

Computação na Borda para Drones: Gerenciando Pousos e Decolagens em Centros de Distribuição

Lucas de Paula Soares¹, Fabíola M. C. de Oliveira¹, Carlos A. Kamienski²,
Luiz F. Bittencourt¹

¹Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas
Campinas, SP

²Centro de Matemática, Computação e Cognição – Universidade Federal do ABC
Santo André, SP

l201867@dac.unicamp.br, {fabiola.oliveira, bit}@ic.unicamp.br,

cak@ufabc.edu.br

Abstract. Existing drone anti-collision strategies mainly focus on cruise flight in scenarios with a limited number of drones, neglecting the management of landing and takeoff in large distribution centers where there is a high density of drones. This paper proposes and evaluates new policies of landing and takeoff sequencing in high-density areas, improving the Drone Edge Management System (DREMS). These policies are classified and tested in drone high-density scenarios, increasing the actual landing and takeoff rate without increasing the collision rate. The results highlight the need for an effective sequencing strategy in distribution centers to avoid collisions.

Resumo. Estratégias anticollisões entre drones existentes concentram-se principalmente no voo em cruzeiro 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 trabalho propõe e avalia novas políticas de sequenciamento de pousos e decolagens em áreas de alta densidade, aprimorando o Drone Edge Management System (DREMS). Essas políticas são classificadas e testadas em cenários de alta densidade de drones, elevando as taxas reais de pousos e decolagens, sem acarretar em um aumento nas taxas de colisão. Os resultados destacam a necessidade de uma estratégia de sequenciamento eficaz em centros de distribuição para evitar colisões.

1. Introdução

O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), 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 à 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 e sistemas de entrega de pacotes [McEnroe et al. 2022].

Empresas 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 [Lu et al. 2022, Chen et al. 2022, Moshref-Javadi and Winkenbach 2021]. O principal desafio desse tipo de serviço é garantir operações seguras para pessoas e mercadorias, enquanto mantém a eficiência de custo, segurança e tempo de entrega. O advento da Internet das Coisas, das comunicações móveis [Labib et al. 2021] e a computação na borda e névoa [McEnroe et al. 2022] 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 anticolisão e em gerenciamento do tráfego aéreo para uma pequena quantidade de drones, por volta de 20 drones [Bosson and Lauderdale 2018, Kleinbekman et al. 2018]. 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 subexplorado é o gerenciamento de pouso e decolagem em centros de distribuição, visto que essas áreas naturalmente atraem uma grande densidade de tráfego. Soares et al. [2023] abordam uma arquitetura de computação na borda para tratar o sequenciamento de pousos e decolagens em um cenário de alta densidade, chamado de *Drone Edge Management System* (DREMS). Esse sistema é composto por uma estação de gerenciamento de drones, onde ficam um ou mais dronepontos, e um gerenciador de borda de drones, mas ainda carece de uma classificação sobre o compartilhamento de dronepontos e o controle de sequenciamento e inclui apenas um algoritmo de sequenciamento.

Dado este cenário de alta densidade de drones, este estudo desenvolve uma classificação para o DREMS e estende dentro dessa classificação novos algoritmos de sequenciamento. O principal objetivo é diminuir a taxa de colisões em centros de distribuição enquanto garante eficiência dada pela taxa de pousos e decolagens. A abordagem com maior taxa de pouso, de 7,14 drones/min, garante uma taxa de colisão de 3,36%, e a abordagem com a menor taxa de colisão, de 0,45%, apresenta uma taxa de pouso de 3,82 drones/min. Observamos que as estratégias que dividem o fluxo de entrada e saída de drones em camadas de altitudes apresentam melhores taxas de pouso, além da necessidade de um controle no centro de distribuição além do algoritmo anticolisão. Assim, este trabalho pode servir como base 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.

O restante do trabalho está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados; a Seção 3 explica o cenário de entregas e a visão geral da arquitetura DREMS; a Seção 4 detalha a classificação proposta e as novas abordagens implementadas; a Seção 5 aborda o simulador e o cenário utilizado; a Seção 6 apresenta e discute os resultados; e, por fim, a Seção 7 finaliza o artigo com o panorama geral de todos os resultados e os trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O sistema *Terminal Radar Approach Control* (TRACON) desenvolvido na NASA Ames Research possui elementos principais que são utilizados na aviação atualmente [Itoh and Erzberger 2014]. 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.

R. Sáez et al. formulam o gerenciamento do sequenciamento como um problema de programação linear inteira mista para gerar as rotas de chegada [Sáez et al. 2021]. Tal abordagem utiliza duas áreas: a área de pré-sequenciamento e a área de trajetórias dinâmicas, com funcionamento semelhante as áreas de “*freeze horizon*” e TRACON. Embora aumente a eficiência nas operações do espaço aéreo, essa abordagem não é propícia para uma grande densidade de veículos aéreos, como é o cenário de entregas por drones.

No cenário voltado para veículos aéreos do tipo *electric Vertical Take-Off and Landing* (eVTOL), Kleinbekman et al. apresentam a ideia de absorção de atraso, na qual um drone recebe um instante de tempo dentro do qual ele deve pousar no vertiporto, e assim faz os ajustes de rota para conseguir chegar naquele tempo estabelecido pela torre [Kleinbekman et al. 2018]. Nesse método, 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. Kleinbekman et al. usaram 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 e Wei é chamado de *Insertion and Local Search* e tal técnica é uma heurística que combina programação linear inteira mista com avanço no tempo [Pradeep and Wei 2018]. Embora este trabalho comporte apenas a fase de pouso, demonstrou por simulações numéricas a capacidade de sequenciar em tempo real chegadas sob demanda no cenário de mobilidade urbana aérea para frotas de 10 eVTOLs.

