com as infraestruturas existentes (ALSAMHI et al., 2019).
- **5G:** Oferece uma latência significativamente menor e uma maior largura de banda em comparação com o LTE, o que é ideal para a coordenação de tarefas complexas de entrega. Com a capacidade de suportar muitos dispositivos conectados simultaneamente, o 5G facilita a comunicação em tempo real entre drones e centros de controle, aumentando a precisão e a eficiência das operações. Além disso, o 5G é capaz de oferecer conexões ultra confiáveis e de baixa latência, essenciais para aplicações críticas onde a segurança é primordial (ALSAMHI et al., 2019).
- **Satelitais:** A comunicação via satélite é essencial em áreas remotas onde as redes terrestres (LTE e 5G) não estão disponíveis. Esta tecnologia garante que os drones possam manter uma conexão estável com os centros de controle, independentemente da localização. No entanto, as comunicações via satélite podem sofrer com a latência mais alta e custos operacionais elevados (SETHI; SARANGI, 2017).
- **LoRa (*Long Range*):** Tecnologia de comunicação sem fio projetada para longas distâncias e baixo consumo de energia. Embora não ofereça a mesma largura de banda que LTE ou 5G, é ideal para aplicações que requerem a transmissão de pequenas quantidades de dados em intervalos regulares. LoRa é particularmente útil em áreas rurais ou em cenários onde a eficiência energética é crucial. Esta tecnologia é amplamente utilizada em aplicações de IoT devido à sua capacidade de penetrar em ambientes densamente construídos e cobrir grandes áreas geográficas (ALSAMHI et al., 2019).
- **NB-IoT (*Narrowband IoT*):** Focada em fornecer conectividade para dispositivos IoT que necessitam de baixa largura de banda e alta eficiência energética. NB-IoT é ideal para drones que realizam tarefas de monitoramento e coleta de dados, pois permite uma comunicação eficiente com centros de controle mesmo em áreas com cobertura limitada. Esta tecnologia é suportada por infraestruturas de rede móvel existentes, tornando-a uma opção viável e econômica (ALSAMHI et al., 2019).

Tabela 3: Tipos de conexão de uma rede IoT

Protocolo	otimizado para maior vida útil da bateria	Limite de distância nominal	Velocidade Média da Rede	Espectro de Rede
 NFC	✓	Pessoal (<10m)	2Mbps	ISM 2.4GHz Sem licença
 Bluetooth®	✓	Contado (<4cm)	100kbps	ISM 13.56MHz Sem licença
 WiFi™	✗	Local (<100m)	>100Mbps	ISM 2.4GHz/5GHz unlicensed
 LoRaWAN™	✓	Metro (>10km)	<50kpbs	ISM 900Mhz, 868MHz, 433MHz unlicensed
NB-IoT	✓	Metro (>10km)	200kbps	Licença Celular
2G 3G	✗	Metro (>30km)	<2Mbps	Licença Celular
 4G LTE	✗	Metro (>30km)	>100Mbps	Licença Celular
5G	✗	Metro (>30km)	>10Gbps	Licença Celular

Fonte: Adaptado de Abracon (2018)

A confiabilidade e a segurança das comunicações são fatores críticos na coordenação de tarefas complexas de entrega. Uma comunicação confiável garante que os dados de navegação, estado do drone e condições ambientais sejam transmitidos em tempo real, permitindo uma tomada de decisão informada e rápida. A segurança das comunicações é igualmente importante para proteger contra interceptações e manipulações de dados que poderiam comprometer a segurança das operações. As tecnologias de comunicação devem incorporar protocolos de segurança robustos, como criptografia de ponta a ponta, para assegurar que os dados transmitidos permaneçam confidenciais e íntegros (KAMAL, 2017).

A escolha da tecnologia de comunicação deve ser feita com base nas necessidades específicas da operação, considerando fatores como a área de cobertura, a necessidade de baixa latência e a largura de banda necessária para transmissão de dados. Em um cenário ideal, uma combinação dessas tecnologias pode ser utilizada para garantir a melhor cobertura e desempenho possível, adaptando-se às condições específicas de cada missão. Dessa forma, as tecnologias de comunicação desempenham um papel fundamental na operação eficiente e segura de drones para entregas urbanas, contribuindo para o sucesso e a inovação no setor de logística (ALSAMHI et al., 2019).

3.3 Protocolos de comunicação

O papel dos servidores de dados no armazenamento e processamento das informações coletadas por drones e sensores é essencial para assegurar a eficiência e a eficácia da logística de entregas urbanas. Esses servidores, sejam baseados na nuvem ou locais, constituem a base para o

gerenciamento dos enormes volumes de dados gerados, pois são responsáveis pela coleta, armazenamento, processamento e análise dos dados, permitindo decisões em tempo real e a otimização das operações. A computação em nuvem oferece inúmeras vantagens para a gestão de dados provenientes de dispositivos IoT, como drones, proporcionando soluções de armazenamento escaláveis que podem acomodar grandes volumes de dados, além de disponibilizar capacidades avançadas de processamento de dados, incluindo aprendizado de máquina e análise de *big data*, que aprimoram os processos de tomada de decisão. Os serviços de nuvem também possibilitam o acesso remoto aos dados, permitindo o monitoramento e controle das operações dos drones em tempo real de qualquer lugar com acesso à internet, o que é crucial para a gestão de operações de entrega que abrangem vastas áreas geográficas (KAMAL, 2017; THAWANI; AJMIRE, 2022).

Contudo, a escolha entre servidores baseados na nuvem e locais depende de diversos fatores. Segundo Kamal (2017), os servidores locais, embora potencialmente mais seguros devido ao controle físico de acesso, podem não oferecer a mesma escalabilidade e capacidades avançadas de processamento das soluções em nuvem, além de exigirem um investimento inicial significativo em *hardware* e manutenção contínua, o que pode ser uma limitação para algumas organizações. Por outro lado, os servidores em nuvem fornecem um modelo de pagamento conforme o uso, reduzindo os custos iniciais e oferecendo flexibilidade para escalar as operações conforme necessário (KAMAL, 2017).

A segurança dos dados é uma preocupação crítica na implementação de sistemas IoT para entregas por drones. Medidas como criptografia, protocolos seguros de transmissão de dados e mecanismos robustos de autenticação são essenciais para proteger informações sensíveis. Thawani e Ajmire (2022) afirmam que tanto os servidores em nuvem quanto os locais devem aderir a rigorosos padrões de segurança para evitar acessos não autorizados e violações de dados, além de serem necessárias auditorias de segurança regulares e atualizações para enfrentar ameaças e vulnerabilidades emergentes. Paralelamente, a análise de grandes volumes de dados coletados de drones e sensores pode melhorar significativamente a eficiência das entregas, pois análises avançadas permitem identificar padrões e tendências nas operações de entrega, como rotas ótimas, horários de pico de entrega e potenciais atrasos. Segundo Kamal (2017), algoritmos de aprendizado de máquina podem prever necessidades de manutenção para drones, reduzindo o tempo de inatividade e garantindo um serviço consistente. Além disso, a análise de dados em tempo real pode fornecer *insights* imediatos sobre problemas operacionais, permitindo uma rápida resolução e minimizando interrupções.

A integração da análise de big data com sistemas IoT potencializa a capacidade de tomar decisões informadas. De acordo com Thawani e Ajmire (2022), análises preditivas podem antecipar a demanda, permitindo uma melhor alocação de recursos e gerenciamento de inventário. O rastreamento e monitoramento em tempo real dos drones através de servidores de dados podem melhorar o planejamento de rotas e reduzir os tempos de entrega. Ao utilizar a análise de dados, as empresas

podem otimizar seus processos de entrega, reduzir custos e aumentar a satisfação do cliente (THAWANI; AJMIRE, 2022).

Para assegurar uma comunicação eficaz e segura entre servidores e drones, é essencial utilizar protocolos de comunicação específicos, cada um adequado para diferentes cenários e requisitos de transmissão de dados. Entre os principais protocolos utilizados estão AMQP, DDS, CoAP e Modbus, cada um com suas características e funcionalidades distintas (THAWANI; AJMIRE, 2022).

3.3.1 Protocolo de comunicação AMQP

O *Advanced Message Queuing Protocol* (AMQP) é um protocolo de mensagens orientado a filas, padronizado pela ISO e IEC como ISO/IEC 19464:2014, desenvolvido para resolver problemas de interoperabilidade entre sistemas de mensagens proprietários, promovendo uma comunicação eficiente e uniforme. No contexto dos drones, o AMQP desempenha um papel crucial, possibilitando a transmissão eficaz de comandos e dados de telemetria entre drones e servidores, assegurando a entrega confiável das mensagens por meio de funcionalidades avançadas, como confirmações de entrega, roteamento dinâmico e enfileiramento de mensagens, que são essenciais para garantir a confiabilidade e a integridade dos dados em aplicações críticas (Microsoft, 2024).

Utilizando uma codificação binária tanto para as instruções de protocolo quanto para as mensagens comerciais transferidas, o AMQP permite uma comunicação eficiente e menos propensa a erros, incorporando esquemas sofisticados de controle de fluxo que otimizam a utilização da rede e dos componentes conectados, garantindo uma comunicação fluida e sem congestionamentos. Segundo a Microsoft (2024), o AMQP é capaz de operar em diversas topologias de comunicação, adaptando-se a diferentes modelos de rede e necessidades operacionais.

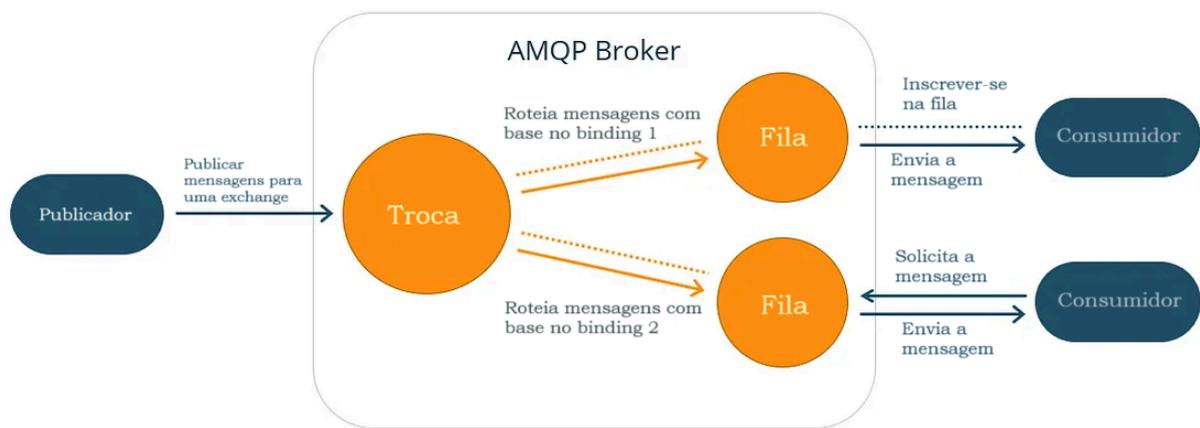


Figura 11: Arquitetura de transmissão do protocolo AMQP

Fonte: Adaptado de Wallarm (2019)

Na topologia cliente-servidor, o cliente envia mensagens para um servidor central que processa e responde às solicitações, sendo este modelo simples e amplamente utilizado em cenários onde um servidor centralizado gerencia todas as comunicações e processamentos de dados. Na topologia servidor-cliente, o fluxo de comunicação é iniciado pelo servidor, que envia atualizações e comandos para os clientes, sendo útil para disseminar informações críticas e atualizações em tempo real para múltiplos dispositivos clientes (Microsoft, 2024).

