

# Algoritmos para o Sequenciamento de Pousos e Decolagens de Drones em Centros de Distribuição

*Lucas de Paula Soares      Luiz Fernando Bittencourt  
Fabiola Martins Campos de Oliveira*

Relatório Técnico - IC-PFG-23-22  
Projeto Final de Graduação  
2023 - Dezembro

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO

The contents of this report are the sole responsibility of the authors.  
O conteúdo deste relatório é de única responsabilidade dos autores.

# Algoritmos para o Sequenciamento de Pousos e Decolagens de Drones em Centros de Distribuição

Lucas de Paula Soares      Luiz Fernando Bittencourt  
Fabiola Martins Campos de Oliveira

## Resumo

Serviços de entrega por drone têm ganhado atenção dos meios acadêmicos, do governo e da indústria, associando-se a uma logística verde e sustentável. Estudos existentes concentram-se principalmente em questões específicas de estratégias anti-colisão em cenários com número limitado de drones, negligenciando o gerenciamento do pouso e decolagem em grandes centros de distribuição, onde há uma grande densidade de drones. Este projeto classifica e aprimora o Drone Edge Management System (DREMS), que lida com a sequência de pousos e decolagens em áreas de alta densidade. Os resultados destacam a necessidade de uma estratégia de sequenciamento nos centros de distribuição para otimizar a entrega em cenários de alta densidade de drones. Foram desenvolvidas e aplicadas com sucesso novas estratégias que elevam as taxas reais de pousos e decolagens, sem acarretar em um aumento no número total de colisões.

## 1 Introdução

O uso de Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), ou drones, têm ganhado popularidade nos últimos anos por conta de sua ampla variedade de aplicações, seja na indústria, em pesquisas ou até mesmo como um hobby. Devido a versatilidade do voo de drones, eles podem ser usados em missões das mais diversas áreas, incluindo fiscalização de infraestruturas, agricultura de precisão, operações de busca e salvamento, estações de base de comunicação, e também em sistemas de entrega de pacotes. [1]

A mobilidade aérea urbana (UAM) refere-se à utilização de aeronaves, como drones, helicópteros ou aeronaves de decolagem e pouso vertical (VTOL), para transporte de pessoas e bens dentro de áreas urbanas ou metropolitanas. Essa ideia de mobilidade teve início na década de 50 com voos agendados de helicóptero nas cidades de Los Angeles, Nova Iorque e São Francisco (Califórnia) e até então não tinha ganhado tanto interesse até o reaparecimento de serviços sob demanda a partir de 2010, principalmente o cenário de entregas por drones começou a ser mais abordado depois da pandemia de COVID-19 do ano de 2020 [2]

O paradigma de entregas por drones está relacionado a uma logística verde e sustentável, associando-se ao descongestionamento de tráfego, redução de emissões em comparação com veículos terrestres movidos a combustíveis fósseis e também associando-se a rapidez e eficiência [3]. Empresas, como Google, Amazon e Alibaba estão colocando esforços no problema da “última milha”, que se refere ao desafio logístico de transportar mercadorias do

último centro de distribuição para o destino final, que geralmente é a residência do cliente. Após um estudo aprofundado do mercado conduzido por Aurambout et al. [4], constatou-se que 7% da população da União Europeia se beneficiaria com a entrega da última milha feita por drone, e considerando algumas melhorias tecnológicas esse número poderia chegar a 30%.

Este tipo de serviço inovador já vem ocorrendo em menores proporções e em projetos-piloto. No Brasil, a foodtech Ifood conseguiu autorização concedida pela Anac (Agência Nacional de Aviação Civil) que permite entregar cargas de até 2,5 kg e percorrer rotas de até 3 km [5]. Nos Estados Unidos, na região metropolitana de Dallas-Fort Worth, Walmart fez uma parceria com uma empresa de drones e já consegue entregar em quintais de casas cadastradas na plataforma [6].

O principal desafio desse tipo de serviço é garantir operações seguras para pessoas e mercadorias, enquanto mantém a eficiência. O advento da Internet das Coisas (IoT), das comunicações móveis [7] e a computação em borda e névoa [1], podem contribuir consideravelmente para o desenvolvimento de futuras estratégias de controle do tráfego de drones que proporcionem uma gestão de voo segura e eficiente.

A maioria dos estudos nessa área estão focados em estratégias anti-colisão e em gerenciamento do tráfego aéreo para uma pequena quantidade de drones, por volta de 20 drones [8] [9]. Para a utilização em um contexto sob-demanda em uma cidade é preciso levar em consideração uma maior quantidade de drones e um gerenciamento mais eficiente. Um importante problema que ainda não foi dada a devida atenção foi o gerenciamento de pouso e decolagem em centros de distribuição, visto que essas áreas naturalmente atraem uma grande densidade de tráfego ao redor. O trabalho [10] aborda uma arquitetura em computação em borda para tratar o sequenciamento de pousos e decolagens em um cenário de alta densidade, chamado de DREMS (Drone Edge Management System). Esse sistema, implementado com base no simulador de drones UTSim [11], lida com uma taxa de até 8 drones/min, mas ainda carece de uma classificação sobre o compartilhamento de dronepads e sobre o controle de sequenciamento, e inclui apenas um algoritmo de sequenciamento.

Dado este cenário de alta densidade de drones, este projeto busca criar uma classificação para o DREMS e estender dentro dessa classificação novos algoritmos de sequenciamento. O principal objetivo é diminuir a quantidade de colisões em pouso e decolagem em centros de distribuição enquanto garante uma margem de eficiência dada pela taxa de pouso e decolagem. Assim, este projeto pode servir como baseline para futuros métodos de organização do espaço aéreo ao redor de um centro de distribuição, além de sistematizar um caminho para a organização de tais métodos.

Este projeto está organizado da seguinte maneira: a seção 2 apresenta os trabalhos relacionados de algoritmos anti-colisão de drones e de sequenciamentos já existentes; a seção 3 explica a visão geral do DREMS, a classificação proposta e as novas abordagens implementadas; a seção 4 detalha o simulador, o cenário utilizado e como os dados foram tratados; a seção 5 apresenta e discute os resultados; e por fim a 6, que menciona o panorama geral de todos os resultados e comenta sobre trabalhos futuros.

## 2 Referencial teórico

### 2.1 Cenário de entrega por drones e algoritmo anti-colisão

Em grandes cidades, um sistema de entrega dessa natureza demandará um grande número de drones, resultando em uma concentração considerável desses veículos aéreos e apresentando o desafio principal de evitar colisões entre eles ou com obstáculos comuns [12]. Nesse sentido, o trabalho [12] propõe três abordagens anti-colisão geométricas e autônomas em um cenário em que várias empresas realizam entregas utilizando drones. Os drones saem de um droneponto em um centro de distribuição, realizam a entrega e voltam ao droneponto inicial, como indicado na figura 1.

Um dos algoritmos desenvolvidos em [12] chamado de SingleDrone, atingiu a menor taxa de colisões na etapa de voo em cruzeiro e o menor tempo de viagem. Tal algoritmo considera um raio de detecção e um raio de segurança para os drones. O raio de detecção é a distância máxima a que um drone pode detectar um obstáculo através dos seus sensores, e o raio de segurança é a distância mínima que um drone deve manter de um obstáculo para garantir a segurança. Com base no vetor velocidade relativa do drone relativamente ao primeiro obstáculo detectado que poderia causar uma colisão, o algoritmo determina se é possível efetuar um desvio horizontal, virando no ângulo mais pequeno possível para que o drone não entre no raio de segurança. Se tal situação não for possível, o drone desvia-se verticalmente. Durante o desvio, o drone reduz a sua velocidade para metade. O algoritmo também inclui um desvio de emergência quando um obstáculo invade o raio de segurança, fazendo com que o drone pare e voe na direção oposta. Após o desvio, o drone continua a sua viagem para o destino original à velocidade original.

As simulações no artigo [12] são feitas no UTSim [11] e abrangem 100 centros de distribuição, dispostos a cada 40 m ao longo de um quadrado de 1 km de lado e de onde os drones decolam e pousam. Cada drone sobe verticalmente até atingir uma altura específica e após a entrega, volta para a pista de pouso que saiu. As estratégias anti-colisão utilizaram detecções dentro de um raio de segurança de 30m e um raio de detecção de 100m, que corresponderia a sensores de detecção de luz (LiDAR, do inglês Light Detection and Ranging).