Mais recentemente, Song e Yeo propuseram 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 [Song and Yeo 2021]. As simulações numéricas abrangem a taxa de 50 eVTOLs em 20 min. Essas abordagens que utilizam diversos pontos de altitude reforçam a ideia de que é importante aproveitar o voo vertical de drones para criar camadas de controle.

Os trabalhos examinados nesta seção indicam que ainda há uma lacuna no gerenciamento de pousos e decolagens com grandes densidades de veículos aéreos, necessário em um cenário de entregas. O presente trabalho propõe cinco novas soluções para esse problema com o uso de computação na borda e o avalia com simulações que abrangem todas as etapas de voo do serviço, e não apenas os pousos e decolagens.

3. Conceitos básicos

Esta seção apresenta o cenário de entrega por drones, o algoritmo anticolisão empregado nas simulações e uma visão geral da arquitetura DREMS.

3.1. Cenário de entrega por drones e algoritmo anticolisão

Em grandes cidades, um sistema de entrega aérea exige 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 [de Oliveira et al. 2021]. Nesse sentido, de Oliveira et al. propõem três abordagens anticolisão geométricas e autônomas em um cenário em que várias empre-

sas realizam entregas utilizando drones, mas sem o controle de pousos e decolagens [de Oliveira et al. 2023]. No cenário de simulação deste trabalho, os drones partem de um droneponto em um centro de distribuição, completam a entrega e retornam ao droneponto inicial. Em um ambiente real, múltiplas operadoras logísticas podem coexistir, cada uma com seus próprios dronepontos, além de outros dronepontos de diferentes missões, compartilhando o espaço aéreo.

O algoritmo SingleDrone, desenvolvido por de Oliveira et al., atingiu a menor taxa de colisões e o menor tempo de viagem [de Oliveira et al. 2023]. 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 de velocidade relativa entre o drone e o primeiro obstáculo detectado em rota de colisão, o algoritmo determina se é possível efetuar um desvio horizontal, virando no menor ângulo possível para que o drone não entre no raio de segurança. Se tal situação não for possível, o drone desvia 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. SingleDrone usou detecções dentro de um raio de segurança de 30 m e um raio de detecção de 100 m, que corresponde a sensores de detecção e alcance de luz (LiDAR, do inglês *Light Detection and Ranging*).

3.2. Visão geral da arquitetura DREMS

O DREMS gerencia o pouso e a decolagem de drones em diferentes estações de gerenciamento de drones (DMS, do inglês, *Drone Management Stations*), conforme ilustrado na Figura 1. Cada DMS gerencia as operações de drones para uma ou mais organizações, que podem ser grandes centros de distribuição para lojas *online* ou vários tipos de pequenos centros para, por exemplo, serviços de entrega de alimentos. Cada DMS inclui um ou mais dronepontos – os locais onde os drones decolam e pousam – e um gerenciador de borda de drones (DEM, do inglês, *Drone Edge Manager*) responsável pelas atividades de processamento e comunicação. Além disso, cada DMS tem uma área de cobertura representada por um cilindro, cujo raio de cobertura R_s permite a detecção de quando os drones entram nessa área, se pretendem pousar e determina quais os drones e quando são autorizados a decolar e pousar. A Figura 1 mostra o DREMS com múltiplas DMS de vários tamanhos.

Consideramos que os DEMs são componentes de uma infraestrutura de comunicação, por exemplo, um sistema 5G ou 6G, que oferece capacidades de computação na borda. Esta infraestrutura permite baixas latências nos processos de tomada de decisão quando comparada com uma abordagem baseada na computação em nuvem [Hayat et al. 2021]. Cada DEM é responsável pela gestão da comunicação entre a DMS e os drones para a sequência de pousos e decolagens. Na gestão da decolagem, 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.

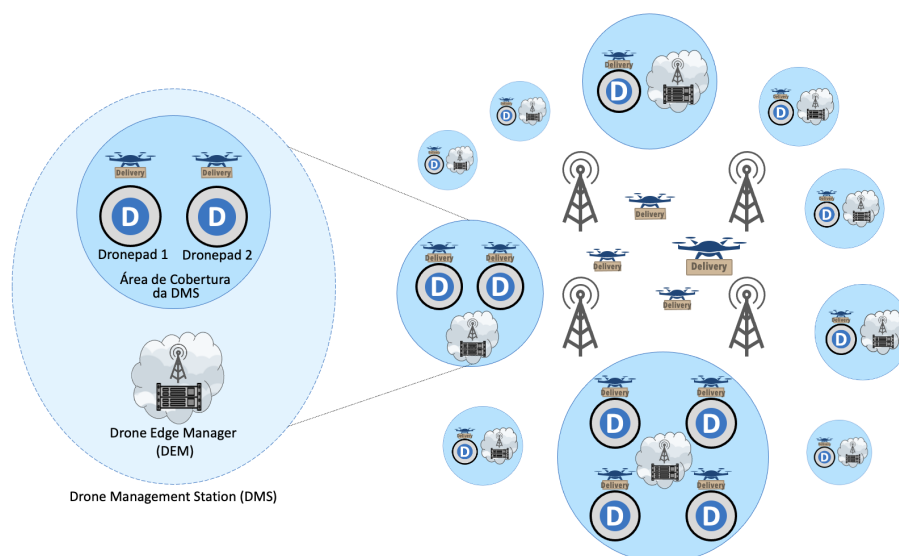


Figura 1. Drone Edge Management System (DREMS) e Drone Management Station (DMS) [Soares et al. 2023].