A topologia cliente-cliente permite que os clientes se comuniquem diretamente entre si, sem a necessidade de um servidor intermediário, sendo especialmente útil em cenários que requerem comunicação direta e de baixa latência entre dispositivos, como em operações colaborativas entre drones. Na topologia cliente-agente, os clientes enviam mensagens para um agente intermediário, que gerencia a distribuição das mensagens para os destinatários corretos, proporcionando maior escalabilidade e flexibilidade na gestão das comunicações, especialmente em redes complexas com múltiplos dispositivos (Microsoft, 2024).

Na topologia agente-agente, múltiplos agentes se comunicam entre si para distribuir e balancear a carga de mensagens, ideal para grandes sistemas distribuídos que necessitam de alta disponibilidade e redundância, garantindo que as mensagens sejam entregues mesmo em caso de falhas em partes da rede. No modelo de publicação/assinatura, um produtor de mensagens (publicador) envia mensagens para um canal ou tópico ao qual múltiplos consumidores (assinantes) podem se inscrever para receber as mensagens, sendo eficiente para distribuir informações a muitos receptores, como notificações de eventos ou atualizações de estado em tempo real, conforme visto na Figura 11 (Microsoft, 2024).

3.3.2 Protocolo de comunicação DDS

O *Data Distribution Service* (DDS) é um protocolo de *middleware* desenvolvido para fornecer comunicação em tempo real e de alta performance em sistemas distribuídos, destacando-se por sua eficiência e flexibilidade na infraestrutura de dados. Este protocolo é particularmente adequado para ambientes que requerem baixa latência e alta taxa de transferência de dados. No contexto dos drones, o DDS desempenha um papel essencial ao facilitar a transmissão de dados de telemetria e comandos de controle entre drones e servidores, garantindo uma comunicação rápida e confiável (OMG, 2024).

Utilizando um modelo de publicação/assinatura, onde os dados são publicados por um ou mais produtores e assinados por um ou mais consumidores, o DDS promove uma arquitetura descentralizada que facilita a troca de informações em tempo real. Uma das características mais notáveis do DDS é sua capacidade de configurar a Qualidade de Serviço (QoS) com alta precisão, permitindo ajustes detalhados que atendem aos requisitos específicos de comunicação, como latência, durabilidade e confiabilidade. Esse nível de controle é crucial para aplicações que exigem desempenho rigoroso e previsível, como é o caso da comunicação entre drones e servidores (OMG, 2024).

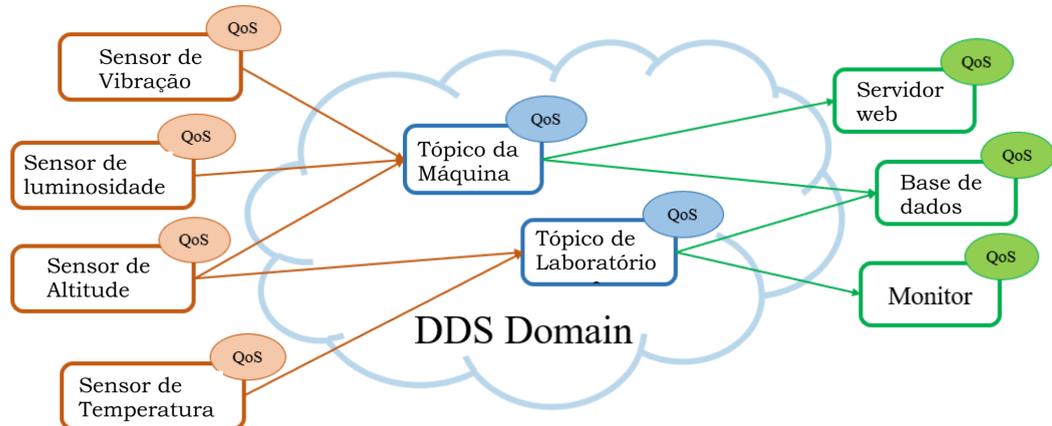


Figura 12: Protocolo de comunicação DDS

Fonte: Adaptado de Eletronics (2016)

Ademais, o DDS suporta uma vasta gama de topologias de rede, desde pequenas redes locais até grandes sistemas distribuídos, tornando-o extremamente versátil para diferentes contextos operacionais. A topologia cliente-servidor é usada quando o cliente envia dados para um servidor central que processa e distribui as informações para outros dispositivos. Na topologia cliente-cliente, os dispositivos se comunicam diretamente, permitindo uma troca de dados rápida e eficiente entre os drones em missões colaborativas. O DDS também se destaca em topologias de agente-agente, onde múltiplos agentes se comunicam para distribuir e balancear a carga de dados, garantindo alta disponibilidade e redundância. No modelo de publicação/assinatura, dados importantes podem ser disseminados para muitos assinantes, permitindo que todos os drones e sistemas conectados recebam atualizações críticas em tempo real, conforme visto na Figura 12 (OMG, 2024).

Em suma, a capacidade do DDS de operar em diversas topologias de comunicação e de oferecer uma qualidade de serviço detalhada torna-o uma escolha ideal para aplicações exigentes de drones, assegurando uma comunicação eficiente e robusta. Sua infraestrutura eficiente de dados permite que drones e servidores troquem informações vitais com baixa latência e alta confiabilidade, garantindo que as operações sejam executadas de forma segura e eficiente em qualquer cenário operacional (OMG, 2024).

3.3.3 Protocolo de comunicação CoAP

O *Constrained Application Protocol* (CoAP) é um protocolo projetado especificamente para dispositivos com recursos limitados, como sensores e atuadores em redes IoT, sendo baseado no protocolo HTTP, mas otimizado para funcionar em redes com baixa largura de banda e alta latência.

De acordo com Kamal (2017), o CoAP é uma excelente escolha para a comunicação entre servidores e drones em ambientes com restrições de rede, permitindo a transmissão eficiente de dados de sensor e comandos de controle, garantindo que, mesmo em condições adversas, às informações críticas cheguem ao seu destino. Incorporando segurança através do *Datagram Transport Layer Security* (DTLS), o CoAP proporciona integridade e confidencialidade nas comunicações, fundamental para proteger dados sensíveis transmitidos entre drones e servidores. Utilizando uma arquitetura de cliente/servidor, onde os clientes (drones) enviam requisições aos servidores (sistemas centrais) que processam e respondem às requisições, esta simplicidade torna o CoAP ideal para dispositivos com limitações de processamento e energia .

Na arquitetura cliente/servidor, o *Constrained Application Protocol* (CoAP) suporta topologias de comunicação *peer-to-peer*, permitindo que drones se comuniquem diretamente entre si quando necessário. Esta flexibilidade é crucial em operações onde a latência deve ser minimizada e a robustez da rede é essencial. O CoAP também oferece suporte para a descoberta de recursos e a observação de estados, facilitando o monitoramento contínuo dos drones e a atualização eficiente de seus estados operacionais, assegurando uma gestão mais eficaz e responsiva das operações.

A capacidade do CoAP de operar em redes com recursos limitados e de manter a segurança das comunicações torna-o uma escolha confiável para a comunicação entre drones e servidores. Sua eficiência e flexibilidade em diferentes topologias de rede permitem que ele atenda às diversas necessidades de operações de drones, garantindo uma comunicação robusta e segura (Alsamhi et al., 2019).

3.3.4 Protocolo de comunicação MODBUS

O Modbus é um protocolo de comunicação amplamente reconhecido e utilizado na automação industrial devido à sua simplicidade, robustez e flexibilidade. Desenvolvido originalmente pela Modicon (atualmente Schneider Electric) em 1979, o Modbus facilita a comunicação entre dispositivos como sensores, atuadores e controladores, desempenhando um papel fundamental na infraestrutura de comunicação em ambientes industriais. No contexto de drones de entrega, o Modbus surge como uma solução eficaz para integrar diferentes componentes do sistema, assegurando uma comunicação eficiente entre os drones e os servidores de controle (Alfacomp, 2020).

A simplicidade do Modbus é um dos seus principais atrativos. Com uma implementação baseada em um modelo mestre-escravo, o protocolo segue uma arquitetura de requisição-resposta onde o dispositivo mestre (geralmente um controlador lógico programável ou um sistema de controle e aquisição de dados) envia solicitações aos dispositivos escravos (sensores, atuadores etc.), que respondem conforme necessário. Este modelo é eficiente e fácil de gerenciar, o que é crucial para a

operação de drones de entrega que requerem comunicação rápida e confiável para coordenar movimentos, monitorar status e realizar ajustes em tempo real (InfraOps, 2020).

Existem duas variantes principais do protocolo Modbus: Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*) e Modbus TCP (*Transmission Control Protocol*). O Modbus RTU, uma implementação em série que opera em um formato de mensagem binário compacto, é ideal para ambientes onde a largura de banda é limitada e a comunicação precisa ser rápida e eficiente. Este formato utiliza a técnica de transmissão half-duplex, onde a comunicação ocorre em um canal único, com os dispositivos alternando entre transmissão e recepção de dados. De acordo com National Instruments (2024), essa capacidade permite que drones compartilhem a mesma linha de comunicação sem colisões, garantindo uma troca de dados eficiente e sem interrupções. Por outro lado, o Modbus TCP utiliza redes Ethernet para comunicação, encapsulando as mensagens Modbus em pacotes TCP/IP, o que permite a comunicação sobre redes Ethernet modernas. Esta variante oferece maior flexibilidade e velocidade, sendo ideal para integração com infraestruturas de TI existentes e para aplicações que exigem alta taxa de transferência de dados. De acordo com InfraOps (2020), a utilização do Modbus TCP facilita a implementação de redes mais extensas e complexas, suportando um maior número de drones conectados e permitindo uma comunicação mais rápida e eficiente entre os drones e os servidores de controle.

A interoperabilidade do Modbus é outra vantagem significativa. Como um protocolo aberto, o Modbus permite que qualquer fabricante implemente e integre dispositivos utilizando este padrão, promovendo uma ampla adoção e compatibilidade entre diferentes equipamentos e sistemas. Isso é crucial para plataformas IoT de drones de entrega, onde diferentes componentes de *hardware* e *software* precisam trabalhar juntos de forma harmoniosa. A capacidade de leitura e escrita de dados em registradores em bobinas, diagnóstico e controle de dispositivos amplia a versatilidade do Modbus, permitindo que seja utilizado em uma ampla gama de aplicações, desde simples monitoramento de sensores até complexos sistemas de controle distribuído. No contexto da aplicação em drones, a implementação de *gateways* de comunicação permite que o Modbus, tradicionalmente utilizado em redes locais, seja adaptado para funcionar em redes IoT. Isso facilita a integração de drones em sistemas de automação industrial existentes, aproveitando a robustez e confiabilidade do Modbus para garantir operações seguras e eficientes. O Modbus pode ser utilizado para integrar diferentes componentes do sistema de entrega, facilitando a comunicação entre os drones e os servidores de controle, assegurando que todas as partes do sistema operem de forma coordenada e eficiente (Alfacom, 2020; InfraOps, 2020; National Instruments, 2024).