### 2.2 Controle de sequenciamento de pousos e decolagens

Alguns trabalhos na literatura, mesmo que visando o cenário de aviação em geral, interessam para o planeamento de designs de operações do espaço aéreo para drones.

O sistema TRACON (Terminal Radar Approach Control) desenvolvido em 1995 na NASA Ames Research [13], possui elementos principais que ainda são usados nas abordagens atualmente. O TRACON faz uma separação de tempo entre cada passagem de uma aeronave por um portão dentro de uma área circular. Em volta desta área circular, também denominada TRACON, temos uma área de manobra chamada “freeze horizon”, que permite que os controladores de tráfego reservem tempo suficiente para que cada aeronave passe nos portões no tempo programado.

Nesse mesmo centro de pesquisa foi desenvolvido o AutoResolver [8], um sistema que permite lidar com as trajetórias ponto a ponto dos drones. O sistema apresentado por

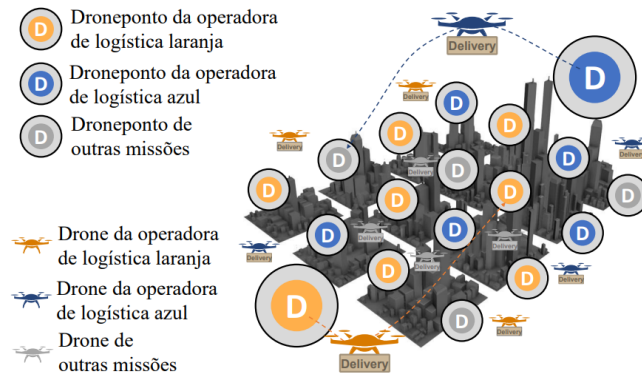


Figura 1: Cenário de Serviço de Entregas baseado em Drones, adaptado de Oliveira et al [12]

C. Bossom [8] foi simulado a uma taxa de 1 drone a cada 5 minutos, em 20 dronepontos espalhados em um mapa semelhante as dimensões de Dallas e Forth Worth.

R. Sáez et al. formula o gerenciamento do sequenciamento como um problema de programação linear inteira mista para gerar as rotas de chegada. Tal abordagem utiliza duas áreas: *pre-sequencing area* e a *dynamic trajectories area*, com funcionamento semelhante as áreas de “freeze horizon” e TRACON. Embora aumente a eficiência nas operações do espaço aéreo, essa abordagem ainda é voltada para aviação em geral, e não é voltado para uma grande densidade de veículos aéreos, como é o cenário de entregas por drones.

Agora no cenário mais voltado para veículos aéreos do tipo electric eVTOL (Vertical Take-Off and Landing), o trabalho [9] apresenta a ideia de absorção de atraso, no qual um drone recebe um instante de tempo no qual ele deve pousar na pista, e assim faz os ajustes de rota para conseguir chegar naquele tempo estabelecido pela torre. No método desenvolvido existem dois pontos fixos de aproximação e dois pontos de partida, assim os drones podem se aproximar e sair do droneponto somente por essas rotas pré-estabelecidas. Foram usados modelos matemáticos de dinâmica de voo e drenagem de bateria em uma simulação numérica considerando uma taxa máxima de 40 aproximações por hora.

O método proposto por Pradeep and Wei [14] é chamado de Insertion and Local Search (ILS) e tal técnica é uma heurística que combina programação linear inteira mista com time-advance (TA). Embora este trabalho comporte apenas a fase de pouso, demonstrou por simulações numéricas a capacidade de sequenciar em tempo real para chegadas sob demanda no cenário de UAM para frotas de 10 eVTOLs.

Mais recentemente, Song and Yeo [15] propõe uma estratégia ótima com três modelos de controle de chegada e sequenciamento, considerando múltiplos pontos de espera em diferentes altitudes juntamente com a segurança operacional de cada abordagem. As simulações numéricas abrangem a taxa de 50 eVTOLs em 20min. Essas abordagens que utilizam diversos pontos de altura reforçam a ideia de que é importante aproveitar o voo vertical de drones para criar camadas de controle. Uma patente registrada pela Amazon [16] descreve

um centro de distribuição de drones em formato de colmeia, com múltiplas altitudes.

### 3 Sequenciamento de Pousos e Decolagens de Drones em Centros de Distribuição

#### 3.1 Visão geral da arquitetura DREMS

O DREMS gerencia o pouso e a decolagem de drones em diferentes Drone Management Stations (DMS), conforme ilustrado na figura 2. Cada DMS gerencia as operações de drones para uma ou mais organizações, que podem ser grandes centros de distribuição para lojas on-line ou vários tipos de pequenos centros para, por exemplo, serviços de entrega de alimentos. Cada DMS inclui um ou mais dronepads - os locais onde os drones decolam e pousam - e um Drone Edge Manager (DEM) responsável pelas atividades de processamento e comunicação para sequenciar os drones. Além disso, cada DMS tem uma área de cobertura representada por um cilindro num espaço 3D, onde tem o objetivo de determinar quais os drones e quando são autorizados a decolar e pousar.

A figura 2 mostra um DREMS com múltiplos DMS de vários tamanhos. Consideramos que os Drone Edge Managers são componentes de uma infraestrutura de comunicação, por exemplo, um sistema 5G ou 6G, que oferece capacidades de computação em borda. Esta infraestrutura permite baixas latências nos processos de tomada de decisão de decolagem e pouso quando comparada com uma abordagem baseada na computação em nuvem.

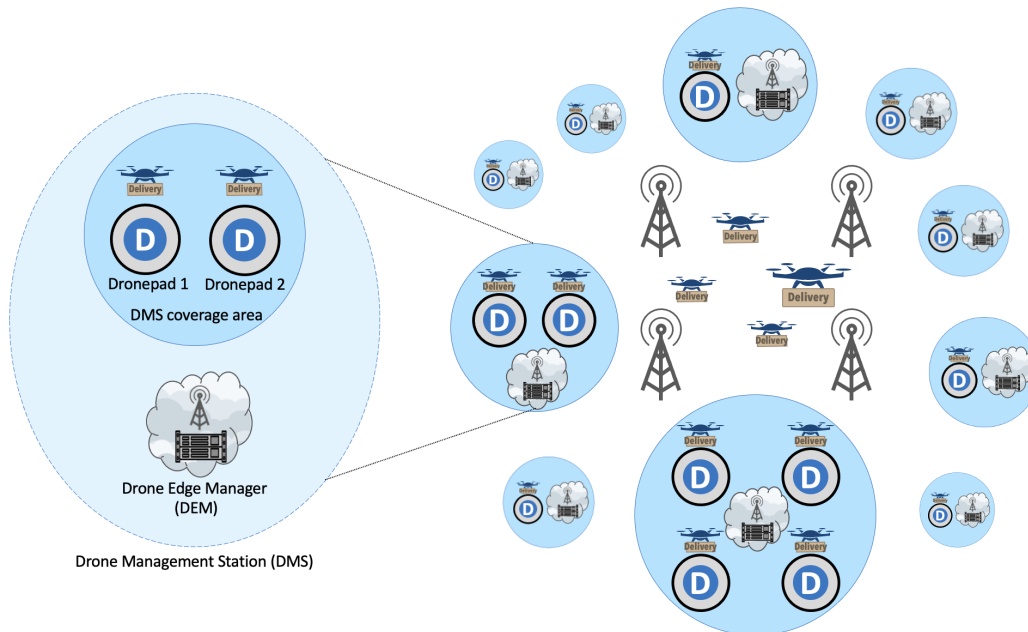


Figura 2: Drone Edge Management System (DREMS) e Drone Management Station (DMS), retirado de [10]

Cada DEM é responsável pela gestão da comunicação entre a DMS e os drones para a sequência de pouso e decolagem. A gestão da decolagem é simples, uma vez que a DMS pode enfileirar os pedidos de entrega para encontrar um intervalo de tempo ótimo. Por outro lado, a gestão de pouso requer uma estratégia mais complexa, uma vez que os drones terminam as suas missões de entrega de forma assíncrona. Cada DMS tem um raio de cobertura  $R_s$ , que determina a área de cobertura da DMS, permitindo a detecção de quando os drones entram nessa área e se pretendem pousar.