4. Classificação e expansão do DREMS

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

Outra categoria utilizada para dividir o DREMS é a forma como cada drone se move dentro da DMS: de forma inteiramente autônoma; de forma inteiramente controlada pela DMS; ou um misto das duas formas. Com um controle inteiramente autônomo, chamado de controle de nível C-0, o sequenciamento e o controle de velocidade e direção de todos os drones da região estão distribuídos em cada drone e as DEMs servem como nós de computação na borda para auxiliar no gerenciamento. Tal abordagem é dispendiosa em relação às exigências de bateria e hardware dentro de cada drone. Cada drone fica 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, que define tanto sua velocidade quanto sua direção, através de comunicação em tempo real. Todas as rotas de cada drone são calculadas dentro do DEM a fim de evitar colisões, e cada drone segue um caminho pré-estabelecido dentro da DMS até o droneponto. Com um controle misto, chamado de controle de nível C-1, os drones recebem algum direcionamento da DMS para o local de pouso, decolagem ou ambos e possuem autonomia para escolher o melhor caminho até esse ponto pré-estabelecido pela DMS. Para exemplificar um cenário, na Figura 2, temos uma representação da área de cobertura 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 exemplos de pontos de espera nos quais um drone que deseja pousar fica parado enquanto não recebe a autorização para pouso. Com um controle C-2, a DMS passa para o drone o caminho exato que ele deve seguir para pousar ou decolar, devendo encontrar um caminho livre

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, enquanto para um drone que estiver decolando, ela pode deixar o trabalho de encontrar um caminho livre para o próprio drone. Em um cenário com o controle C-0, os drones têm autonomia de desviar dos outros drones dentro da área da DMS sem nenhum direcionamento externo dela.

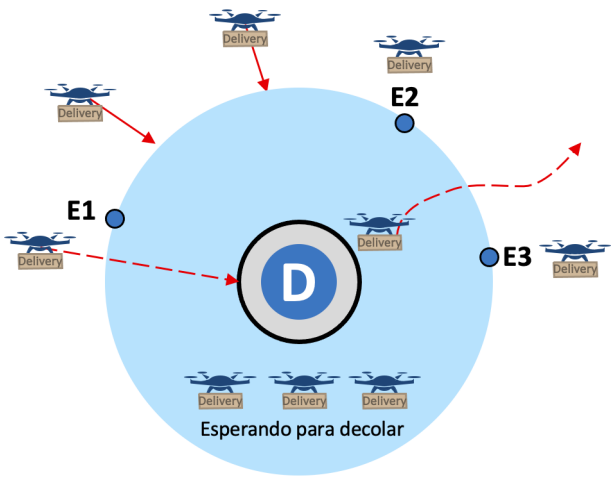


Figura 2. Sequenciamento de pousos e decolagens para drones em um de centro de distribuição. E1, E2 e E3 são pontos de espera.

Neste trabalho, propomos pelo menos uma abordagem para cada classificação proposta, como mostrado na Figura 3. Para alocação estática, optamos por empregar dois dronepontos, que é o número mínimo para se ter um controle estático, com um droneponto exclusivo para pouso e um droneponto exclusivo para decolagem. Para alocação dinâmica, optamos por usar um droneponto, número mínimo para se ter o cenário de alocação dinâmica. Assim, podemos criar um patamar de base para cada nível de controle proposto.

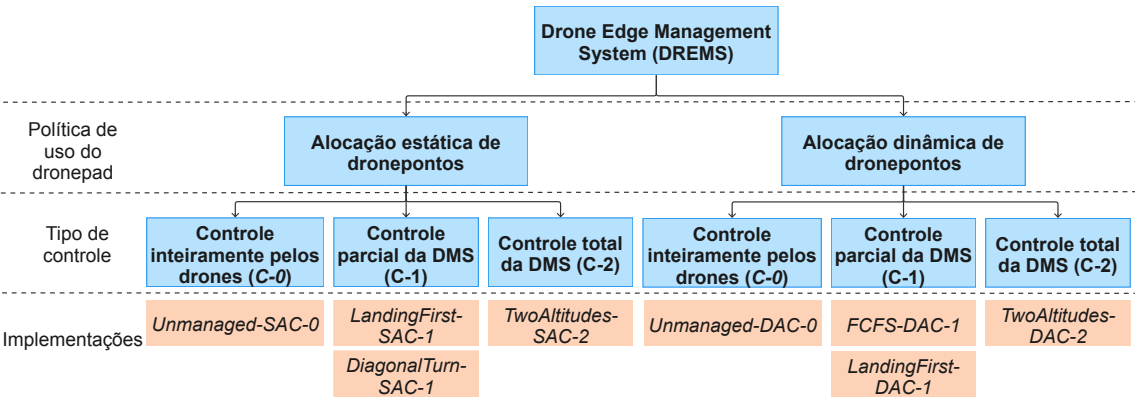


Figura 3. Classificação proposta para o DREMS.