4 DESENVOLVIMENTO DE IA PARA ANÁLISE DE ROTAS

A inteligência artificial (IA) tem transformado muitos setores, e a logística de entregas urbanas é um dos que mais se beneficiam dessa tecnologia. A utilização da IA em sistemas logísticos permite a otimização de processos complexos, aumentando a eficiência operacional. Quando pensamos no desenvolvimento de sistemas para drones, a análise de rotas se destaca como um aspecto essencial para garantir que as entregas sejam feitas de maneira eficiente, segura e confiável. Planejar as rotas desses drones é um trabalho complicado, pois é preciso levar em conta diversos fatores, como as condições ambientais, as restrições de tráfego aéreo, a capacidade da bateria e a segurança das operações. As técnicas de IA conseguem lidar com esses desafios de forma sistemática e eficiente, oferecendo soluções que se adaptam de forma dinâmica às mudanças no ambiente (KANCHANA; KAVITHA, 2020a; FÖSNER; KRAMBERGER, 2020).

Para a aplicação de inteligência artificial de forma eficaz, é essencial entender os conceitos geradores de linha, conhecidos como grafos. Essa ferramenta matemática é fundamental para resolver problemas de roteamento, pois nos ajuda a mapear os pontos de entrega e os caminhos que os conectam, sempre buscando minimizar distâncias e tempos de viagem. Um exemplo clássico é o Problema do Caixeiro Viajante, onde o desafio é encontrar a rota mais curta para que um vendedor visite várias cidades e volte ao ponto de partida. Resolver esse problema pode ser complicado, mas suas aplicações práticas são extremamente valiosas para otimizar rotas de entrega. Nesse contexto, os teoremas de Claude Berge são muito importantes, pois oferecem condições para reconhecer emparelhamentos máximos e desenvolver algoritmos eficientes para emparelhamentos e coberturas mínimas em grafos (BERGE, 1957; FÖSNER; KRAMBERGER, 2020; KANCHANA; KAVITHA, 2020b). Esses conceitos são vitais para o planejamento das rotas dos drones, ajudando a escolher as melhores trajetórias possíveis, garantindo que as entregas sejam rápidas e eficientes (FÖSNER; KRAMBERGER, 2020; KANCHANA; KAVITHA, 2020a).

Para complementar essa abordagem, é crucial compreender o papel dos modelos heurísticos na resolução de problemas complexos de roteamento. Esses métodos são fundamentais para encontrar soluções satisfatórias em tempo hábil. Algoritmos como os genéticos, *simulated annealing* e busca tabu se destacam como exemplos de heurísticas que podem ser aplicadas na otimização das rotas dos drones. Eles são capazes de lidar com a complexidade e as variáveis dinâmicas do ambiente de entrega, proporcionando rotas eficientes e viáveis em um curto espaço de tempo. Com esses modelos, podemos adaptar e melhorar continuamente as trajetórias dos drones, assegurando que as entregas sejam realizadas de maneira otimizada e confiável (KANCHANA; KAVITHA, 2020b; KANCHANA; KAVITHA, 2020c).

4.1 Grafos

4.1.1 Grafos dirigidos e não dirigidos

Os grafos, tanto dirigidos quanto não dirigidos, desempenham um papel fundamental na otimização de rotas para drones, especialmente em contextos urbanos complexos. Eles constituem uma ferramenta poderosa na modelagem de redes e na resolução de problemas de logística, permitindo uma gestão eficiente e eficaz dos trajetos de entrega. Os grafos são estruturas matemáticas que modelam relações binárias entre objetos, sendo essenciais para a representação de problemas em diversas áreas da ciência da computação (CORMEN et al., 2009).

Grafos não dirigidos: Grafos não dirigidos são uma representação em que as arestas não possuem uma direção específica, ou seja, o relacionamento entre os vértices é bidirecional, conforme podemos ver na figura 13. Esse tipo de grafo é frequentemente utilizado em situações em que a movimentação entre dois pontos é possível em ambos os sentidos sem restrições, como em muitas ruas e avenidas de cidades. Na aplicação de drones, grafos não dirigidos são empregados para modelar redes de pontos de entrega, permitindo que os drones se movimentam livremente em qualquer direção entre os pontos. Por exemplo, se um drone pode voar entre dois pontos de entrega A e B sem considerar uma direção preferencial, a conexão entre A e B pode ser representada por uma aresta não dirigida. Além disso, este modelo é útil para identificar rotas alternativas e garantir redundância, o que é essencial para lidar com obstáculos ou zonas de voo restrito que possam surgir. Segundo Berge (1957), em seu estudo seminal sobre teoria dos grafos, destaca a importância de conjuntos internamente estáveis e coberturas mínimas em grafos não dirigidos. Estes conceitos são aplicáveis na otimização de rotas para drones, onde um conjunto internamente estável pode representar um conjunto de pontos de entrega que não interferem uns com os outros, e uma cobertura mínima pode ajudar a determinar o número mínimo de drones necessários para cobrir todas as entregas sem sobreposição (BERGE, 1957).

Grafos dirigidos: Grafos dirigidos são estruturas onde as arestas possuem direção, indicando que a relação entre dois vértices é unidirecional. Essa característica é particularmente útil em cenários onde há restrições de direção, como em vias de mão única ou em rotas de voo específicas que os drones devem seguir devido a regulamentações ou condições ambientais, conforme podemos ver na figura 13. No contexto da logística de drones, os grafos dirigidos são empregados para mapear rotas onde o percurso de um ponto A para um ponto B não é necessariamente o mesmo que de B para A. Esse modelo torna-se crucial em cidades com regulamentações de voo restritas, onde os drones são obrigados a seguir corredores aéreos designados (CORMEN et al., 2009).

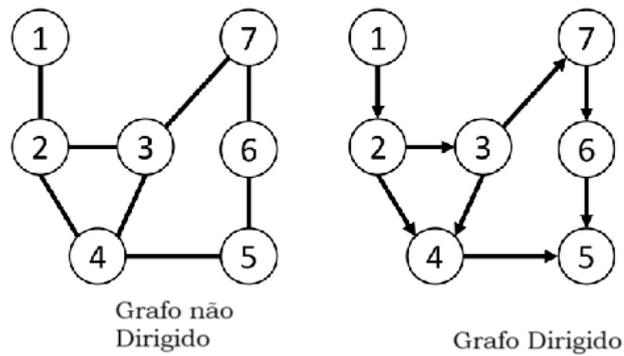


Figura 13: Grafos não dirigidos e dirigidos

Fonte: Researchgate (2019)

A eficiência do uso de grafos dirigidos na otimização de rotas pode ser exemplificada pela aplicação de algoritmos de caminho mínimo, como o algoritmo de Dijkstra e o algoritmo de Bellman-Ford. Estes algoritmos são fundamentais para encontrar a rota mais curta ou mais eficiente entre pontos de entrega, minimizando o tempo de voo e o consumo de energia (ZERMANI; FIDALGO, 2022). Tal otimização é essencial para maximizar a autonomia operacional dos drones, garantindo que eles possam realizar mais entregas em menos tempo e com menor consumo de recursos. Dessa forma, a aplicação de grafos dirigidos e de algoritmos de caminho mínimo contribui significativamente para a eficiência e viabilidade econômica das operações de entrega por drones em ambientes urbanos.

4.1.2 Peso das arestas em grafo

A teoria dos grafos oferece ferramentas poderosas para resolver problemas logísticos complexos, como a otimização de rotas de entrega por drones. A análise do peso das arestas dos grafos desempenha um papel crucial na determinação das rotas mais eficientes e eficazes. As arestas, representando as conexões entre os pontos de entrega e os depósitos, podem ser ponderadas de várias maneiras, refletindo diferentes aspectos do problema, como a distância, o tempo, o custo e o consumo de energia dos drones (KARMEL, 2009; PAPADIMITRIOU & STEIGLITZ, 1998).

Segundo Karmel (2009), a introdução de pesos nas arestas permite uma modelagem mais realista dos problemas logísticos. Por exemplo, em um cenário urbano, as arestas que representam rotas de voo sobre áreas congestionadas podem receber pesos mais altos devido ao maior consumo de energia para manobrar e evitar obstáculos. Além disso, a inclusão de fatores temporais, como janelas de entrega, adiciona outra camada de complexidade. Grafos ponderados permitem que esses fatores sejam incorporados diretamente nas análises e algoritmos de otimização (PAPADIMITRIOU; STEIGLITZ, 1998).

A aplicação de pesos nas arestas para refletir variáveis como a distância e o tempo é essencial para a criação de modelos realistas de rotas de entrega. Tal abordagem permite considerar não apenas a minimização da distância percorrida, mas também a eficiência energética dos drones, o que é crucial para operações sustentáveis e econômicas. Além disso, o uso de heurísticas e algoritmos meta-heurísticos, como o Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO) e o *Simulated Annealing*, pode ser especialmente útil para encontrar soluções próximas do ótimo em problemas de grande escala onde a solução exata é computacionalmente inviável (DORIGO; STÜTZLE, 2004; KARMEL, 2009).

4.2 Aplicação de grafos em logística

No contexto dos drones de entrega, um grafo pode ser construído onde os vértices representam os pontos de entrega e os depósitos, e as arestas representam as rotas possíveis entre esses pontos. A ponderação das arestas pode ser baseada em várias métricas, como a distância geográfica, onde cada aresta é ponderada de acordo com a distância entre os pontos conectados. No entanto, outras métricas, como o tempo de voo, o consumo de bateria ou até mesmo o risco de colisão em áreas urbanas densas, podem ser igualmente importantes. Um exemplo clássico de aplicação da teoria dos grafos em logística é o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), onde o objetivo é encontrar a rota mais curta que permite visitar um conjunto de pontos uma única vez e retornar ao ponto de partida. Esse problema pode ser adaptado para a logística de drones, onde a rota otimizada minimiza a distância total ou o tempo de voo. Algoritmos heurísticos, como a busca tabu e a otimização por colônia de formigas, têm se mostrado eficazes na solução de variações complexas do PCV, especialmente em grandes redes de entrega (TOTH; VIGO, 2002).

No cenário atual de urbanização crescente e avanços tecnológicos, a logística de entregas urbanas enfrenta desafios significativos que demandam soluções inovadoras e eficientes. Dentre essas soluções, o uso de drones para a entrega de mercadorias destaca-se por sua capacidade de superar obstáculos tradicionais, como congestionamentos de tráfego e limitações de infraestrutura (GOODCHILD; TOY, 2018). No entanto, para que essa tecnologia seja implementada de maneira eficaz, é essencial otimizar as rotas de voo, minimizando custos e tempo de entrega. Nesse contexto, a teoria dos grafos e, em particular, a árvore geradora mínima (*Minimum Spanning Tree*, MST), emerge como uma ferramenta crucial.