### 3.2 Classificação do sistema DREMS

Podemos dividir o DREMS em duas categorias, levando em consideração a utilização dos dronepads: alocação dinâmica e alocação estática. Na alocação dinâmica, cada dronepad pode funcionar como local de pouso e decolagem, o que cabe ao DEM e o algoritmo de sequenciamento direcionar qual a melhor função naquele determinado instante. Na alocação estática, cada dronepad funciona separadamente com uma só função dentre local de pouso ou decolagem.

Outra categoria utilizada para dividir o DREMS foi a forma como cada drone se move dentro da DMS, se de forma inteiramente autônoma, ou inteiramente controlada pela DMS, ou se um misto dentre as duas maneiras.

Com um controle inteiramente autônomo, chamado de controle nível C-0, o sequenciamento e o controle de velocidade e direção de todos os drones da região estaria distribuído em cada drone e as DEMs servem como nós de computação em borda para auxiliar no gerenciamento. Tal abordagem abre espaço para controles inteiramente autônomos, mas dispendiosos em relação às exigências de bateria e hardware dentro de cada drone. Cada drone seria responsável por calcular sua melhor rota, evitando colisões com outros obstáculos.

Com um controle total da DMS, chamado de controle de nível C-2, os drones são inteiramente guiados pela DMS, tanto sua velocidade quanto sua direção, através de comunicação em tempo real, com o suporte das tecnologias mencionadas na seção anterior. Todas as rotas de cada drone são calculadas dentro da DEM a fim de evitar colisões, e cada drone segue um caminho pré-estabelecido dentro da DMS até o dronepad.

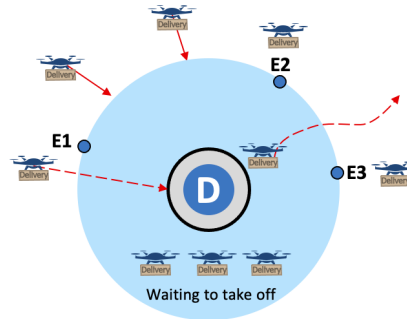


Figura 3: Sequenciamento de pouso e decolagem para drones em um de centro de distribuição. E1, E2 e E3 são pontos de espera.

DREMS					
Alocação dinâmica de dronepads			Alocação estática de dronepads		
<i>Controle inteiramente pelos drones (C-0)</i>	<i>Controle parcial da DMS (C-1)</i>	<i>Controle Total da DMS (C-2)</i>	<i>Controle inteiramente pelos drones (C-0)</i>	<i>Controle parcial da DMS (C-1)</i>	<i>Controle Total da DMS (C-2)</i>
Unmanaged-DAC0	FCFS-DAC1, LandingFirst-DAC1	TwoAltitudes-DAC2	Unmanaged-SAC0	LandingFirst-SAC1, DiagonalTurn-SAC1	TwoAltitudes-SAC2

Tabela 1: Classificação proposta para o DREMS levando em conta o controle da DMS e o tipo de uso do dronepad

Com um controle misto, chamado de controle de nível C-1, os drones recebem algum direcionamento da DMS para o local de pouso e/ou decolagem e possuem autonomia para escolher o melhor caminho até esse ponto pré-estabelecido pela DMS. Para exemplificar um cenário, na figura 3 temos uma representação de uma área em volta da DMS com os drones com intenção de pousar e com outros enfileirados para decolar. Para controles de níveis C-1 e C-2, os pontos  $E1$ ,  $E2$  e  $E3$  são os pontos de espera que um drone fica parado quando volta de sua jornada para pousar. Com um controle C-2, a DMS passa para o drone o caminho exato que deve seguir para pousar e decolar, e deve encontrar um caminho entre os drones que estão esperando em volta para pousar, com o fim de evitar colisões. Com um controle C-1, a DMS pode assumir o controle total do drone que está chegando para pousar e para um drone que estiver decolando, deixar o trabalho de encontrar um caminho entre os drones que estão nos pontos de espera para o próprio drone que está decolando. Em um cenário com controle C-0 os drones têm autonomia de desviar dos outros drones dentro da área da DMS sem nenhum direcionamento externo da DMS.

Neste projeto, foi implementado pelo menos uma abordagem para cada classificação proposta, como mostrado na tabela 1. Para alocação dinâmica optamos por manter com apenas 1 dronepad, número mínimo para se ter o cenário de alocação dinâmica, e para abordagens com alocação estática, optamos por manter com apenas 2 dronepads, número mínimo para se ter um controle estático, com um dronepad exclusivo para pouso e um dronepad exclusivo para decolagem. Assim, podemos criar um baseline para cada nível de controle proposto.

### 3.3 Abordagens utilizadas pelo DREMS

#### 3.3.1 Alocação dinâmica de dronepads

As abordagens implementadas no simulador para o cenário de alocação dinâmica de dronepads seguem como base o diagrama da figura 4. O cilindro 3D representa a área da DMS, com raio da base  $R_s$ . O ponto D é o ponto no centro do dronepad, onde os drones pousam e/ou decolam, o ponto D' é o ponto no qual é feita a aproximação do drone para que ele pouse verticalmente no dronepad, no simulador a distância entre D' e D escolhida foi de 10m. A altura do ponto F está na altura do voo de cruzeiro dos drones, que no simulador foi escolhida como 30m e que será melhor detalhada na seção de metodologia. O ponto O está a 10m de F e é usado nas abordagens de controle de nível C-2. As abordagens de alocação dinâmicas de dronepads implementadas foram: Unmanaged-DAC0, FCFS-DAC1,



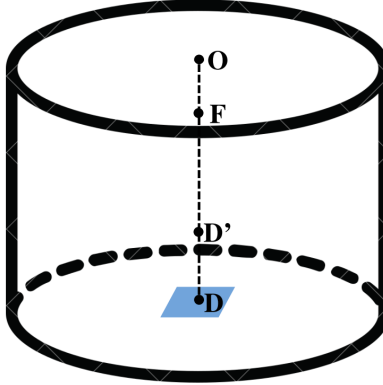


Figura 4: Representação 3D da área da DMS, um cilindro de raio  $R_s$ . Os pontos O, F, D' e D serão usados nas abordagens implementadas para o DREMS

LandingFirst-DAC1, TwoAltitudes-DAC2 e estão melhor detalhadas nas próximas seções.

### 3.3.1.1 Unmanaged-DAC0

A abordagem Unmanaged-DAC0, foi chamada assim pois o controle é feito inteiramente pelos drones, sem nenhum gerenciamento pela DMS. No momento que este projeto foi feito, a única inteligência do drone é o algoritmo anti-colisão SingleDrone implementado pelo trabalho [12]. Assim, embora não tenha uma inteligência distribuída para sequenciamento no pouso e decolagem, é importante analisar esse caso para estabelecer e estudar um cenário em que o único controle é o algoritmo anti-colisão do drone.

### 3.3.1.2 FCFS-DAC1

O FCFS-DAC1 é o mesmo algoritmo mostrado no trabalho [10], e o termo FCFS (First Come First Served) se refere a forma como funciona o agendamento de uma decolagem e de um pouso. Nesta abordagem, existe uma única fila de agendamento, que é compartilhada entre os drones que vão pousar e os drones que desejam decolar. Assim que um drone precisa decolar, ele é colocado no final da fila, e assim que um drone deseja pousar ele é colocado ao final dessa mesma fila.