4.1. Abordagens com alocação estática de dronepontos

As estratégias de alocação estática de dronepontos são identificadas pela sigla SAC (do inglês *Static Allocation Control*) seguida pelo número correspondente ao nível de con-

trole. A estratégia com controle inteiramente autônomo [de Oliveira et al. 2023] foi chamada de Unmanaged-SAC-0, e as estratégias propostas neste trabalho são: LandingFirst-SAC-1, DiagonalTurn-SAC-1 e TwoAltitudes-SAC-2.

Na Figura 4a, o ponto **D1** representa o centro do droneponto de pouso. O ponto **D1'** é o local de aproximação do drone. Os drones decolam do ponto **D2** até o ponto **F**, que corresponde à altitude de voo de cruzeiro. Os pontos **O** e **O'** são utilizados para direcionar o fluxo de saída na estratégia de controle de nível C-2 TwoAltitudes-SAC-2. O ponto **P** fica no mesmo nível do voo de cruzeiro, acima do ponto de entrega **C**.

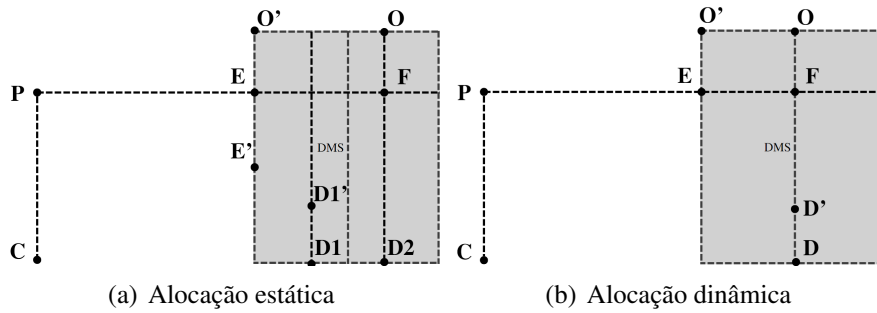


Figura 4. Corte transversal do cenário de entregas. A região cinza representa a área de atuação da DMS.

Na abordagem Unmanaged-SAC-0, os drones não recebem orientação da DMS, sendo o único componente inteligente o algoritmo anticolisão SingleDrone [de Oliveira et al. 2023]. Assim, embora não haja um algoritmo dedicado para sequenciamento de pouso e decolagem, é crucial analisar esse cenário para estabelecer e examinar uma situação em que o controle se resume ao algoritmo anticolisão do drone, como ocorre, por exemplo, em drones na proximidade do ponto de entrega final, afastados da DMS.

A fila de agendamento na abordagem LandingFirst-SAC-1 é dividida em duas: a fila de pouso e a fila de decolagem. Foi dada prioridade máxima para a fila de pouso, assim, a prioridade é dada a drones que podem estar com carga baixa na bateria e que contribuem para um incremento na densidade na região, aumentando a probabilidade de colisões. Assim, enquanto houver drones para pousar, nenhum drone irá decolar. A DMS direciona os drones que estão decolando para o ponto **F** da Figura 4a, e os drones que estão pousando, entre o ponto de espera **E** e **D1'**. Os drones têm autonomia para escolher um caminho entre **F** e a saída da área da DMS, o que justifica o nível de controle C-1. Os dois dronepontos operam independentemente. O algoritmo proposto garante que, para o droneponto de pouso, há um intervalo de pelo menos 5 s entre cada agendamento. Analogamente, é garantido que, para o droneponto de decolagem, haja um intervalo de pelo menos 5 s entre cada decolagem.

Em DiagonalTurn-SAC-1, a viagem de volta do drone é feita com uma diagonal do ponto **P** até o ponto de espera **E'** da Figura 4a. Com isso, queremos estudar a influência de alterar a densidade de drones usando camadas de altitude 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. O algoritmo de sequenciamento implementado garante os mesmos intervalos de 5 s explicados anteriormente. Os drones também possuem autonomia para

encontrar um caminho entre **F** e a saída da área da DMS, o que justifica o nível de controle C-1.

A abordagem TwoAltitudes-SAC-2, de nível de controle C-2, opera independentemente em cada droneponto, e a DMS assume controle total do drone dentro de sua região de atuação. A forma de se calcular rotas não colidentes escolhida foi a divisão de altitudes para cada operação. Assim, os drones que estão saindo da DMS passam pelos pontos **F**, **O** e **O'**, e logo voltam para a altitude de voo de cruzeiro, enquanto os drones que estão pousando são encaminhados do ponto **E** ao **D1'**.

4.2. Abordagens com alocação dinâmica de dronepontos

As estratégias de alocação dinâmica de dronepontos são identificadas pela sigla DAC (do inglês *Dynamic Allocation Control*) seguida pelo número correspondente ao nível de controle. As estratégias da literatura foram nomeadas: Unmanaged-DAC-0 [de Oliveira et al. 2023] e FCFS-DAC-1 [Soares et al. 2023] e as estratégias para alocação dinâmica propostas nesse trabalho são: LandingFirst-DAC-1 e TwoAltitudes-DAC-2.

Na Figura 4b, o ponto **D** representa o centro do droneponto, onde os drones pousam e decolam. O ponto **D'** é o local de aproximação do drone para aterrissagem vertical no droneponto. A altura do ponto **F** corresponde à altitude de voo de cruzeiro. O ponto **O**, localizado acima de **F**, é utilizado para direcionar o fluxo de saída na estratégia de controle de nível C-2 TwoAltitudes-DAC-2. O ponto **P** fica no mesmo nível do voo de cruzeiro, acima do ponto de entrega **C**.