Segundo Cormen et al. (2009), a árvore geradora mínima é um subgrafo de um grafo conectado e não direcionado que conecta todos os vértices com o menor custo total possível, sem formar ciclos. Em termos de logística de drones, a MST pode ser aplicada para estabelecer uma rede eficiente de rotas de entrega, garantindo que todos os pontos de entrega sejam alcançados com o menor custo de voo. Isso é especialmente relevante em áreas urbanas densamente povoadas, onde a

eficiência das rotas de entrega pode ter um impacto significativo nos custos operacionais e na sustentabilidade das operações de drones.

4.2.1 Aplicação do algoritmo de dijkstra na logística

No contexto dos drones de entrega, um grafo pode ser construído onde os vértices representam os pontos de entrega e os depósitos, e as arestas representam as rotas possíveis entre esses pontos. A ponderação das arestas pode ser baseada em várias métricas, como a distância geográfica, onde cada aresta é ponderada de acordo com a distância entre os pontos conectados. No entanto, outras métricas, como o tempo de voo, o consumo de bateria ou até mesmo o risco de colisão em áreas urbanas densas, podem ser igualmente importantes. Um exemplo clássico de aplicação da teoria dos grafos em logística é o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), onde o objetivo é encontrar a rota mais curta que permite visitar um conjunto de pontos uma única vez e retornar ao ponto de partida. Esse problema pode ser adaptado para a logística de drones, onde a rota otimizada minimiza a distância total ou o tempo de voo. Algoritmos heurísticos, como a busca tabu e a otimização por colônia de formigas, têm se mostrado eficazes na solução de variações complexas do PCV, especialmente em grandes redes de entrega (SILVA, 2021; DORIGO; STÜTZLE, 2004).

No cenário atual de urbanização crescente e avanços tecnológicos, a logística de entregas urbanas enfrenta desafios significativos que demandam soluções inovadoras e eficientes. Dentre essas soluções, o uso de drones para a entrega de mercadorias destaca-se por sua capacidade de superar obstáculos tradicionais, como congestionamentos de tráfego e limitações de infraestrutura (GOODCHILD; TOY, 2018). No entanto, para que essa tecnologia seja implementada de maneira eficaz, é essencial otimizar as rotas de voo, minimizando custos e tempo de entrega. Nesse contexto, a teoria dos grafos e, em particular, a árvore geradora mínima (*Minimum Spanning Tree*, MST), emerge como uma ferramenta crucial.

Segundo Cormen et al. (2009), uma árvore geradora mínima (MST) é um subgrafo de um grafo conectado e não direcionado que conecta todos os vértices com o menor custo total possível, sem formar ciclos. A figura 14 ilustra claramente este conceito, demonstrando como uma MST conecta todos os vértices de forma eficiente. Em termos de logística de drones, a MST pode ser aplicada para estabelecer uma rede eficiente de rotas de entrega, garantindo que todos os pontos de entrega sejam alcançados com o menor custo de voo. Isso é especialmente relevante em áreas urbanas densamente povoadas, onde a eficiência das rotas de entrega pode ter um impacto significativo nos custos operacionais e na sustentabilidade das operações de drones (CORMEN et al., 2009).

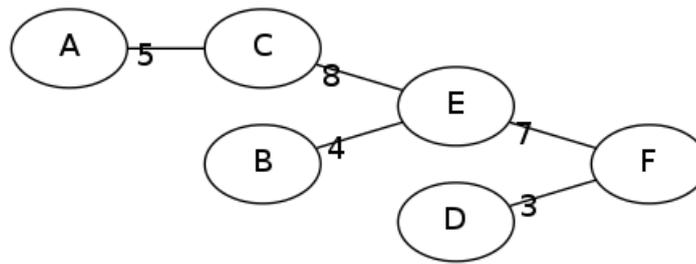


Figura 14: Árvore geradora mínima

Fonte: Stackoverflow (2014)

4.2.2 Aplicação do algoritmo A* na logística

O Algoritmo A* é amplamente reconhecido por sua eficiência em resolver problemas de busca e otimização, sendo especialmente útil na análise de rotas de entrega por drones. Este algoritmo combina as abordagens de busca de custo uniforme e heurística para encontrar o caminho mais curto entre um ponto de partida e um destino, garantindo a eficácia necessária para operações logísticas complexas, como as entregas urbanas por drones. A configuração do ambiente é crucial para a utilização do Algoritmo A*, sendo representada como um grafo, onde os nós correspondem a pontos de entrega ou passagem e as arestas representam os caminhos possíveis entre esses pontos. Cada aresta tem um custo associado, que pode refletir a distância, o tempo, o consumo de energia ou a dificuldade do terreno (RUSSELL; NORVIG, 2021).

A eficácia do Algoritmo A* reside na sua capacidade de avaliar e priorizar caminhos potenciais utilizando uma função de custo, que combina o custo real percorrido até um determinado nó ($g(n)$) e uma estimativa heurística do custo restante até o destino ($h(n)$). Esta função, $f(n) = g(n) + h(n)$, permite ao algoritmo tomar decisões informadas sobre qual rota seguir, minimizando o custo total esperado. A escolha da heurística é crucial para o desempenho do Algoritmo A*, sendo comuns em aplicações de drones a utilização da distância euclidiana ou da distância Manhattan, dependendo do layout da área de entrega (HART et al., 1968). De acordo com Hart et al. (1968), "a utilização de heurísticas apropriadas é fundamental para a eficiência do Algoritmo A*, especialmente em cenários complexos como as entregas urbanas por drones."

Durante a execução, o Algoritmo A* utiliza duas listas de nós para organizar o processo de busca: a lista aberta (*open list*), que contém os nós que ainda precisam ser avaliados, e a lista fechada (*closed list*), que inclui os nós já avaliados. O processo começa com o nó de partida sendo adicionado à lista aberta. A cada iteração, o algoritmo seleciona o nó na lista aberta com o menor valor de $f(n)$, avalia seus vizinhos e atualiza ambas as listas conforme necessárias. Esse ciclo continua até que o nó objetivo seja alcançado, garantindo que o caminho mais eficiente seja identificado (Pearl, 1984).

Em um cenário urbano onde um drone deve realizar múltiplas entregas, por exemplo, ele inicia sua rota em um depósito central e deve visitar vários pontos espalhados pela cidade. Utilizando o Algoritmo A*, o drone calcula a rota mais eficiente que minimiza o tempo de voo e o consumo de energia, evitando obstáculos como edifícios e áreas de voo restrito (LaValle, 2006).

O Algoritmo A* também pode ser adaptado para lidar com variações dinâmicas no ambiente, como mudanças nas condições climáticas ou na disponibilidade de rotas. Se uma área se tornar inacessível devido a condições adversas, o algoritmo pode recalcular a rota em tempo real, garantindo que o drone siga sempre o caminho mais seguro e eficiente. Em termos de implementação técnica, o Algoritmo A* pode ser integrado em sistemas de controle de drones utilizando linguagens de programação como Python ou C++, aproveitando bibliotecas de gráficos e algoritmos de busca disponíveis. A integração com sistemas de informação geográfica (GIS) e dados de sensores em tempo real permite uma atualização constante do mapa de rotas, aumentando a precisão e a confiabilidade das entregas (Stentz, 1995; Dechter e Pearl, 1985).

4.3 Problema do caixeiro viajante (PCV)

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) é um dos problemas mais estudados em otimização combinatória e tem implicações significativas na área de logística, especialmente quando aplicado às rotas de entrega por drones. O PCV pode ser descrito da seguinte forma: dado um conjunto de cidades e as distâncias entre cada par de cidades, o objetivo é encontrar a rota mais curta possível que visite cada cidade exatamente uma vez e retorne à cidade de origem, conforme podemos ver na Figura 15. Esse problema, aparentemente simples, revela uma complexidade exponencial à medida que o número de cidades aumenta, tornando-se um desafio considerável tanto para a teoria quanto para a prática (RUSSELL; NORVIG, 2021).

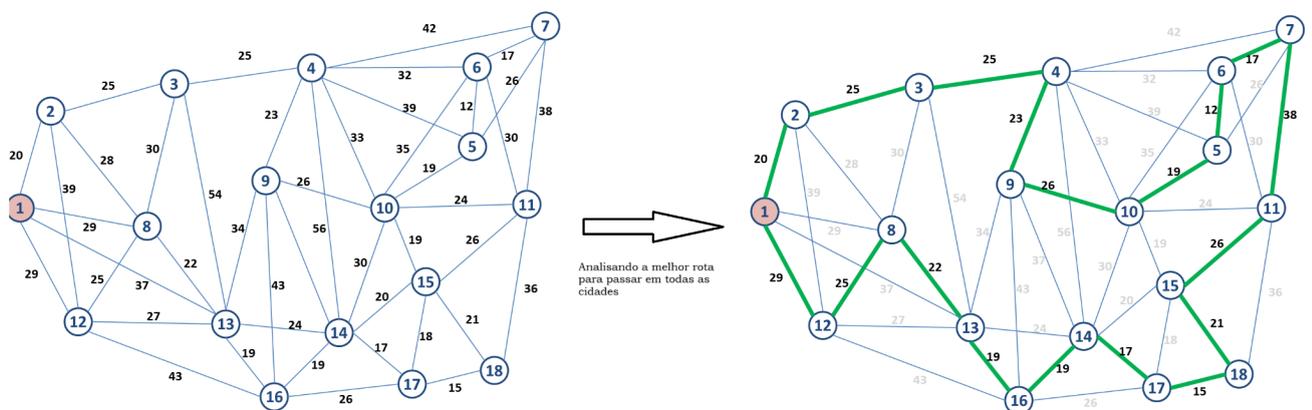


Figura 15: Análise problema caixeiro viajante

Fonte: Adaptado de Otimização na Prática(2015)

Na era moderna, onde a eficiência logística se tornou uma necessidade primordial para a competitividade de empresas, a aplicação do PCV para otimizar rotas de drones oferece uma solução promissora. Drones, com sua capacidade de evitar congestionamentos urbanos e acessar áreas de difícil alcance, representam uma inovação significativa no campo das entregas. No entanto, para que essa inovação seja eficaz, é essencial que as rotas desses drones sejam otimizadas, minimizando o tempo de entrega e os custos operacionais, ao mesmo tempo em que se maximiza a cobertura geográfica e a satisfação do cliente (DORLING et al., 2016). O estudo do PCV não é apenas uma questão teórica, mas possui aplicações práticas diretas. Por exemplo, a otimização das rotas dos drones pode reduzir significativamente o consumo de energia, prolongando a vida útil das baterias e aumentando a autonomia dos veículos. Isso é crucial, considerando as limitações atuais da tecnologia de baterias (CLARKE et al., 2015). Além disso, a redução do tempo de viagem não só melhora a eficiência do serviço de entrega, mas também pode diminuir a pegada de carbono das operações logísticas, contribuindo para práticas mais sustentáveis e ecologicamente responsáveis (GOODCHILD; TOY, 2018).