Com uma taxa muito grande de pedidos, a fila cresce até um momento de saturação do espaço aéreo em volta da DMS, fazendo com que os drones que estão decolando não consigam encontrar um espaço entre os drones que estão nos pontos de espera para pousar. Por isso, há um limite de  $n = 6$  drones que podem esperar em volta da DMS. Quando um drone vem para pousar e o espaço aéreo já está saturado, a DMS envia uma mensagem para voltar 100m e tentar novamente, semelhante à mensagem “orbit” utilizada pelas torres de controladores de tráfego aéreo. A figura 5 indica a geometria da abordagem, onde há locais que os drones têm os desvios desligados, ou seja, estão inteiramente sendo controlados pela DMS, e locais com os desvios ligados, em que são guiados pelos algoritmos anti-colisão

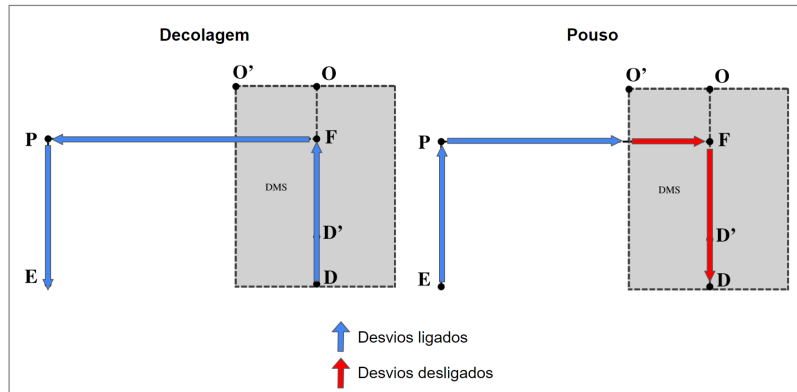


Figura 5: Geometria da abordagem FCFS-DAC1. A figura indica quais pontos o drone passa em cada etapa. A seta azul indica um caminho com os desvios ligados, e a seta vermelha indica um caminho com os desvios desligados. O ponto E indica o ponto de entrega do pacote, e P o ponto acima de E na altura do voo de cruzeiro

SingleDrone [12].

### 3.3.1.3 LandingFirst-DAC1

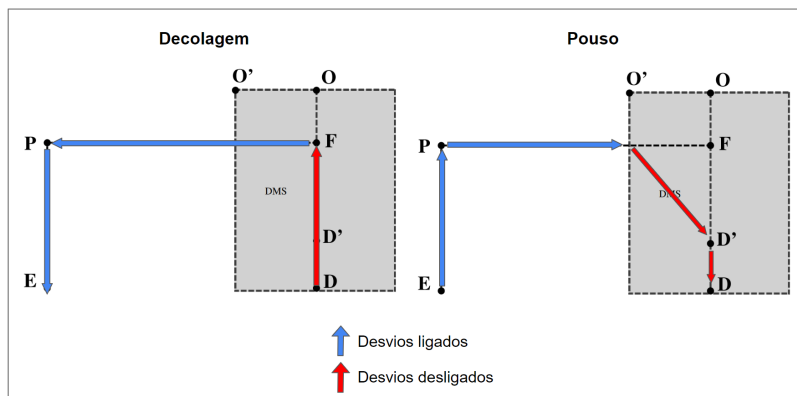


Figura 6: Geometria da abordagem LandingFirst-DAC1. A figura indica quais pontos o drone passa em cada etapa. Nesta geometria, o drone voa diagonalmente até o ponto D' na fase de pouso. O ponto E indica o ponto de entrega do pacote, e P o ponto acima de E na altura do voo de cruzeiro

Enquanto que na abordagem FCFS-DAC1, a fila de agendamento era compartilhada entre os drones que pousam e os que desejam decolar, a fila de agendamento na abordagem LandingFirst-DAC1 foi dividida em duas: a fila de pouso e a fila de decolagem. Foi dada prioridade máxima para a fila de pouso. Então, enquanto houver drones para pousar, nenhum drone vai decolar. A geometria desta abordagem está representada na figura 6

O algoritmo implementado garante que entre cada agendamento de pouso ou de decolagem há uma distância temporal de pelo menos 5s. Por exemplo, caso tenha 5 drones esperando em volta da DMS, a DMS irá liberar um por vez a cada 5s para garantir uma distância mínima entre cada drone. Caso a fila de pouso esteja vazia e tenha passado mais de 5s desde a última operação do dronepad, a DMS libera o dronepad para a decolagem de mais um drone.

### 3.3.1.4 TwoAltitudes-DAC2

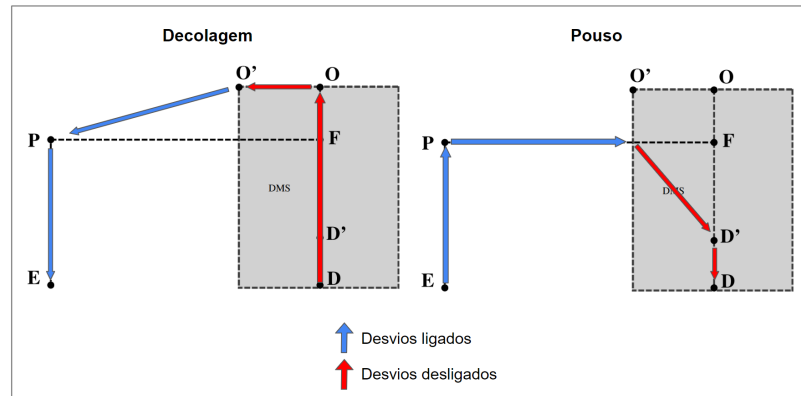


Figura 7: Geometria da abordagem TwoAltitudes-DAC2. A figura indica quais pontos o drone passa em cada etapa. Nesta geometria, todos os caminhos dentro da área da DMS estão indicados pela cor vermelha, com os desvios desligados.

Com o nível de controle C-2, a abordagem TwoAltitudes-DAC2, assume o controle do caminho do drone dentro da área da DMS. A forma mais simples de calcular um caminho em que não há colisão é alterando a altitude de entrada do drone para pouso e a altura de saída da região da DMS. Assim, quando um drone decola, ele viaja até o ponto O, um pouco mais alto que o ponto F, e segue em direção ao ponto O', de onde sai da região da DMS e resume sua jornada, sua geometria está indicada pela figura 7

Esta abordagem também possui duas filas de agendamento, a fila de pouso e a fila de decolagens, e foi dada prioridade máxima para a fila de pouso. Então, assim como na abordagem LandingFirst-DAC1, enquanto houverem drones para pousar nenhum drone irá decolar. O algoritmo implementado também garante que entre cada agendamento de pouso ou de decolagem há uma distância temporal de pelo menos 5s

### 3.3.2 Alocação estática de dronepads

As abordagens implementadas no simulador para o cenário de alocação estática de dronepads seguem como base o diagrama da figura 8. O cilindro 3D representa a área da DMS, com raio da base  $R_s$ . O ponto D1 é o ponto no centro do dronepad, onde os drones pousam, o ponto D1' é o ponto no qual é feita a aproximação do drone para que ele pouse

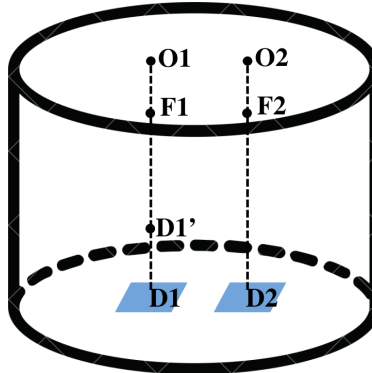


Figura 8: Representação 3D da área da DMS, um cilindro de raio  $R_g$ . Os pontos O1, F1, D1' e D1 pertencem ao dronepad 1, e os pontos O2, F2, e D2 pertencem ao dronepad 2, e que serão usados nas abordagens implementadas para o DREMS no cenário de alocação estática.

verticalmente no dronepad, no simulador a distância entre D1' e D1 escolhida foi de 10m. A altura dos pontos F1 e F2 está na mesma altura do voo de cruzeiro dos drones, que no simulador foi escolhida como 30m e que será melhor detalhada na seção de metodologia. Os pontos O1 e O2 estão, respectivamente, a uma distância de 10m de F1 e F2 e são usados nas abordagens de controle de nível C-2.

O menor número possível de dronepads para a situação de alocação dinâmica é 2, com um dronepad D1 exclusivo para pouso e um dronepad D2 exclusivo para decolagem. As abordagens de alocação estática de dronepads implementadas foram: Unmanaged-SAC0, LandingFirst-SAC1, DiagonalTurn-SAC1, TwoAltitudes-SAC2 e estão melhor detalhadas nas próximas seções.

### 3.3.2.1 Unmanaged-SAC0

Assim como a abordagem Unmanaged-DAC0, a Unmanaged-SAC0 foi chamada assim pois o controle é feito inteiramente pelos drones, sem nenhum gerenciamento pela DMS. A única regra que gerencia esta abordagem é o algoritmo anti-colisão SingleDrone [12], e a principal diferença para a abordagem anterior é que agora temos dois dronepads, com um exclusivamente para pouso e outro exclusivamente para decolagem.