Assim como Unmanaged-SAC-0, na estratégia Unmanaged-DAC-0, não há nenhum gerenciamento pela DMS. A única regra que gerencia esta abordagem é o algoritmo anticolisão SingleDrone [de Oliveira et al. 2023], e a principal diferença em relação à Unmanaged-SAC-0 é que agora temos apenas um droneponto tanto para decolagem quanto para pouso.

O FCFS-DAC-1 é o algoritmo proposto por Soares et al. [Soares et al. 2023], e o termo FCFS (do inglês *First Come, First Served*) se refere à 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.

Já na abordagem LandingFirst-DAC-1, a fila de agendamento é dividida em duas: uma fila para pousos e outra para decolagens. A prioridade máxima é atribuída à fila de pousos, garantindo que, enquanto houver drones aguardando para pousar, nenhum drone decolará. Nesta estratégia, o drone autorizado para pouso segue de **E** diretamente para o ponto **D'** da Figura 4b, com o auxílio da DMS, enquanto o drone autorizado para decolagem faz o caminho inverso, saindo do droneponto até **F** e então até o ponto **P**, com auxílio do algoritmo anticolisão. O algoritmo LandingFirst-DAC-1 assegura um intervalo mínimo de 5 segundos entre cada agendamento de pouso ou decolagem. Por exemplo, se houver 5 drones aguardando ao redor da DMS, a DMS liberará um de cada vez a cada 5 segundos, garantindo uma distância mínima entre eles. A DMS auxilia o drone no trajeto entre o ponto de espera **E** e o ponto **D'** durante o pouso, assim como no percurso entre os

pontos **D** e **F** durante a decolagem. A partir do ponto **F**, cabe ao próprio drone encontrar um caminho de saída da DMS, justificando o nível de controle C-1.

Com o nível de controle C-2, a abordagem TwoAltitudes-DAC-2 assume o controle da trajetória do drone dentro da área da DMS. A forma de calcular um caminho livre de colisões é alterando a altitude de entrada do drone para pouso e a altitude de saída da região da DMS. TwoAltitudes-DAC-2 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 pelas mesmas razões do LandingFirst-DAC-1. O algoritmo proposto também garante que, entre cada agendamento de pouso ou de decolagem, há um intervalo de pelo menos 5 s. A DMS direciona os drones que estão decolando para os pontos **O** e **O'**, e os drones que estão pousando, entre o ponto de espera **E** e **D'**.

5. Metodologia

Modificamos o simulador UTSim [Al-Mousa et al. 2019], um simulador de drones baseado no motor de jogos *Unity*, para avaliar as estratégias propostas em nosso cenário. As simulações assumem que cada drone tem dimensões de 2 m x 2 m x 0,5 m, um raio de segurança de 30 m, e um raio de detecção de 100 m, usados no Single-Drone [de Oliveira et al. 2023]. Os dronepontos possuem tamanho 3 m x 3 m e, nas abordagens que utilizam mais de um droneponto, a distância entre o centro geométrico de cada um é de 15 m.

O cenário de simulação apresentado na Figura 5 inclui uma área de entrega quadrada de 0,81 km² e uma área de cobertura da DMS onde a gestão do DREMS opera. É utilizado o valor de $R_s = 200$ 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 50 m 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 30 m e uma velocidade de 20 m/s para também otimizar o tempo de simulação, mas, em um cenário real, esses parâmetros devem ser adequados aos obstáculos e às regulações locais. No cenário utilizado, Single-Drone [de Oliveira et al. 2023] é o algoritmo anticolisão utilizado após a saída do centro de distribuição, em todas as abordagens simuladas.

Os pontos de entrega são escolhidos aleatoriamente dentro da área de entrega, seguindo uma distribuição uniforme, através do gerador de números pseudo-aleatórios *Xorshift 128*. A taxa real de decolagem é calculada como a quantidade total de drones que decolaram dividida pelo tempo de simulação, em drones/min. A taxa real de pousos é a quantidade de drones que pousaram com sucesso no droneponto dividida pelo tempo de simulação, também em drones/min. A taxa de colisões mensura o percentual de colisões totais do cenário, calculado como a quantidade total de colisões dividida pela quantidade de drones que decolaram. Quando um drone colide, os dados da viagem são salvos e ele é removido da simulação.

Os pedidos de entrega chegam ao DREMS seguindo uma 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 executado 30 vezes. Analisamos as taxas de colisões e as taxas reais de pousos e decolagens para cada taxa de chegada de pedidos e

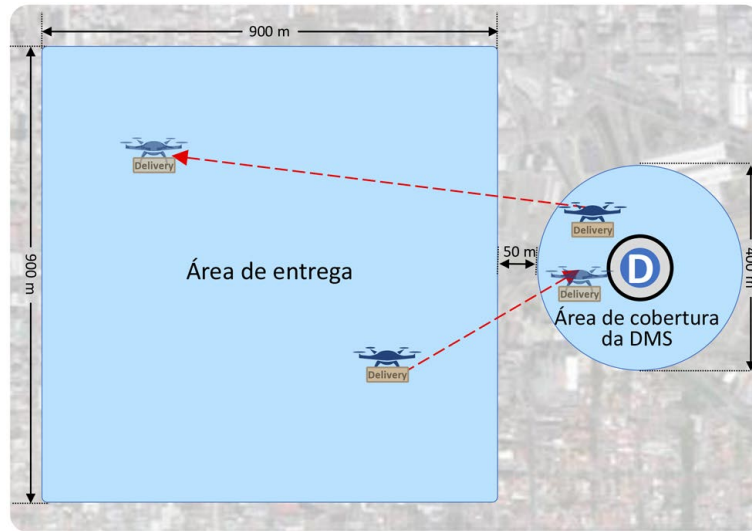


Figura 5. Vista superior do cenário simulado.

reportamos a média e o intervalo de confiança de 95% de cada medida.