Para abordar o PCV, diversas técnicas e algoritmos foram desenvolvidos ao longo dos anos. Métodos exatos, como a programação linear inteira e a enumeração de todas as possíveis rotas, garantem encontrar a solução ótima, mas são computacionalmente inviáveis para grandes conjuntos de dados devido à explosão combinatória. Por outro lado, algoritmos heurísticos e metaheurísticos, como os algoritmos genéticos, a busca tabu e o método de colônia de formigas, oferecem soluções próximas da ótima em um tempo razoável, tornando-se mais adequados para aplicações práticas com drones. A relevância do PCV se estende além da logística urbana. Em cenários de resposta a desastres, onde a entrega rápida de suprimentos médicos é crítica, a otimização das rotas dos drones pode salvar vidas. Em áreas rurais, onde a infraestrutura rodoviária é limitada, drones podem fornecer acesso a bens essenciais de maneira eficiente. Assim, a aplicação de soluções baseadas no PCV pode revolucionar a forma como concebemos e executamos operações logísticas, tornando-as mais ágeis, econômicas e adaptáveis às necessidades emergentes da sociedade (DANTZIG et al., 1954; HOLLAND, 1992; GLOVER; LAGUNA, 1997; DORIGO; GAMBARDILLA, 1997; OCHOA et al., 2017; MATHEW et al., 2015).

4.3.1 Formulação matemática do PCV na logística de drones

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) encontra uma aplicação moderna e relevante na otimização das rotas de entrega por drones. Esta interação entre a teoria dos grafos e a logística de drones permite maximizar a eficiência e minimizar os custos operacionais em sistemas de entrega automatizados. No entanto, a implementação prática dessa teoria exige a consideração de diversos

fatores adicionais que influenciam diretamente as rotas dos drones (CLARKE et al., 2015; DORLING et al., 2016).

Os drones necessitam ser capazes de desviar de áreas com condições climáticas adversas, o que pode ser feito em tempo real utilizando dados meteorológicos atualizados e algoritmos de replanejamento dinâmico. O tráfego aéreo de outros drones e aeronaves pode ser monitorado por sistemas de controle de tráfego aéreo dedicados para drones, fornecendo informações em tempo real para evitar colisões e garantir segurança (OCHOA et al., 2017). Além disso, as áreas próximas a aeroportos têm regulamentações estritas para drones, exigindo que os sistemas de navegação sejam programados para evitar essas áreas ou, se necessário atravessá-las, fazê-lo em conformidade com as regulamentações locais. A logística de recarga é um fator crítico, demandando que pontos de recarga sejam estrategicamente posicionados e integrados nas rotas para garantir que os drones possam completar suas entregas sem interrupções (MATHEW et al., 2015).

O PCV tradicional foca em encontrar a menor rota para visitar um conjunto de pontos. No contexto das entregas por drones, é necessário adaptar a formulação para incluir variáveis como condições climáticas, tráfego aéreo de outros drones, proximidade de aeroportos, restrições de voo e pontos de recarga. De acordo com CLARKE et al. (2015), consideramos um conjunto de pontos de entrega $\{1, 2, \dots, n\}$ e um depósito central representado pelo ponto 0. A matriz de distâncias $D = [d_{ij}]$ indica a distância entre cada par de pontos i e j . A função a ser minimizada é:

$$\min \sum_{k=1}^m \left(\sum_{i=1}^{n-1} d_{\pi k(i)\pi k(i+1)} + d_{\pi k(n)\pi k(1)} \right)$$

No caso das entregas por drones, algumas restrições adicionais aumentam a complexidade da função:

- **Condições climáticas:** As condições climáticas variáveis podem afetar a rota dos drones, exigindo desvios. Podemos representar estas condições com uma matriz de penalidade $C = [C_{ij}]$ onde C_{ij} representa o custo adicional para viajar entre i e j sob condições adversas.
- **Tráfego aéreo e proximidade de aeroportos:** O tráfego aéreo de outros drones e a proximidade de aeroportos podem impor restrições adicionais. Isto pode ser modelado com zonas restritas $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_q\}$ onde cada Z_i representa uma zona com restrições de voo. Em casos específicos podemos utilizar as variáveis binária y_{ij} para indicar se a rota entre i e j passa por uma zona restrita, e um custo adicional p_{ij} é aplicado.
- **Capacidade e recarga de bateria:** Cada drone tem uma capacidade de bateria limitada e pode precisar recarregar durante a operação. Introduzimos pontos de recarga

$R = \{r_1, r_2, \dots, r_s\}$ que os drones podem visitar para recarregar. A variável b_k representa o nível de bateria do drone k e e_{ij} o consumo de energia para viajar de i a j .

- **Restrições de capacidade de carga:** A capacidade de carga dos drones limita o número e o peso dos pacotes que podem ser entregues em uma única rota. Esta é modelada pela variável w_i , que representa o peso da entrega no ponto i e W_k , a capacidade de carga do drone k .

Para lidar com essas restrições, a função responsável pelo cálculo do melhor caminho (CLARKE et al., 2015; DORLING et al., 2016; MATHEW et al., 2015; OCHOA et al., 2017) é adaptada para:

$$\min \sum_{k=1}^m \left(\sum_{i=1}^{n-1} \left(d_{\pi k(i)\pi k(i+1)} + c_{\pi k(i)\pi k(i+1)} + p_{\pi k(i)\pi k(i+1)} \right) + d_{\pi k(n)\pi k(1)} \right)$$

4.3.2 Algoritmos exatos para solução do PCV

Os algoritmos exatos, como a Programação Dinâmica, o Método do Corte de Planos e o Método Branch and Bound, são amplamente utilizados para resolver o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) de forma precisa. A Programação Dinâmica decompõe o problema em subproblemas menores e resolve cada um apenas uma vez, armazenando os resultados para evitar cálculos redundantes. Essa abordagem é eficaz para instâncias menores do problema, mas sua complexidade cresce exponencialmente com o aumento do número de pontos de entrega (BELLMAN, 1961).

O Método do Corte de Planos envolve a adição de restrições ao problema original para eliminar soluções inviáveis progressivamente até encontrar a solução ótima. Esse método utiliza uma série de operações iterativas que refinam o espaço de soluções possíveis, sendo muito poderoso, mas também computacionalmente intensivo (DANTZIG, FULKERSON e JOHNSON, 1954). Já o Método Branch and Bound explora sistematicamente todas as possíveis soluções do problema, dividindo-o em subproblemas mais simples e descartando aqueles que não podem superar a melhor solução encontrada até o momento. Este método combina a força bruta com técnicas de poda para reduzir o número de soluções a serem exploradas, tornando-o adequado para resolver instâncias de tamanho moderado do PCV (LAND e DOIG, 1960).

Esses métodos são frequentemente desafiados pelas variáveis específicas das rotas de drones, como consumo de energia, capacidade de carga e restrições de tempo. Além disso, a infraestrutura urbana e as condições ambientais variáveis aumentam a complexidade, exigindo adaptações contínuas nos algoritmos exatos para manter a eficiência nas entregas (DORLING et al., 2016). O avanço

contínuo na pesquisa desses algoritmos visa superar suas limitações por meio de melhorias computacionais e metodológicas. O desenvolvimento de técnicas de paralelização e otimização de *software*, bem como algoritmos específicos para arquiteturas de *hardware* avançadas, promete expandir as capacidades de resolução do PCV para aplicações práticas em rotas de drones (LAPORTE, 1992).

Essas adaptações são essenciais para lidar com os desafios únicos apresentados pelo uso de drones em ambientes urbanos, onde as rotas devem ser otimizadas não apenas para minimizar a distância, mas também para maximizar a eficiência energética e cumprir com as restrições operacionais. A contínua inovação e pesquisa na área de algoritmos exatos são fundamentais para garantir que essas tecnologias possam ser aplicadas de maneira eficaz e sustentável em cenários reais de logística urbana.

4.3.3 Algoritmos heurísticos e metaheurísticos para solução do PCV

O desafio de otimizar as rotas de entrega de drones é uma tarefa fascinante e complexa, que requer a utilização de diversas abordagens algorítmicas. Entre as principais técnicas empregadas estão os algoritmos heurísticos e metaheurísticos. Os algoritmos heurísticos, como o Algoritmo Guloso, são conhecidos por fornecerem soluções rápidas e práticas, ainda que nem sempre ideais (CORMEN et al., 2009). Por outro lado, os meta-heurísticos, como o Simulated Annealing, os Algoritmos Genéticos e o Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO), são mais avançados e têm a capacidade de explorar uma gama maior de possibilidades, equilibrando a busca por soluções ótimas com a adaptabilidade, resultando em rotas eficientes e flexíveis para os drones (DORIGO e STÜTZLE, 2004); (KIRKPATRICK et al., 1983); (HOLLAND, 1975).

Algoritmo guloso: O Algoritmo Guloso é uma abordagem direta e intuitiva, onde o drone seleciona o próximo ponto de entrega com base na menor distância a ser percorrida, até que todas as entregas sejam realizadas. Este método é caracterizado por sua rapidez e facilidade de implementação, tornando-o ideal para o planejamento inicial de rotas, especialmente em cenários de baixa complexidade. Apesar de sua simplicidade e eficiência em fornecer soluções rápidas, o Algoritmo Guloso pode não encontrar a rota mais eficiente em termos globais, sendo mais adequado para soluções imediatas e de baixa complexidade (CORMEN et al., 2012).

Simulated annealing: Inspirado no processo de resfriamento de metais, o *Simulated Annealing* é uma técnica que permite que o drone explore uma variedade de opções de rotas, aceitando ocasionalmente rotas menos eficientes com o objetivo de evitar mínimos locais e encontrar uma solução globalmente ótima. Este método é particularmente útil para lidar com mudanças e obstáculos imprevistos durante a entrega, promovendo a adaptabilidade e a resiliência do sistema. A capacidade

do Simulated Annealing de escapar de soluções subótimas e se ajustar a condições dinâmicas faz dele uma ferramenta poderosa na otimização de rotas (KIRKPATRICK et al., 1983).

Algoritmos genéticos: Os Algoritmos Genéticos simulam o processo de evolução natural, começando com diversas rotas possíveis e utilizando operações de cruzamento e mutação para gerar novas rotas. As melhores rotas são selecionadas para a próxima geração, promovendo continuamente a eficiência e a adaptabilidade. Este processo iterativo é essencial para encontrar soluções altamente eficientes e adaptáveis, especialmente em ambientes variáveis. A capacidade dos Algoritmos Genéticos de explorar um vasto espaço de soluções e de se adaptar rapidamente a novas condições faz deles uma escolha robusta para a otimização de rotas de drones (HOLLAND, 1975).

Algoritmo de colônia de formigas (ACO): O Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO) baseia-se no comportamento natural das formigas, onde drones "deixam feromônios" em rotas bem-sucedidas, guiando outros drones a seguir caminhos eficientes. Este método equilibra a exploração de novas rotas e a eficiência, adaptando-se continuamente às condições do ambiente. A capacidade do ACO de aprender e se adaptar ao longo do tempo faz dele uma ferramenta essencial para a criação de rotas equilibradas e eficientes. O ACO é particularmente eficaz em ambientes dinâmicos, onde a adaptabilidade e a eficiência são cruciais (DORIGO e STÜTZLE, 2004).