### 3.3.2.2 LandingFirst-SAC1

A fila de agendamento na abordagem LandingFirst-SAC1 também é dividida em duas: a fila de pouso e a fila de decolagem. Foi dada prioridade máxima para a fila de pouso. Assim como nas abordagens anteriores de controle C-1, enquanto houver drones para pousar, nenhum drone vai decolar. A geometria desta abordagem está representada na figura 9

Os dois dronepads operam independentemente, e não dependem do que está ocorrendo no dronepad ao lado. O algoritmo implementado garante que para o dronepad de pouso, há uma distância temporal de pelo menos 5s entre cada agendamento. Analogamente, é

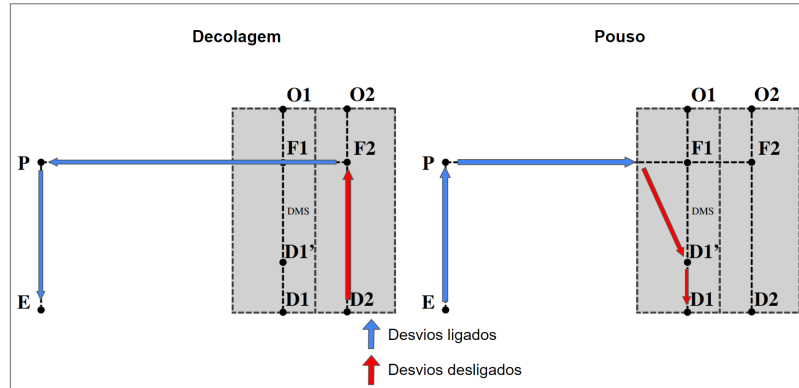


Figura 9: Geometria da abordagem LandingFirst-SAC1. A figura indica quais pontos o drone passa em cada etapa. Nesta geometria, o drone voa diagonalmente até o ponto D1' na fase de pouso. O ponto E indica o ponto de entrega do pacote, e P o ponto acima de E na altura do voo de cruzeiro.

garantido que para o dronepad de decolagem, há uma distância temporal de pelo menos 5s entre cada decolagem.

### 3.3.2.3 DiagonalTurn-SAC1

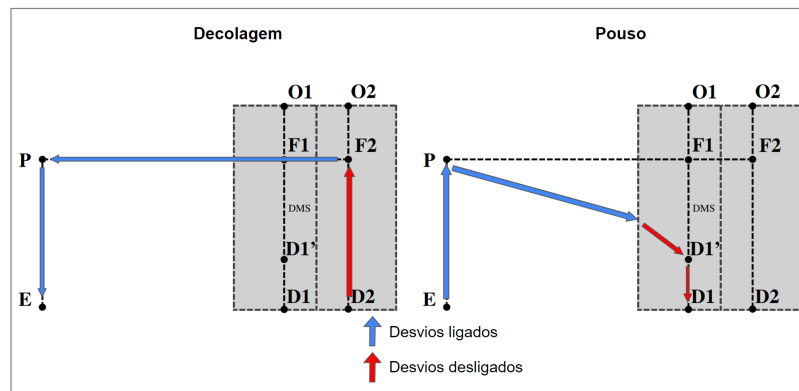


Figura 10: Geometria da abordagem DiagonalTurn-SAC1. A figura indica quais pontos o drone passa em cada etapa. Nesta geometria, o drone voa diagonalmente desde a altura do ponto de entrega até o ponto D1'. O ponto E indica o ponto de entrega do pacote, e P o ponto acima de E na altura do voo de cruzeiro

Esta abordagem é análoga a LandingFirst-SAC1, mas com a diferença de que a viagem de volta do drone é feita com uma diagonal até D1', desde o ponto P. Com isso, queremos estudar a influência de alterar a densidade de drones por camada de altura em áreas vicinais da DMS. O principal impacto a ser estudado é a divisão de um caminho de saída dos drones

e um caminho de entrada. A geometria desta abordagem é explicada na figura 10 e o algoritmo de sequenciamento implementado garante as mesmas distâncias temporais de 5s explicadas nos métodos anteriores.

### 3.3.2.4 TwoAltitudes-SAC2

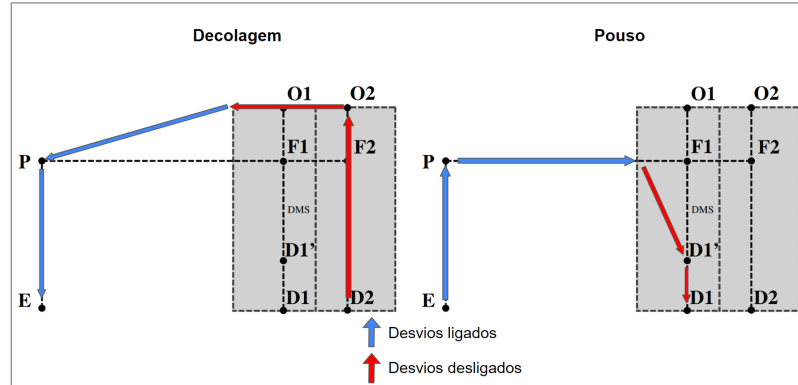


Figura 11: Geometria da abordagem TwoAltitudes-SAC2 . A figura indica quais pontos o drone passa em cada etapa. Nesta geometria, todos os caminhos dentro da área da DMS estão indicados pela cor vermelha, com os desvios desligados. O ponto E indica o ponto de entrega do pacote, e P o ponto acima de E na altura do voo de cruzeiro.

Por fim, a abordagem de nível de controle C-2 para a alocação estática, chamada de TwoAltitudes-SAC2, apresenta um funcionamento semelhante às abordagens anteriores. Cada dronepad opera independentemente de acordo com sua função, e a DMS assume controle total do drone dentro de sua região de atuação. A forma mais simples de se calcular rotas não colidentes com drones entrando e saindo, é a divisão de altura para cada operação. Assim, os drones que estão saindo, passam pelo O2, um pouco mais acima de F2, e após sair da DMS continuam sua jornada, agora com os desvios ligados até o ponto de entrega, mostrado na figura 11

## 4 Metodologia

Implementamos a simulação física no UTSim [11], um simulador de drones baseado no motor de jogos *Unity*, bem conhecido no mercado. O UTSim permite a simulação da dinâmica de voo de múltiplos drones (até 1500 drones simultâneos) e as suas interações com obstáculos, tais como edifícios numa cidade. O simulador fornece um framework facilmente configurável para diferentes cenários de utilização e permite a implementação e integração de vários sistemas de planejamento de trajetórias anti-colisão e algoritmos de gestão de tráfego aéreo.

As simulações assumem que cada drone tem dimensões de 2 m x 2 m x 0,5 m, um raio de segurança de 30m, e um raio de detecção de 100 m, usados no método anti-colisão

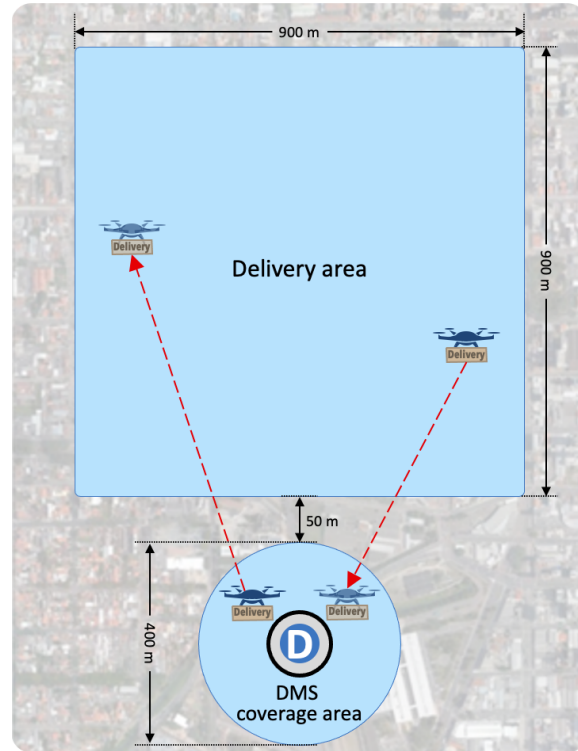


Figura 12: Vista superior do cenário simulado.