6. Resultados

Esta seção apresenta e analisa os resultados para as estratégias com alocação de drone-pontos estática e dinâmica.

6.1. Estratégias com alocação estática de drone-pontos

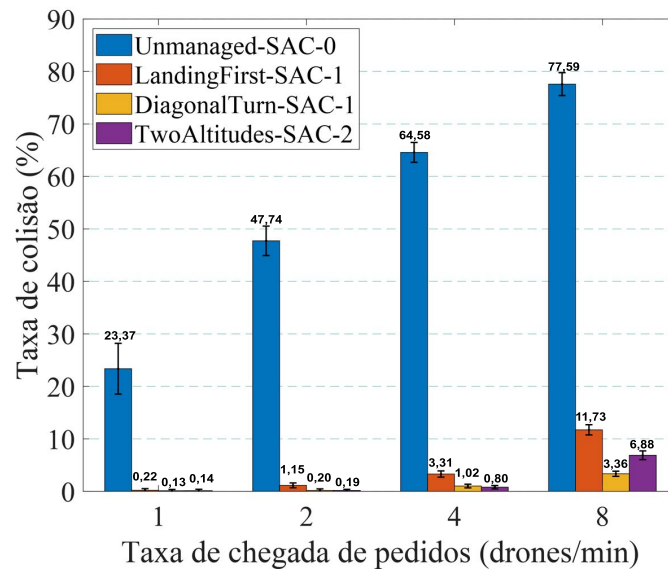


Figura 6. Taxa de colisão das abordagens de alocação estática de drone-pontos.

Com a abordagem Unmanaged-SAC-0, a taxa de colisões fica alta para níveis de controle C-0, chegando em uma taxa de 77,59% na Figura 6. Sua taxa de pouso diminui com o aumento da taxa Poisson, conforme mostrado na Figura 7. Com isso, concluímos que, mesmo com uma alocação estática de drone-pontos, apenas um algoritmo anticolisão

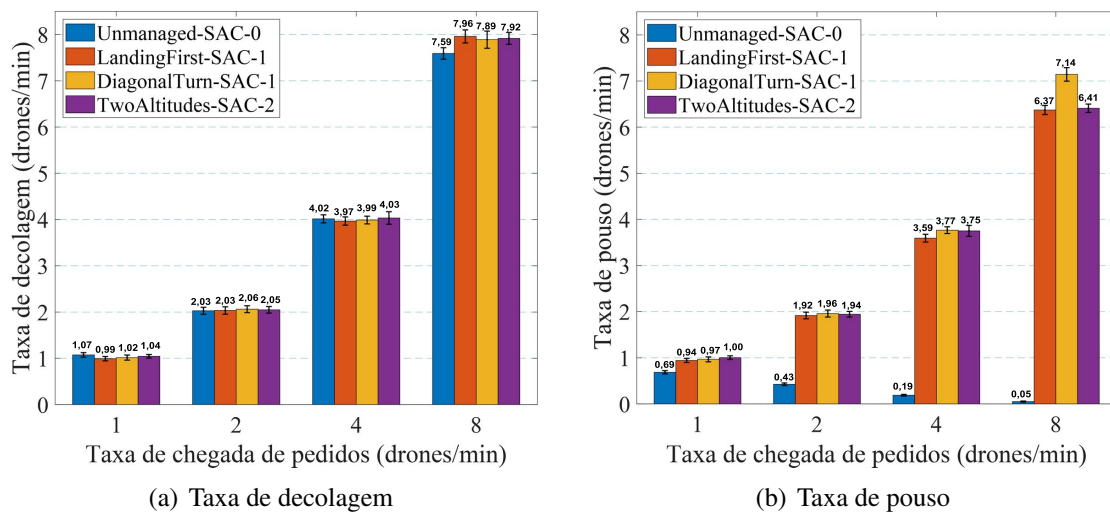


Figura 7. Taxas reais de decolagem e pouso para alocação estática.

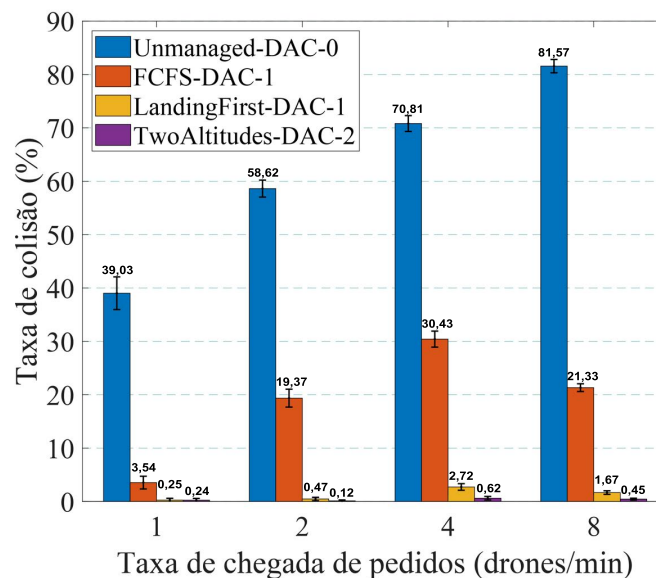


Figura 8. Taxa de colisão das abordagens de alocação dinâmica de drone pontos.

não é suficiente para garantir a segurança no pouso e decolagem em uma área sem o controle da DMS.