Com a integração dessas técnicas avançadas, a otimização de rotas de drones para entregas urbanas pode ser significativamente aprimorada, promovendo não apenas a eficiência operacional, mas também a adaptabilidade a condições variáveis, essencial para o sucesso em ambientes urbanos dinâmicos.

4.4 Importância do algoritmo colônia de formigas para o PCV e para a IA de análise de rotas por drones

O Algoritmo de Otimização por Colônia de Formigas (ACO) destaca-se como uma técnica eficaz para a solução de problemas complexos de otimização, como o Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Inspirado no comportamento natural das formigas em busca de alimento, o ACO utiliza a comunicação indireta através de feromônios para encontrar soluções otimizadas de maneira distribuída e colaborativa, conforme Figura 13. Na Inteligência Artificial (IA) para a análise de rotas de entrega por drones, o ACO tem um potencial significativo para melhorar a eficiência e a precisão na logística urbana (DORIGO; STÜTZLE, 2004).

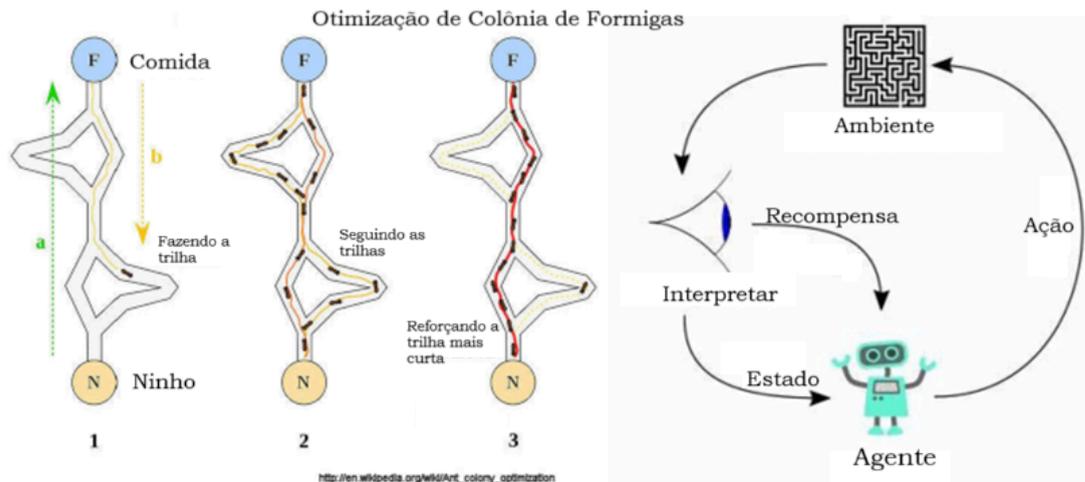


Figura 16: Interpretação ACO
 Fonte: Adaptado de Springer

A otimização de rotas de entrega por drones envolve determinar o percurso mais eficiente para múltiplos destinos, minimizando tempo e recursos. O ACO adapta-se bem a esse tipo de problema devido à sua capacidade de explorar múltiplas soluções de forma paralela e iterativa, ajustando-se dinamicamente às mudanças nas condições do ambiente. A utilização do ACO na IA para drones pode resultar em rotas mais curtas, consumo de energia reduzido e maior agilidade nas entregas, beneficiando empresas e consumidores (MOHAMMADI et al., 2020).

4.4.1 Inicialização do algoritmo colônia de formigas

A fase de inicialização do Algoritmo de Colônia de Formigas é crucial para o desempenho do sistema. Nesta etapa, definem-se o número de formigas que irão explorar o espaço de soluções, a quantidade inicial de feromônio depositado nas arestas do grafo, e os parâmetros de evaporação do feromônio. Estes elementos determinam a diversidade das soluções iniciais e a rapidez com que o algoritmo converge para uma solução ótima (DORIGO; MANIEZZO; COLORNI, 1996).

O número de formigas deve ser suficiente para explorar uma variedade significativa de caminhos possíveis, mas não tão elevados a ponto de comprometer a eficiência computacional. A quantidade inicial de feromônio é geralmente uniforme, mas pode ser ajustada para priorizar certas regiões do espaço de busca. A taxa de evaporação do feromônio (ρ) é um parâmetro crítico que controla o balanceamento entre exploração de novas soluções e exploração de soluções conhecidas (ZHOU; XIE; GAO, 2019).

4.4.2 Construção de soluções

Durante a fase de construção de soluções, cada formiga constrói uma rota percorrendo os vértices do grafo de acordo com uma probabilidade que depende da quantidade de feromônio nas arestas e da distância entre os vértices. A probabilidade de escolher uma aresta é dada pela fórmula:

$$p_{ij} = \frac{[t_{ij}]^\alpha [n_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in N} [t_{ik}]^\alpha [n_{ik}]^\beta}$$

Onde t_{ij} é a quantidade de feromônio na aresta (i, j) , n_{ij} é a visibilidade ou atratividade da aresta (geralmente o inverso da distância), e α e β são parâmetros que determinam a influência do feromônio e da atratividade, respectivamente (DORIGO; STÜTZLE, 2004).

Ao construir as rotas, as formigas evitam os vértices já visitados, assegurando que cada vértice seja incluído apenas uma vez na rota. Este processo permite que diferentes formigas explorem diversas combinações de caminhos, promovendo uma ampla exploração do espaço de soluções (DORIGO; STÜTZLE, 2004).

4.4.3 Atualização de feromônio

Após todas as formigas completarem suas rotas, o feromônio nas arestas é atualizado de acordo com a qualidade das soluções encontradas. As arestas que fazem parte das melhores rotas recebem uma quantidade maior de feromônio, reforçando-as para iterações futuras, enquanto o feromônio nas arestas menos utilizadas evapora (SOCHA; KNOWLES, 2007).

A atualização de feromônio é realizada pela fórmula:

$$t_{ij} = (1 - \rho)T_{ij} + \sum \Delta t_{ij}$$

Onde ρ é a taxa de evaporação do feromônio e Δt_{ij} é a quantidade de feromônio depositada pelas formigas que utilizam a aresta (i, j) . Esta atualização favorece a intensificação das melhores soluções encontradas, direcionando o algoritmo para regiões promissoras do espaço de busca (MOHAMMADI et al., 2020).

4.4.4 Iteração

O processo iterativo do ACO continua até que um critério de parada seja atingido, como um número máximo de iterações ou a convergência para uma solução estável. Durante cada iteração, o algoritmo alterna entre a construção de novas soluções e a atualização do feromônio, refinando progressivamente as rotas encontradas. Este ciclo de exploração e exploração permite que o ACO se ajuste dinamicamente às mudanças no ambiente, descobrindo soluções cada vez mais eficientes. Na aplicação de rotas de entrega por drones, essa capacidade adaptativa é essencial para lidar com

variáveis como tráfego aéreo, condições meteorológicas e restrições logísticas (DORIGO; STÜTZLE, 2004).

4.5 Aplicação de algoritmos genéticos ao problema do caixeiro viajante (PCV) para análise de rotas de drones com IA

Os algoritmos genéticos (AG) são uma técnica poderosa e eficaz inspirada nos princípios da evolução natural. Utilizados para resolver problemas complexos de otimização, como o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), os AGs se destacam pela capacidade de encontrar soluções próximas do ótimo em um espaço de busca extenso e com muitas variáveis. No contexto da logística de entregas urbanas por drones, a aplicação de AGs é de suma importância para traçar as melhores rotas, garantindo eficiência e segurança nas operações (RUSSELL; NORVIG, 2021).

O PCV é um problema clássico de otimização combinatória onde o objetivo é determinar a menor rota possível que permite a um caixeiro viajante visitar um conjunto de cidades e retornar ao ponto de partida. Quando aplicado à análise de rotas de drones, o PCV ajuda a minimizar as distâncias percorridas, economizando tempo e recursos energéticos, o que é crucial para drones com limitações de autonomia. Segundo LAWLER et al. (1985), este problema é fundamental na otimização de rotas devido à sua capacidade de reduzir significativamente os custos operacionais e melhorar a eficiência logística.

4.5.1 Inicialização

A fase de inicialização em um algoritmo genético envolve a criação de uma população inicial de soluções possíveis, ou "indivíduos". No caso do PCV aplicado à entrega de drones, cada indivíduo representa uma rota possível que o drone pode seguir para realizar todas as entregas.

Primeiramente, gera-se um conjunto de rotas de maneira aleatória. Cada rota é uma sequência de pontos de entrega que o drone deve visitar. Este passo inicial é crucial, pois a diversidade das rotas garante que o algoritmo explore diferentes partes do espaço de busca, evitando a convergência prematura para soluções subótimas. A representação das rotas é feita através de uma sequência de identificadores dos pontos de entrega, facilitando sua manipulação nos processos subsequentes de cruzamento e mutação (Goldberg, 1989).

4.5.2 Avaliação

Após a criação da população inicial, avalia-se a aptidão de cada indivíduo, ou seja, a qualidade da solução que cada rota oferece. No contexto dos drones, a aptidão é calculada com base na distância total percorrida pelo drone.

Calcula-se a distância total percorrida somando as distâncias entre os pontos na sequência da rota. Rotas mais curtas recebem melhores avaliações, incentivando a otimização das rotas de entrega. Além da distância, outros fatores podem ser considerados, como o tempo de voo, o consumo de bateria e a segurança da rota. Implementa-se uma função de avaliação que calcule a distância total e atribua uma pontuação de aptidão a cada rota, permitindo a rápida e precisa avaliação das rotas (Holland, 1975).

4.5.3 Seleção

A seleção é o processo pelo qual indivíduos com maior aptidão são escolhidos para reproduzir e gerar a próxima geração. Este passo é crucial para assegurar que as melhores características das rotas sejam preservadas e aprimoradas. Utiliza-se métodos como a roleta, torneio ou seleção por ranking para escolher as melhores rotas. A roleta atribui probabilidades proporcionais à aptidão, enquanto o torneio seleciona os melhores indivíduos de subgrupos aleatórios. Ajusta-se a pressão seletiva para balancear a exploração e a exploração, garantindo que não ocorra perda de diversidade prematuramente. Define-se quantos indivíduos serão selecionados para a reprodução, com base nas suas avaliações de aptidão, assegurando que as melhores soluções sejam propagadas enquanto se mantém a diversidade genética (De Jong, 1975).

4.5.4 Cruzamento

No cruzamento, pares de rotas selecionadas são combinados para gerar novas soluções. Este passo é inspirado pela recombinação genética e permite que novas rotas sejam formadas, potencialmente combinando as melhores partes das rotas dos pais. Utiliza-se operadores como o cruzamento de um ponto, de dois pontos ou cruzamento de ordem (OX). Define-se uma taxa de cruzamento que determina com que frequência o cruzamento ocorrerá, ajustando-se para otimizar a performance. Assegura-se que as rotas resultantes são válidas, mantendo todos os pontos de entrega e evitando duplicações. Operadores específicos garantem que as rotas geradas sejam viáveis e eficientes (Michalewicz, 1996).