SingleDrone [12]. Uma visualização de um drone pousando em um dronepad no simulador está representada na figura 13. Os dronepads possuem tamanho 3m x 3m e nas abordagens que utilizam mais de um dronepad a distância entre cada um foi escolhida como 15m, como evidenciado na figura 14

O cenário de simulação apresentado na figura 12 inclui uma área de entrega quadrada de 0,81 km<sup>2</sup> e uma área de cobertura circular da DMS onde a gestão do DREMS opera. Foi utilizado o valor de  $R_s = 200\text{m}$  para o raio de cobertura da DMS, uma vez que representa um grande centro de distribuição mais afastado da área urbana.

Há uma distância de 50m entre a área de entrega e a área de cobertura da DMS para otimizar o tempo de simulação, mas este valor pode ser maior em situações reais. Definimos também a altitude de voo de cruzeiro para  $h = 30\text{m}$  para também otimizar o tempo de simulação, mas em um cenário real, a altitude deve ser adequada aos obstáculos e às regulações locais.

Os pedidos de entrega chegam ao DREMS a uma taxa de acordo com a distribuição de Poisson, com quatro taxas: 1, 2, 4 e 8 drones/min. Cada simulação tem a duração de 90 minutos, momento que o tamanho da fila de sequenciamento se estabiliza para as taxas 1 e 2 pedidos/min. Cada cenário de taxa de entrega foi repetido 30 vezes.

Esta simulação analisa o número de colisões, e as taxas reais de pouso e decolagem para cada cenário de taxa de entrega. Em um sistema de sequenciamento ótimo, a taxa de

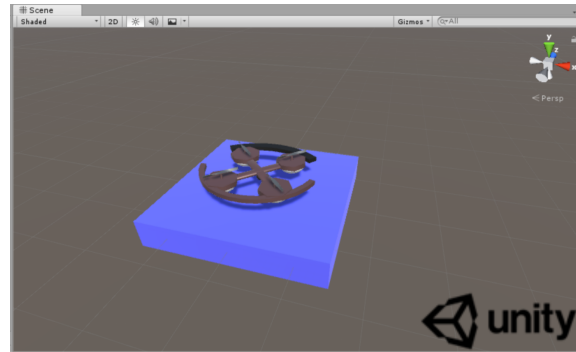


Figura 13: Vista de uma cena do motor de jogos Unity, no momento em que um drone pousa no dronepad.

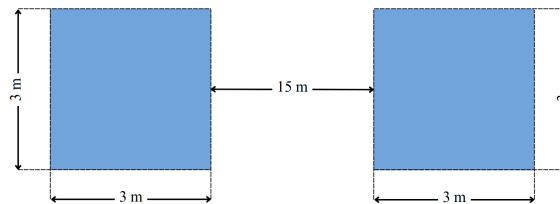


Figura 14: Vista superior das dimensões dos dronepads e a distância entre cada um nas abordagens com alocação estática de dronepads.

decolagem real seria igual a taxa de pouso e a taxa de pouso real seria a taxa de decolagem menos a taxa de colisão (que deveria ser zero). No entanto, esse desempenho depende da capacidade do algoritmo de sequenciamento. Consideramos quatro tipos de colisões: 1) Decolagem (Takeoff), quando um drone que decola até uma altitude de  $h = 30\text{m}$  colide com outro drone que está em cruzeiro; 2) Pouso (Landing), quando um drone em fase de pouso colide com um drone em cruzeiro; 3) Pouso e decolagem (Landing and takeoff), quando um drone está pousando e o outro decolando; e 4) Cruzeiro (Cruise), quando ambos os drones colidem enquanto estão em cruzeiro. No nosso estudo, a fase de cruzeiro começa quando o drone atinge uma altitude de  $h = 30\text{m}$ , e o pouso quando o drone fica abaixo de  $10\text{m}$  de altura.

## 5 Resultados de Simulação

### 5.1 Alocação dinâmica de dronepads

A abordagem Unmanaged-DAC0 apresenta quantidades substanciais de colisões em todas as etapas para todos os cenários de demanda simulados, como mostrado no gráfico 15. Isso mostra que apenas um algoritmo anti-colisão de drones não é suficiente para garantir um tráfego seguro e que de fato é preciso investir em gerenciamento de tráfego perto de centros



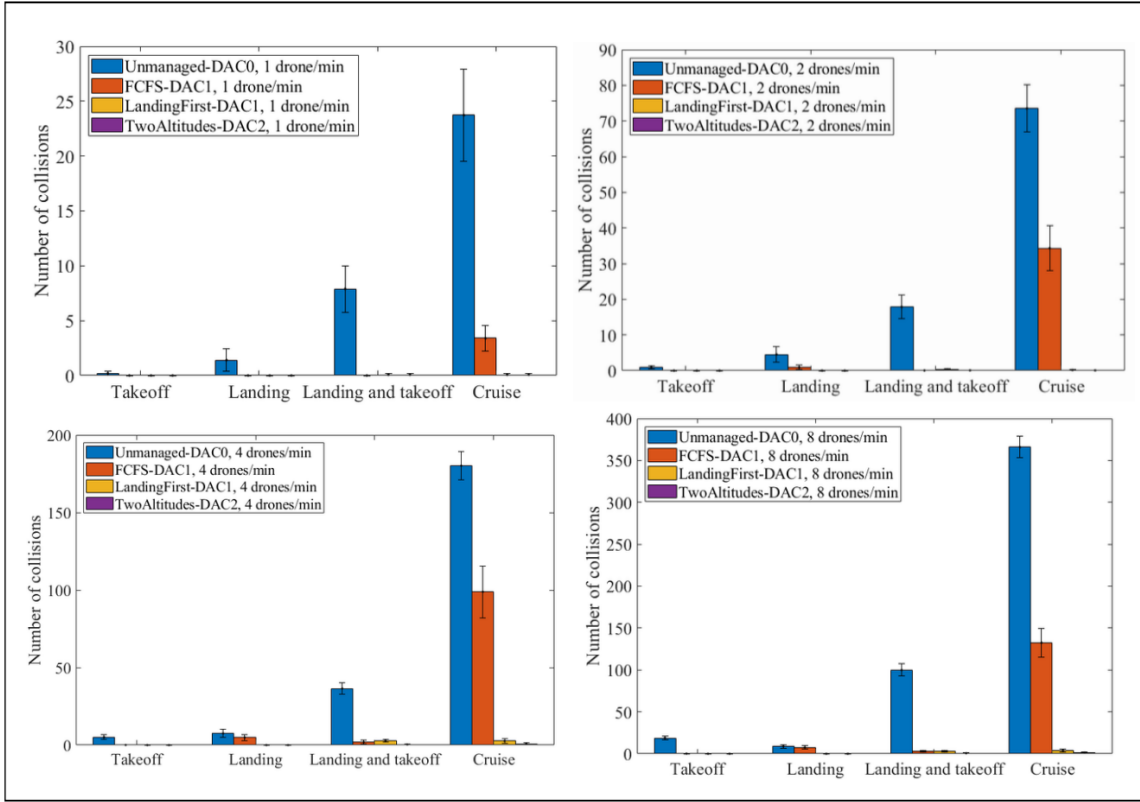


Figura 15: Números de colisões para cada cenário de taxa Poisson: 1, 2, 4 e 8 drones/min, com as abordagens de alocação dinâmica de dronepads.

de distribuição, com algum tipo de controle centralizado, ou algum controle descentralizado entre os próprios drones. Esse resultado não inviabiliza, entretanto, sequenciamentos por controle de nível C-0, visto que podem aparecer abordagens descentralizadas que também organizam o espaço aéreo em um cenário de alta densidade.

A partir dos gráficos 15, 16 e 17, é possível observar que a abordagem FCFS-DAC1 apresenta um número de colisões também considerável na etapa de pouso e que a taxa de pouso diminui com o aumento da demanda. Isso evidencia que uma abordagem FCFS (First Come First Served) para drones que estão competindo por um dronepad não é adequada. Como a taxa de pedidos, simulada por uma distribuição Poisson, é maior que a taxa de drones que chegam para pousar, a fila de sequenciamento satura de drones que querem decolar, deixando os drones que vão pousar em situação de *starvation*. Isso mostra, que além de uma questão de duração de bateria, deve haver maior prioridade para os drones que estão vindo pousar, a fim de encontrar um equilíbrio. É importante ressaltar que o algoritmo FCFS-DAC1 é o mesmo apresentado pelo trabalho [10] e que a taxa de decolagem é limitada pelo tempo de segurança de 20s entre cada operação do dronepad, o que reflete em uma taxa máxima de decolagem de 3 drones/min.