A abordagem TwoAltitudes-SAC-2 sai-se ligeiramente melhor do que LandingFirst-SAC-1 quanto à taxa de colisão, enquanto apresentam praticamente a mesma taxa real de decolagem e pouso. Isso mostra que ter um controle total da DMS melhora ligeiramente a segurança dentro da região do centro de distribuição, além de o SingleDrone ser suficiente para os drones saírem da área da DMS sem causar muitas colisões. Há um destaque para o algoritmo DiagonalTurn-SAC-1, que apresenta as menores taxas de colisões enquanto mantém a maior taxa real de pouso de 7,14 drones/min, com taxa de chegada de 8 drones/min. Isso indica que é uma boa estratégia dividir o fluxo de drones que viajam em direção à DMS e aos drones que estão saindo dela.

6.2. Estratégias com alocação dinâmica de dronepontos

A estratégia Unmanaged-DAC-0 evidencia um elevado número de colisões em todos os cenários de demanda simulados, conforme mostrado na Figura 8, chegando a 81,57% para uma taxa de chegadas de 8 drones/min. Colocar um droneponto a menos e com duas funções aumenta ligeiramente a taxa de colisões em relação a Unmanaged-SAC-0. Isso mostra que apenas um algoritmo anticisão não é suficiente para garantir um tráfego seguro na decolagem e pouso em uma região não controlada pela DMS.

A partir das Figuras 8 e 9, é possível observar que a abordagem FCFS-DAC-1 apresenta uma taxa de colisões também considerável e a taxa de pouso diminui com o aumento da demanda. Isso evidencia que uma abordagem FCFS para drones que estão competindo por um droneponto não é adequada, e que há uma situação de inanição para os drones querendo pousar. Isso mostra que, além da duração de bateria, deve haver maior prioridade para os drones que estão pousando.

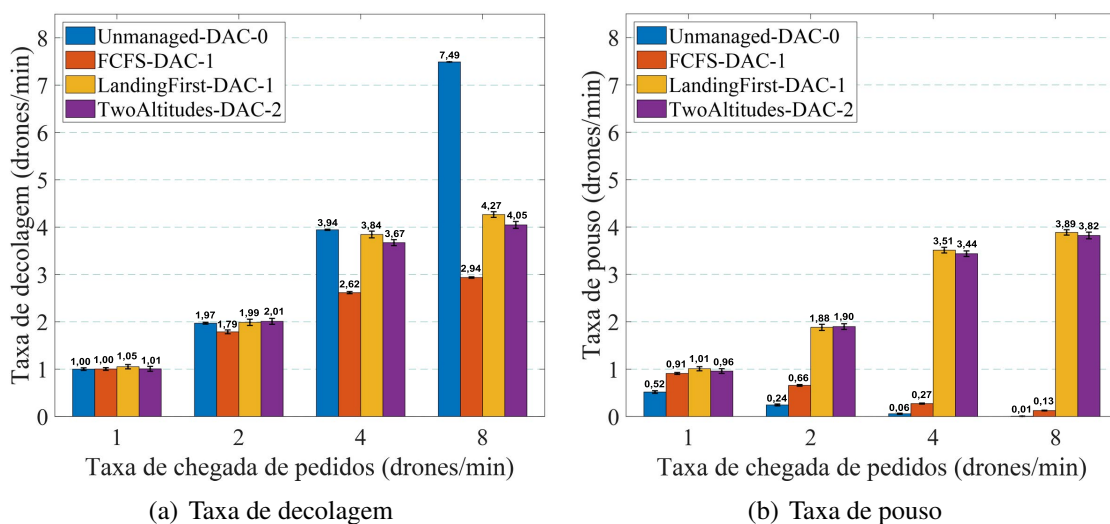


Figura 9. Taxas reais de decolagem e pouso para alocação dinâmica.

A taxa de colisões em LandingFirst-DAC-1 e TwoAltitudes-DAC-2 é próxima de zero em quase todas as taxas de chegadas, enquanto a taxa de pouso fica equiparada com a taxa de decolagem. Isso mostra que a prioridade máxima para pouso é benéfica para diminuir o número de colisões e aumentar a eficiência de uso do droneponto. Também evidencia que o SingleDrone é suficiente para encontrar um caminho sem colisões para fora da área da DMS em LandingFirst-DAC-1, no nível de controle C-1.

É interessante notar, pela Figura 9, que se chega em um equilíbrio de aproximadamente 4 drones/min para LandingFirst-DAC-1 e TwoAltitudes-DAC-2, mesmo com a taxa de pedidos em 8 drones/min. Esse limite operacional juntamente com a diminuição das taxas de colisão é um indício de que se chega em uma situação de equilíbrio do fluxo de entrada e saída de drones na região da DMS. Esse valor travado em 4 drones/min se deve ao tempo adicional do drone percorrer o raio da DMS até o ponto F, enquanto um drone na fila de decolagem aguarda a autorização. Ou seja, com modificações na velocidade dos drones e do raio da DMS, pode-se chegar em outros limites operacionais. TwoAltitudes-DAC-2 apresenta as menores taxas de colisão dentre todas as abordagens para uma taxa de pedidos de 8 drones/min.