4.5.5 Mutação

A mutação introduz variações nas rotas ao aplicar pequenas modificações aleatórias. Este processo é vital para manter a diversidade genética na população e prevenir a convergência prematura para soluções subótimas. Define-se uma taxa de mutação que determine a frequência com que a mutação ocorrerá, ajustando-se conforme a necessidade para manter a diversidade sem comprometer a aptidão geral. Utiliza-se mutações como a troca de duas posições na rota, inversão de uma subsequência ou inserção de um ponto em uma nova posição. Cada tipo de mutação oferece diferentes benefícios em termos de exploração do espaço de soluções. A mutação deve ser balanceada para evitar a introdução de soluções ruins e promover a descoberta de novas áreas promissoras no espaço de busca (Holland, 1975) .

4.5.6 Iteração

A fase de iteração envolve a repetição dos processos de avaliação, seleção, cruzamento e mutação por um número definido de gerações ou até que um critério de parada seja atingido. Este ciclo contínuo permite que a população evolua e melhore ao longo do tempo. Define-se um número máximo de gerações para a execução do algoritmo, garantindo tempo suficiente para convergir para uma solução próxima do ótimo, sem exagerar no tempo de computação. Estabelecem-se critérios de parada adicionais, como uma melhora mínima na aptidão entre gerações ou um tempo de execução máximo, garantindo que o algoritmo não continue indefinidamente sem ganhos significativos. Monitora-se o desempenho do algoritmo e ajustam-se parâmetros conforme necessário para otimizar os resultados, garantindo a evolução contínua e eficiente das soluções (Goldberg, 1989) .

A aplicação de algoritmos genéticos para resolver o PCV no contexto de rotas de entrega por drones representa uma abordagem robusta e eficiente. Ao imitar processos evolutivos naturais, os AGs conseguem explorar vastos espaços de soluções, encontrando rotas quase ótimas em um tempo viável. Este método não apenas melhora a eficiência operacional dos drones, mas também contribui significativamente para a sustentabilidade e a inovação na logística urbana (Mitchell, 1998) .

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa realizou uma revisão bibliográfica visando um futuro desenvolvimento de sistemas avançados para drones, potencialmente integrando tecnologias de ponta como a Internet das Coisas (IoT) e a Inteligência Artificial (IA) para promover inovação e eficiência na logística de entregas urbanas. Ao longo do estudo, ficou evidente que o uso de drones pode proporcionar benefícios significativos, incluindo a redução do tempo de entrega, a diminuição dos custos operacionais e a minimização do impacto ambiental. A revisão teórica sobre a integração da rede IoT indicou que essa abordagem pode possibilitar o monitoramento em tempo real das operações, assegurando maior precisão e segurança nas entregas. Teoricamente, drones equipados com sensores e dispositivos de comunicação seriam capazes de coletar e transmitir dados continuamente, fornecendo informações fundamentais para a tomada de decisões informadas.

Os algoritmos de IA discutidos na literatura, especialmente os modelos heurísticos e metaheurísticos, mostraram-se promissores para a otimização das rotas de entrega. Destacam-se algoritmos como o Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO) e os Algoritmos Genéticos (GA), reconhecidos por sua capacidade de adaptação às variáveis dinâmicas do ambiente urbano, oferecendo um potencial significativo para rotas mais eficientes e seguras. A aplicação prática desses algoritmos no contexto da logística urbana, conforme abordado nas fontes consultadas, sugere uma melhoria considerável na eficiência das operações de entrega.

5.1 Contribuições para o campo de estudo

Esta pesquisa trouxe contribuições importantes para o campo da logística urbana, oferecendo uma abordagem integrada que combina IoT e IA para solucionar desafios complexos. As principais contribuições incluem:

- **Desenvolvimento de uma arquitetura IoT para entregas com drones:** A pesquisa detalhou, por meio de uma revisão bibliográfica, uma arquitetura robusta de rede IoT, destacando a importância da integração de componentes como sensores, dispositivos de comunicação e servidores de dados. Essa abordagem teórica propôs uma base sólida para operações de entrega mais seguras e eficientes, sugerindo que a implementação de tais tecnologias poderia melhorar o monitoramento em tempo real, a precisão das entregas e a segurança operacional.
- **Aplicação de algoritmos de IA na otimização de rotas:** A pesquisa indicou que a utilização de modelos heurísticos e metaheurísticos, como o Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO) e os Algoritmos Genéticos (GA), pode ser uma solução viável para o

Problema do Caixeiro Viajante (PCV) no contexto das rotas de drones. Segundo a literatura revisada, esses algoritmos têm o potencial de criar rotas otimizadas, considerando fatores críticos como consumo de energia, condições climáticas e tráfego aéreo. A aplicação teórica desses modelos sugere que eles podem contribuir significativamente para a eficiência e segurança das operações de entrega por drones.

- **Análise de protocolos de comunicação:** A pesquisa também explorou diversos protocolos de comunicação, como AMQP, DDS, CoAP e Modbus, avaliando suas vantagens e limitações teóricas na aplicação prática para drones. Esta revisão contribuiu para a identificação de protocolos mais adequados para a transmissão eficiente e segura de dados entre drones e servidores, proporcionando uma base informada para futuras implementações e garantindo uma comunicação robusta e confiável nas operações de entrega.

5.2 Perspectivas futuras

Apesar dos avanços teóricos identificados, a pesquisa também destacou áreas que necessitam de desenvolvimento adicional. Algumas das perspectivas futuras incluem:

- **Melhoria da autonomia dos drones:** O desenvolvimento de baterias mais eficientes e a implementação estratégica de estações de recarga são essenciais para aumentar a autonomia dos drones, permitindo operações de entrega em áreas mais amplas.
- **Avanços em tecnologias de IA:** É fundamental continuar aprimorando os algoritmos de IA para lidar com variáveis mais complexas e dinâmicas, como mudanças súbitas nas condições climáticas e variações no tráfego aéreo, a fim de garantir a segurança e eficiência das operações.
- **Regulamentação e segurança:** A criação de regulamentações mais claras e específicas para o uso de drones em entregas urbanas é crucial para garantir a segurança pública e a privacidade. A colaboração entre autoridades reguladoras, empresas de tecnologia e outros stakeholders será essencial para desenvolver um marco regulatório que permita a expansão segura e responsável do uso de drones.
- **Integração com outras tecnologias:** A integração de drones com outras tecnologias emergentes, como veículos autônomos terrestres e sistemas avançados de gestão de tráfego, pode proporcionar uma solução mais holística para os desafios logísticos urbanos.

5.3 Propostas para futuros trabalhos

Para aprofundar as conclusões obtidas nesta revisão bibliográfica, propõem-se duas linhas de trabalho futuras: uma focada na implementação de uma rede integrada de IA e IoT, e outra no desenvolvimento de drones acessíveis. A implementação de uma rede de IA e IoT visa possibilitar uma comunicação mais eficiente entre drones e servidores, facilitando a análise de dados em tempo real e a tomada de decisões rápidas e precisas. Isso pode resultar em maior precisão, eficiência operacional e segurança nas operações de entrega.

Por outro lado, o desenvolvimento de drones acessíveis busca tornar essa tecnologia disponível para um maior número de empresas e aplicações, reduzindo os custos de produção e operação sem comprometer a qualidade e eficiência das entregas. Essas iniciativas têm o potencial de democratizar o uso de drones na logística urbana, promovendo inovação e eficiência em larga escala e transformando significativamente a forma como as entregas são realizadas nas cidades.

REFERÊNCIAS

ABDELMABOUD, Abdelzahir. The Internet of Drones: Requirements, Taxonomy, Recent Advances, and Challenges of Research Trends. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/17/5718>. Acesso em: 16 abr. 2024.

ALDAEJ, Abdulaziz; AHANGER, Tariq Ahamed; ATTIQUZZAMAN, Mohammed; ULLAH, Imdad; YOUSUFUDIN, Muhammad. Smart Cybersecurity Framework for IoT-Empowered Drones: Machine Learning Perspective. *Sensors*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s22072630>. Acesso em: 20 abr. 2024.

ALLIED MARKET RESEARCH. The Evolution of the Drone Package Delivery Industry: Revolutionizing Logistics. Disponível em: <https://blog.alliedmarketresearch.com/the-evolution-of-the-drone-package-delivery-industry-revolutionizing-logistics-1351>. Acesso em: 26 out. 2023.

AMAZON. Amazon releases updates on drone delivery, robots, and packaging. Disponível em: <https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-releases-updates-on-drone-delivery-robots-and-packaging>. Acesso em: 28 out. 2023.

AMAZON. How Amazon is building its drone delivery system. Disponível em: <https://www.aboutamazon.com/news/transportation/how-amazon-is-building-its-drone-delivery-system>. Acesso em: 26 out. 2023.

BARNHART, R. K.; SHARMA, S.; HOBI, J. Introduction to Unmanned Aircraft Systems. 2. ed. CRC Press, 2016. Disponível em: <https://www.routledge.com/Introduction-to-Unmanned-Aircraft-Systems-Second-Edition/Barnhart-Sharma-Hobi/p/book/9781498727551>. Acesso em: 17 out. 2023.

BLICKFELD. Drone with LiDAR: Real-time 3D mapping and inspection. Blickfeld, 2023. Disponível em: <https://www.blickfeld.com/drone-with-lidar/>. Acesso em: 24 abr. 2024.

CHIANG, W.-C.; LI, Y.; SHANG, J.; URBAN, T. L. Impact of Drone Delivery on Sustainability and Cost: Realizing the UAV Potential. *Applied Energy*, v. 254, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919305252>. Acesso em: 17 out. 2023.

CIRANI, Simone; FERRARI, Gianluigi; PICONE, Marco; VELTRI, Luca. Internet of Things: Architectures, Protocols and Standards. 1. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2019.

COTA, D. P.; CORREA, E. S.; SOUZA, M. J. F. Um Algoritmo Híbrido para o Problema de Roteamento de Caminhões e Drones com Janelas de Tempo. In: XLIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2022). Disponível em: <https://proceedings.science/sbpo/sbpo-2022/trabalhos/um-algoritmo-hibrido-para-o-problema-de-rota-mento-de-caminhoes-e-drones-com-jan?lang=pt-br>. Acesso em: 05 mai. 2024.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). Portaria nº 929/DNOR 8, de 15 de maio de 2023. Aprova a edição do MCA 56-5, manual que trata das "Aeronaves não tripuladas para uso exclusivo em operações aéreas especiais". Publicado no Boletim de Comunicações Administrativas (BCA) nº 103 de 06 de junho de 2023. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/>. Acesso em:

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). Regulamentação do uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). Disponível em: https://www.decea.mil.br/?i=midia-e-informacao&p=pg_noticia&materia=decea-publica-concepcao-o-peracional-utm-nacional. Acesso em: 31 out. 2023.

DJI. Warehouse Drones: Helping Manage Inventory Checks and Optimize Logistics. Enterprise Insights, 2021. Disponível em: <https://enterprise-insights.dji.com/blog/warehouse-drones-help-manage-inventory-checks-and-optimiz-e-logistics>. Acesso em: 11 abr. 2024.

DORIGO, Marco; STÜTZLE, Thomas. Ant Colony Optimization. Cambridge, MA: MIT Press, 2004. 319 p. ISBN 0-262-04219-3.