Com a abordagem LandingFirst-DAC1, foi dada prioridade máxima para pouso. O

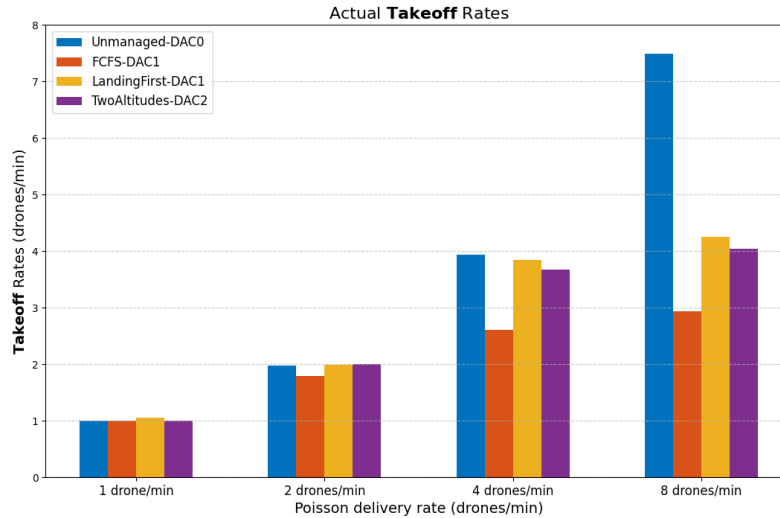


Figura 16: Gráfico das taxas reais de decolagem de drones para as abordagens com alocação dinâmica de dronepads

número de colisões nesta abordagem é próximo de zero em quase todas as taxas Poisson, enquanto que a taxa de pouso fica equiparada com a taxa de decolagem. Isso mostra que a prioridade máxima para pouso foi benéfica para diminuir o número de colisões e aumentar a eficiência do dronepad. É interessante notar que chegou-se em um equilíbrio de aproximadamente 4 drones/min. O que indica que taxas a partir desse valor aumentará a fila de decolagem e indicará tempo maior de espera para um consumidor.

Não houve diferença significativa entre as abordagens LandingFirst-DAC1 e TwoAltitudes-DAC2. Isso evidencia que o algoritmo anti-colisão SingleDrone [12] foi suficiente para encontrar um caminho sem colisões para fora da área da DMS. No entanto, devido a natureza desses algoritmos, não há drones em pontos de espera, visto que eles possuem prioridade máxima para uso do dronepad, fazendo com que os drones que decolassem desviassem apenas dos drones que estão em rota de entrar na área da DMS.

## 5.2 Alocação estática de dronepads

Com a abordagem Unmanaged-SAC0, é notável que a quantidade de colisões continua alta para as abordagens de controle de nível C-0 feitas neste projeto. Colocar um dronepad a mais e com função separadas fez com que tenha uma quantidade menor de colisões que Unmanaged-DAC1, com aproximadamente a metade das colisões, mostrado na figura 18. A taxa de pouso diminui com o aumento da taxa Poisson, na figura 20. Com isso, conclui-se que mesmo com uma alocação estática de dronepads, apenas um algoritmo anti-colisão não é suficiente para garantir a segurança e eficiência do espaço aéreo.

Não houveram diferenças significativas entre as abordagens LandingFirst-SAC1 e TwoAltitudes-SAC2 em relação a quantidade de colisões e taxas reais de pouso e decolagem. O que mostra

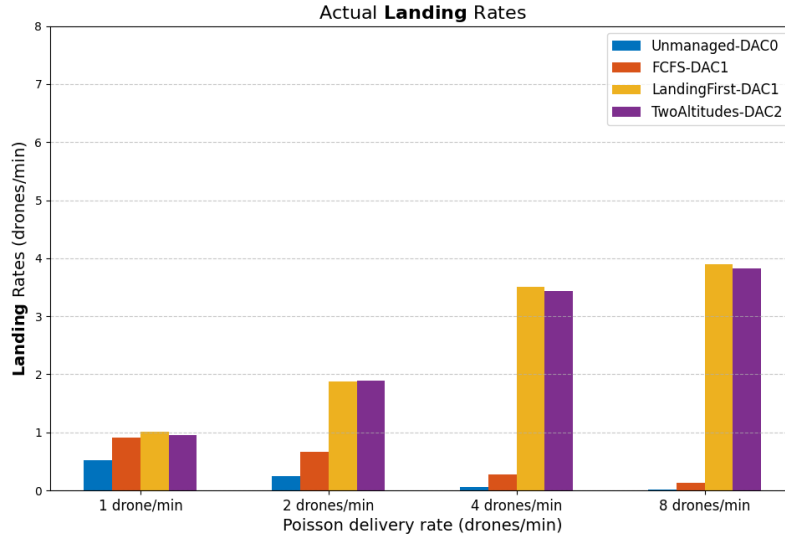


Figura 17: Gráfico das taxas reais de pouso de drones para as abordagens com alocação dinâmica de dronepads.

que ter ou não um controle total da DMS não influencia tanto nas geometrias e algoritmos de sequenciamento propostos, além de que o algoritmo anti-colisão SingleDrone foi suficiente para sair da área da DMS com segurança.

Há um destaque para o algoritmo DiagonalTurn-SAC1, que apresentou os menores números de colisões enquanto mantém uma taxa real de pouso máxima de 7 drones/min, no cenário com taxa Poisson de 8 drones/min. Isso indica que é uma boa estratégia dividir ou em camadas, ou de alguma outra forma, o fluxo de drones que estão voando em direção a DMS e os drones que estão saindo.

De forma geral, abordagens com alocação dinâmica de dronepads apresentaram melhores taxas reais de pouso, mas com isso aumentou-se também o número absoluto de colisões. Uma forma mais justa de comparação entre as duas formas é criar outra abordagem de alocação dinâmica que usa dois dronepads e compará-la com as abordagens de alocação estática.

## 6 Conclusão

As novas concepções de aplicações de drones, juntamente com os esforços intensos do meio acadêmico, do governo e da indústria, conduziram a uma mudança de paradigma no transporte urbano. Embora esse paradigma prometa introduzir um novo modo de transporte, este ainda é totalmente dependente de uma infraestrutura terrestre para funcionar de forma segura e eficiente em um ambiente urbano. Devido a sua novidade, os estudos de uma infraestrutura terrestre focada em controle de tráfego e sequenciamento estão dispersos. O presente trabalho apresenta soluções que exploram essa lacuna e que podem servir de base