De forma geral, abordagens com alocação estática de dronepontos apresentam melhores taxas reais de pouso, mas, com isso, aumenta-se também a taxa de colisões. Outra forma de comparação entre os dois tipos de alocação é criar outra abordagem de alocação dinâmica que usa dois dronepontos e compará-la com as abordagens de alocação estática.

7. Conclusão

Este trabalho propõe e avalia diversas estratégias para o sequenciamento de pousos e decolagens em centros de distribuição de mercadorias para um serviço de entregas por drones. Também propomos uma classificação para essas estratégias de acordo com duas políticas de uso dos dronepontos e três tipos de controle na estação de gerenciamento de dronepontos. Cinco novas estratégias são propostas e ao todo oito estratégias são avaliadas dentro dessa classificação.

Os resultados obtidos destacam a necessidade de equilibrar os agendamentos de pouso e decolagem, conferindo uma prioridade maior ao pouso. Além disso, a divisão em camadas do fluxo de entrada e saída de drones aparece como uma estratégia eficaz, visto que essa abordagem contribui para aumentar as taxas reais de decolagem e pouso, enquanto reduz a taxa de colisão. Também é evidente que o controle totalmente distribuído nos drones, em que eles usam apenas seu algoritmo anticolisão, não é suficiente para evitar colisões em pousos e decolagens nessa área com alta densidade.

Este trabalho concentra-se exclusivamente no gerenciamento de decolagens e pousos. Como trabalhos futuros, o *Drone Edge Management System* (DREMS) tem o potencial, através da computação na borda, de expandir suas funcionalidades para o cálculo de rotas em voo, otimizando assim as trajetórias dos drones ao longo da rota de entrega. Assim, cada classificação no DREMS pode ser aprimorada com implementações adicionais, incorporando abordagens mais eficientes e aprimorando a utilização dos dronepontos.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2021/00199-8, CPE SMARTNESS, FAPESP processo 2023/16328-7 e 2024/01769-0. Também é parte do INCT da Internet do Futuro para Cidades Inteligentes, financiado por CNPq (proc. 465446/2014-0), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e FAPESP (procs. 14/50937-1 e 15/24485-9).

Referências

- Al-Mousa, A., Sababha, B. H., Al-Madi, N., Barghouthi, A., and Younis, R. (2019). UTSim: A framework and simulator for UAV air traffic integration, control, and communication. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16.
- Bosson, C. and Lauderdale, T. A. (2018). Simulation Evaluations of an Autonomous Urban Air Mobility Network Management and Separation Service. In *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*.
- Chen, K.-W., Xie, M.-R., Chen, Y.-M., Chu, T.-T., and Lin, Y.-B. (2022). DroneTalk: An Internet-of-Things-Based Drone System for Last-Mile Drone Delivery. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(9):15204–15217.

- de Oliveira, F. M. C., Bittencourt, L. F., Bianchi, R. A. C., and Kamienski, C. A. (2023). Drones in the Big City: Autonomous Collision Avoidance for Aerial Delivery Services. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- de Oliveira, F. M. C., Bittencourt, L. F., and Kamienski, C. (2021). Prevenção de colisões em serviços de entregas por drones em cidades inteligentes. In *Anais do V Workshop de Computação Urbana*, pages 182–195.
- Hayat, S., Jung, R., Hellwagner, H., Bettstetter, C., Emini, D., and Schnieders, D. (2021). Edge Computing in 5G for Drone Navigation: What to Offload? *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2):2571–2578.
- Itoh, E. and Erzberger, H. (2014). Design Principles and Algorithms for Air Traffic Arrival Scheduling.
- Kleinbekman, I. C., Mitici, M. A., and Wei, P. (2018). eVTOL Arrival Sequencing and Scheduling for On-Demand Urban Air Mobility. In *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1–7.
- Labib, N. S., Brust, M. R., Danoy, G., and Bouvry, P. (2021). The Rise of Drones in Internet of Things: A Survey on the Evolution, Prospects and Challenges of Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Access*, 9:115466–115487.
- Lu, S.-H., Kuo, R., Ho, Y.-T., and Nguyen, A.-T. (2022). Improving the efficiency of last-mile delivery with the flexible drones traveling salesman problem. *Expert Systems with Applications*, 209:118351.
- McEnroe, P., Wang, S., and Liyanage, M. (2022). A Survey on the Convergence of Edge Computing and AI for UAVs: Opportunities and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(17):15435–15459.
- Moshref-Javadi, M. and Winkenbach, M. (2021). Applications and Research avenues for drone-based models in logistics: A classification and review. *Expert Systems with Applications*, 177:114854.
- Pradeep, P. and Wei, P. (2018). 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)*, pages 1–7.
- Soares, L. D. P., Oliveira, F. C. D., Kamienski, C. A., and Bittencourt, L. F. (2023). Drone edge management system (drems): Sequencing drone takeoff and landing. In *2023 10th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, pages 114–121, Los Alamitos, CA, USA. IEEE Computer Society.
- Song, K. and Yeo, H. (2021). 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*, 128:103181.
- Sáez, R., Polishchuk, T., Schmidt, C., Hardell, H., Smetanová, L., Polishchuk, V., and Prats, X. (2021). Automated sequencing and merging with dynamic aircraft arrival routes and speed management for continuous descent operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 132:103402.