DORIGO, Marco; STÜTZLE, Thomas. Ant Colony Optimization. Cambridge: MIT Press, 2004. 305 p. ISBN 0-262-04219-3. Disponível em: <https://mitpress.mit.edu/books/ant-colony-optimization>. Acesso em: 23 mai. 2024.

EASA - European Union Aviation Safety Agency. Drones & Air Mobility. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas>. Acesso em: 09 nov. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. Unmanned aircraft (drones). Disponível em: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/aviation-safety/unmanned-aircraft-drones_en. Acesso em: 10 nov. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. "New EU rules on dedicated airspace for drones enter into force". Disponível em: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/aviation-safety/unmanned-aircraft-drones_en. Acesso em: 09 nov.2023.

EUROPEAN COMMISSION. "Drones: Commission adopts new rules and conditions for safe, secure and green drone operations". Disponível em: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/aviation-safety/unmanned-aircraft-drones_en. Acesso em: 09 nov. 2023.

Federal Aviation Administration (FAA, 2023). Unmanned Aircraft Systems (UAS). Disponível em: <https://www.faa.gov/uas>. Acesso em: 03 nov. 2023.

Federal Communications Commission (FCC, 2023). Unmanned Aircraft Systems (UAS). Disponível em: <https://www.fcc.gov/uas>. Acesso em: 03 nov. 2023.

FLOREANO, D.; WOOD, R. J. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, v. 521, p. 460-466, 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature14542>. Acesso em: 20 out. 2023.

FLYTREX. Flytrex obtains FAA Part 135 certification, paving the way for nationwide drone delivery expansion. Restaurant Dive. Disponível em: <https://www.restaurantdive.com/news/flytrex-135-certification-drone-delivery-nationwide-expansion/641594/>. Acesso em: 05 nov. 2023.

FREIGHTWAVES. DHL to pilot use of large cargo drones in Europe. Disponível em: <https://www.freightwaves.com/news/dhl-to-swarm-europe-with-4000-cargo-drones>. Acesso em: 28 out. 2023.

FRENCH, Sally. 2021 drone tech: why LiDAR is one of the hottest technologies this year. *The Drone Girl*, 2021. Disponível em: <https://www.thedronegirl.com/2021/03/08/2021-drone-tech-lidar/>. Acesso em: 24 abr. 2024.

GOODCHILD, M. F.; TOY, E. Urban delivery with autonomous vehicles and drones: What could possibly go wrong? *Journal of Urban Technology*, v. 25, n. 1, p. 27-37, 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10630732.2018.1428261>. Acesso em: 20 out. 2023.

GUPTA, Divya. Solving TSP Using Various Meta-Heuristic Algorithms. 2013. DOI: 10.3991/ijes.v1i2.3233. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3991/ijes.v1i2.3233>. Acesso em: 18 mai. 2024.

GUIZZO, A.L.; ENGELMANN, C.P.; ZANETTE, J.G.; SIMÕES, P.W.T.A.; SILVA, G.V.; SCARPATO, C.V. Utilização do Algoritmo de Dijkstra para Cálculo de Rotas no Trabalho Público do Município de Criciúma/SC. 2022. Disponível em: <http://proceedings.sbmac.org.br/sbmac>. Acesso em: 10 mai. 2024.

GUTIERREZ, Jose M.; JENSEN, Michael; RIAZ, Tahir. Applied Graph Theory to Real Smart City Logistic Problems. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916324632?via%3Dihub>. Acesso em: 05 mai. 2024.

INFRAOPS. Modbus RTU vs Modbus TCP – The Differences from an IT Perspective. InfraOps, 2024. Disponível em: <https://www.infraops.com/modbus-rtu-vs-modbus-tcp-the-differences-from-an-it-perspective?lang=en>. Acesso em: 26 abr. 2024.

JOHNSON, R. Amazon wins FAA approval for Prime Air drone delivery fleet. Forbes. Disponível em: <https://forbes.ge/news/amazon-wins-faa-approval-for-prime-air-drone-delivery-fleet>. Acesso em: 03 nov. 2023.

KAMAL, Raj. Internet of Things (IoT). 1. ed. Nova Deli: McGraw Hill Education, 2017. Disponível em: <https://pg.its.edu.in/sites/default/files/KCA043%20Internet%20of%20things%20-IoT%20by%20Raj%20Kamal%20Text%20Book.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2024.

KRČO, Srdjan; POKRIĆ, Boris; CARREZ, Francois. Designing IoT Architecture(s): A European Perspective. 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6803124>. Acesso em: 17 abr. 2024.

LAGKAS, Thomas; ARGYRIOU, Vasileios; BIBI, Stamatia; SARIGIANNIDIS, Panagiotis. UAV IoT Framework Views and Challenges: Towards Protecting Drones as “Things”. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/4015>. Acesso em: 20 abr. 2024.

LEE, Thomas; MCKEEVER, Susan; COURTNEY, Jane. Flying Free: A Research Overview of Deep Learning in Drone Navigation Autonomy. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-446X/5/2/52>. Acesso em: 03 mai. 2024.

MATAI, Rajesh; SINGH, Surya Prakash; MITTAL, Murari Lal. Traveling Salesman Problem: An Overview of Applications, Formulations, and Solution Approaches. 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/221909777_Traveling_Salesman_Problem_an_Overview_of_Applications_Formulations_and_Solution_Approaches. Acesso em: 14 mai. 2024.

MICROSOFT. Visão geral do AMQP 1.0 no Barramento de Serviço do Azure. Microsoft Learn, 24 out. 2023. Disponível em: <https://learn.microsoft.com/pt-br/azure/service-bus-messaging/service-bus-amqp-overview>. Acesso em: 24 abr. 2024.

MU, Kanchana; KAVITHA, Kavitha. A review on transportation and smart logistics using graph theoretical approach. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343758693_A_REVIEW_ON_TRANSPORTATION_AND_SMART_LOGISTICS_USING_GRAPH_THEORETICAL_APPROACH. Acesso em: 03 mai. 2024.

NATIONAL INSTRUMENTS. The Modbus Protocol in Depth. NI, 2024. Disponível em: <https://www.ni.com/en/shop/seamlessly-connect-to-third-party-devices-and-supervisory-system/the-modbus-protocol-in-depth.html>. Acesso em: 27 abr. 2024.

OLIVEIRA, Ruy Flávio de. Inteligência Artificial. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018. 224 p. ISBN 978-85-522-1141-9.

OMG. Data Distribution Service (DDS) v1.4 Specification. Object Management Group, 1 abr. 2015. Disponível em: <https://www.omg.org/spec/DDS/1.4/PDF>. Acesso em: 24 abr. 2024.

OMNIA HEALTH INSIGHTS. Rise of drone delivery service for medical supplies in Africa. Disponível em: <https://insights.omnia-health.com/management/rise-drone-delivery-service-medical-supplies-africa>. Acesso em: 31 out. 2023.

RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4. ed. Hoboken: Pearson, 2021. 1132 p. ISBN 978-0-13-461099-3.

RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter. Inteligência Artificial. Tradução de Regina Célia Simille. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 1132 p. ISBN 978-85-352-3701-6. Tradução de: Artificial Intelligence: A Modern Approach, 3rd ed.

SAIAS, José; MAIA, Miguel; RATO, Luis; GONÇALVES, Teresa. Machine Learning: um estudo sobre conceitos, tarefas e algoritmos relacionados com predição e recomendação. 2018. Disponível em: https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/30174/1/apra_techReport_paper01_2018-11_v02.pdf. Acesso em: 10 mai. 2024.

SETHI, Pallavi; SARANGI, Smruti R. Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. Journal of Electrical and Computer Engineering, v. 2017, 25 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312957467_Internet_of_Things_Architectures_Protocols_and_Applications. Acesso em: 20 abr. 2024.

SILVA, Anderson da; LUDERMIR, Teresa Bernarda. Otimização de Redes Neurais através de Algoritmos Genéticos Celulares. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2107.08326>. Acesso em: 05 mai. 2024.

SILVA, Luiz Augusto Gomes da; LIMA, Mariana. Algoritmos Genéticos Aplicado ao Problema de Roteamento de Veículos. 2018. Disponível em: <https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/1808.10866>. Acesso em: 05 mai. 2024.

SILICON CANALS. Maak kennis met Black Swan: de lading drones te gebruiken door DHL voor spoedleveringen. Disponível em: <https://siliconcanals.com/nl/nieuws/dronamics-werkt-samen-met-dhl/>. Acesso em: 28 Out. 2023

sUAS NEWS. DHL to use large cargo drones for urgent deliveries. 2021. Disponível em: <https://www.suasnews.com/2021/07/dhl-to-use-large-cargo-drones-for-urgent-deliveries/>. Acesso em: 28 out. 2023.

THAWANI, Pragati Vishal. Understanding Architecture of Internet of Things. ResearchGate, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362490707_Understanding_Architecture_of_Internet_of_Things. Acesso em: 20 abr. 2024.

TREIBLMAIER, Horst et al. Drones for Supply Chain Management and Logistics: A Review and Research Agenda. ResearchGate, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Horst-Treiblmaier/publication/354832698_Drones_for_supply_chain_management_and_logistics_a_review_and_research_agenda/links/646d9694cde97a39292b8116/Drones-for-supply-chain-management-and-logistics-a-review-and-research-agenda.pdf. Acesso em: 11 abr. 2024.

TREIBLMAIER, Horst et al. Drones in Warehouse Operations: A Review and Research Agenda. ETH Zurich, 2019. Disponível em: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/pom-dam/documents/Drones%20in%20warehouse%20operations_POM%20whitepaper%202019_Final.pdf. Acesso em: 11 abr. 2024.

UNMANNED AIRSPACE. Special report – Brazil’s DECEA to integrate drone management within its ATM system. Disponível em: <https://www.unmannedairspace.info/uncategorized/special-report-brazils-decea-integrate-drone-management-within-atm-system/>. Acesso em: 31 out. 2023.

WANG, Z.; SHEU, J.-B. Vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 122, p. 350-364, 2019. Disponível em: <https://econpapers.repec.org/RePEc:eee:transb:v:122:y:2019:i:c:p:350-364>. Acesso em: 03 mai. 2024.

WANG, Z.; SHEU, J.-B. Vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 122, p. 350-364, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Zheng-Wang-78/publication/332124301_Vehicle_routing_problem_with_drones/links/5f572e3892851c250b9cff13/Vehicle-routing-problem-with-drones.pdf. Acesso em: 03 mai. 2024.

WILSON, Robin J. *Introduction to Graph Theory*. 4. ed. Essex: Addison Wesley Longman Limited, 1996. 173 p. ISBN 0-582-24993-7.

ZIPLINE. Zipline drone delivery service expands. *MIT Technology Review*, 2023. Disponível em: <https://www.technologyreview.com/2023/05/23/zipline-drone-delivery-service-expands/>. Acesso em: 23 out. 2023.

ZUDIO, Anderson; COELHO, Igor Machado; OCHI, Luiz Satoru. Algoritmo VNS para o Problema de Roteamento Híbrido com Veículo-Drone para Serviço de Entrega e Coleta. 2021. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/wbci/article/download/20447/20275/>. Acesso em: 23 mai. 2024.