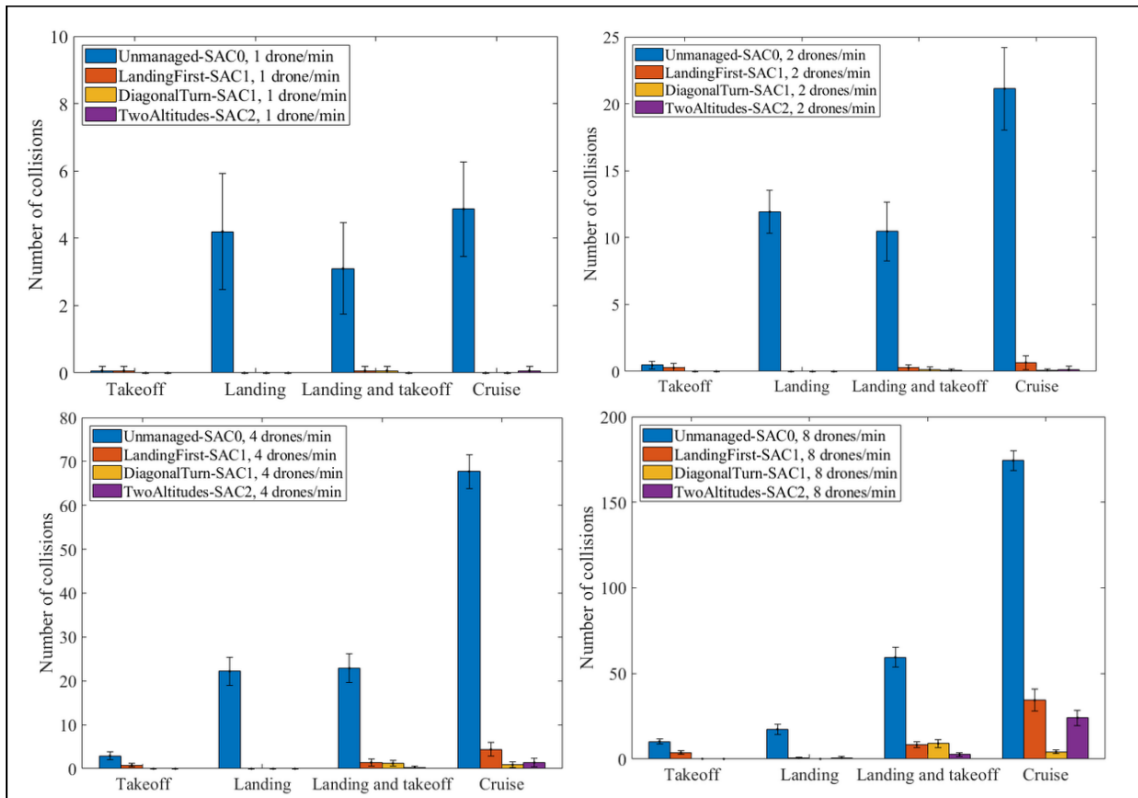


Figura 18: Números de colisões para cada cenário de taxa Poisson: 1, 2, 4 e 8 drones/min, com as abordagens de alocação dinâmica de dronepads.

para futuros controles de sequenciamento mais completos.

Os resultados deste trabalho deixam claro que uma abordagem de sequenciamento em centros de distribuição é necessária para que se tenha sucesso em um cenário de entregas para uma maior densidade de drones, como mostrado nos resultados da abordagem de controle nível C-0. Embora o objetivo principal seja diminuir as colisões em tais serviços, a eficiência também é importante visto que baixas taxas vão sub-utilizar as infraestruturas e diminuir as taxas de entregas para clientes.

Os dados também evidenciam que deve haver um balanceamento entre os agendamentos de pouso e decolagem, com uma prioridade maior ao pouso, visto que tal situação aumenta as taxas reais de decolagem e pouso e diminui a quantidade total de colisões.

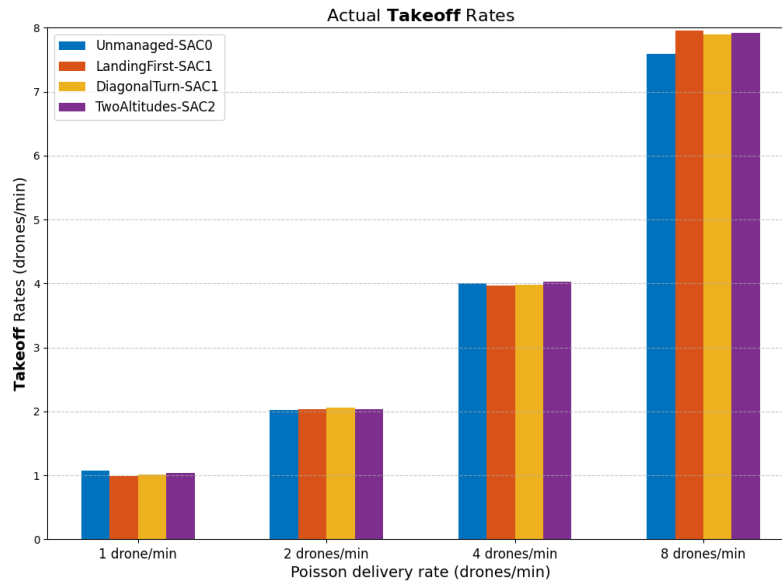


Figura 19: Gráfico das taxas reais de decolagem de drones para as abordagens com alocação dinâmica de dronepads

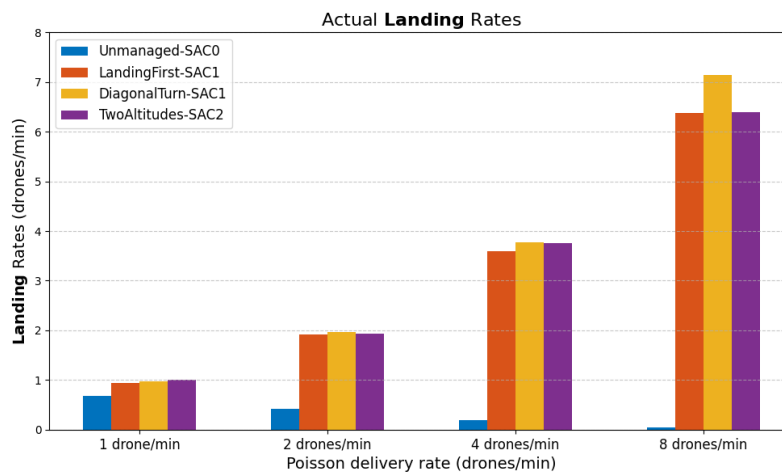


Figura 20: Gráfico das taxas reais de pouso de drones para as abordagens com alocação dinâmica de dronepads.

## Referências

- [1] P. McEnroe, S. Wang, and M. Liyanage, “A survey on the convergence of edge computing and ai for uavs: Opportunities and challenges,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 17, pp. 15 435–15 459, 2022.
- [2] A. P. Cohen, S. A. Shaheen, and E. M. Farrar, “Urban air mobility: History, ecosystem, market potential, and challenges,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 9, pp. 6074–6087, 2021.
- [3] B. Alkouz, B. Shahzaad, and A. Bouguettaya, “Service-based drone delivery,” in *2021 IEEE 7th International Conference on Collaboration and Internet Computing (CIC)*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, dec 2021, p. 6drones. [Online]. Available: <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/CIC52973.2021.00019>
- [4] J. P. Aurambout, K. Gkoumas, and B. Ciuffo, “Last mile delivery by drones: an estimation of viable market potential and access to citizens across european cities,” *European Transport Research Review*, vol. 11, 12 2019.
- [5] Dos testes à autorização de voo: a história do drone do ifood. [Online]. Available: <https://institucional.ifood.com.br/inovacao/dos-testes-a-autorizacao-de-voo-a-historia-do-drone-do-ifood/>
- [6] Alphabet’s wing partners with walmart for drone deliveries in dallas. [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2023/8/24/23844975/alphabet-wing-walmart-drone-deliveries-dallas>
- [7] N. S. Labib, M. R. Brust, G. Danoy, and P. Bouvry, “The rise of drones in internet of things: A survey on the evolution, prospects and challenges of unmanned aerial vehicles,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 115 466–115 487, 2021.
- [8] C. Bosson and T. A. Lauderdale, “Simulation evaluations of an autonomous urban air mobility network management and separation service,” *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. [Online]. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2018-3365>
- [9] I. C. Kleinbekman, M. A. Mitici, and P. Wei, “evtol arrival sequencing and scheduling for on-demand urban air mobility,” in *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 2018, pp. 1–7.
- [10] L. P. Soares, C. A. Kamienski, F. M. C. D. Oliveira, and L. F. Bittencourt, “Drone edge management system (drems): Sequencing drone takeoff and landing,” *Manuscript submitted for publication*, 2023.
- [11] A. Al-Mousa, B. H. Sababha, N. Al-Madi, A. Barghouthi, and R. Younis, “Utsim: A framework and simulator for uav air traffic integration, control, and communication,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 16, 9 2019.

- [12] F. M. C. de Oliveira, L. F. Bittencourt, R. A. C. Bianchi, and C. A. Kamienski, "Drones in the big city: Autonomous collision avoidance for aerial delivery services," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–0, 2023.
- [13] E. Itoh and H. Erzberger, "Design principles and algorithms for air traffic arrival scheduling," 2014. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:51917770>
- [14] P. Pradeep and P. Wei, "Heuristic approach for arrival sequencing and scheduling for evtol aircraft in on-demand urban air mobility," in *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 2018, pp. 1–7.
- [15] K. Song and H. Yeo, "Development of optimal scheduling strategy and approach control model of multicopter vtol aircraft for urban air mobility (uam) operation," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 128, p. 103181, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X21001972>
- [16] J. C. Curlander, A. Gilboa-Amir, L. M. Kisser, R. A. Koch, and R. D. Welsh, "Multi-level fulfillment center for unmanned aerial vehicles," Jun 2017.