

O Impacto do Atraso de Comunicação nos Algoritmos Anticolisão de Drones

Arthur A. Ferreira¹, Fabíola M. C. de Oliveira², Luiz F. Bittencourt²,
Carlos Kamienski¹

¹Centro de Matemática, Computação e Cognição – Universidade Federal do ABC
Santo André, SP

²Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas
Campinas, SP

{arthur.ferreira, carlos.kamienski}@ufabc.edu.br

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

Abstract. *Drones are viable alternatives to the problematic and complex transportation flow in urban areas. As companies adopt this delivery system, operational problems increase, making a case for developing and implementing safety procedures such as collision avoidance strategies. The development of algorithms for drone operation aims to expand the use of this technology and bring greater safety and efficiency. This paper aims to assess the effects of communication delay between drones in anticollision strategies. We simulate five strategies under five delay ranges, from Lidar sensors and 5G/6G wireless technologies to critical delays of around 750 ms.*

Resumo. *Drones são alternativas plausíveis para o problemático e complexo fluxo de transporte em áreas urbanas. À medida em que as empresas adotam essa modalidade de entrega, o número de problemas operacionais aumenta, sendo necessários o desenvolvimento e a implementação de procedimentos para segurança, como estratégias para evitar colisões. O desenvolvimento de algoritmos para a operação de drones visa expandir o uso dessa tecnologia e trazer mais segurança e eficiência. O objetivo deste artigo é avaliar os efeitos do atraso de comunicação entre drones em estratégias anticolisão. Cinco estratégias são simuladas em cinco situações de atraso, variando desde atraso em sensores Lidar, em tecnologias de rede 5G e 6G até atrasos críticos da ordem de 750 ms.*

1. Introdução

A viagem de drones, ou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), de natureza comercial ou não, deve atender da mesma forma os procedimentos de segurança semelhantes ao tráfego de aeronaves. Um drone sem um condutor humano em uma viagem, seja fazendo uma entrega, inspeção ou até na forma recreativa, tem probabilidade considerável de colidir com um obstáculo e causar prejuízo para terceiros ou no próprio equipamento [Oliveira et al. 2023]. É possível que as probabilidades de colisão aumentassem sob a condução de um ser humano. Nesse sentido, drones controlados por algoritmos com recursos anticolisão podem operar com segurança em um cenário majoritariamente comercial e com alta densidade de drones.

Um dos principais fatores para o avanço do uso de drones se deve à eficiência energética que eles possibilitam [Rodrigues and outros 2022]. Embora até o momento não tenham uma grande autonomia de bateria, os drones ainda apresentam vantagens em relação aos veículos terrestres por degradar menos o meio ambiente. A viabilidade na adoção dessa alternativa aos outros serviços de entregas aumenta conforme as novas tecnologias de apoio surgem, como infraestrutura de rede 5G, a futura rede 6G e a computação em névoa.

Vários estudos para evitar colisões entre drones têm sido desenvolvidos nos últimos anos [Huang et al. 2019]. Em razão da extensão e complexidade desse contexto, os pesquisadores frequentemente optam pela definição de um escopo, como um ou vários drones e presença de comunicação ou não, e dos atores, que podem ser drones, obstáculos estáticos, móveis, ou ambos, em suas abordagens. Entre muitas contribuições que a subárea de pesquisa que desenvolve os estudos sobre colisões apresenta, selecionamos algumas abordagens para compor os nossos experimentos. O objetivo deste trabalho é analisar o impacto que os atrasos de comunicação podem causar nesses algoritmos anti-colisão e justificar um modelo que auxilie o drone na escolha de um algoritmo apropriado para cada situação ou cenário.

A comunicação também é uma subárea de pesquisa dos drones com muitos estudos. Chen et al. propõem um sistema de entregas baseado em tecnologia de Internet das Coisas [Chen et al. 2022]. Mansoor et al. selecionam e analisam 26 protocolos de roteamento desenvolvidos com diversas estruturas [Mansoor et al. 2023]. Os pesquisadores optam pelo enxame de drones e apresentam como algumas topologias de rede são aplicadas no desenvolvimento desses protocolos de comunicação. A pesquisa determina alguns parâmetros e desenvolve uma extensa análise de eficiência dos protocolos, em que são analisados requisitos como atraso e eficiência energética.

Entretanto, é necessário considerar as limitações desses sistemas. O algoritmo mais otimizado e eficiente precisa ser testado em diversos cenários. Embora exista a consolidação de inúmeras tecnologias aplicadas à comunicação, como, por exemplo, as conexões de rede celular, como o 5G e o futuro 6G, e os versáteis sensores de detecção e alcance de luz (Lidar, do inglês *Light Detection and Ranging*) [Mehendale and Neoge 2020], é evidente que os testes precisam atingir e entender os problemas mais profundos.

A proposta deste artigo é avaliar o atraso de comunicação em cinco estratégias de desvio: *FazerNada*, em que os drones não desviam, SeoKimKImTsourdos (SKKT) [Seo et al. 2017], SingleDrone, MultiDrone e SpeedDrone [Oliveira et al. 2023]. As quatro estratégias da literatura são geométricas, que usam informações de localização e velocidade dos drones e obstáculos para detectar e evitar colisões. O atraso é implementado em nossa versão modificada do simulador UTSim que contém as estratégias da literatura [Oliveira et al. 2023]. As simulações são configuradas com uma faixa de valores aleatórios aproximados do atraso real dos dispositivos de comunicação (5G, 6G e Lidar) e com duas faixas de valores superiores para considerar situações extremas nas quais tanto o atraso quanto o processamento apresentam durações maiores.

Os resultados dos experimentos apresentam poucas diferenças entre as situações de atraso testadas. A taxa de colisões intensifica-se conforme os atrasos aumentam, porém

a estratégia SKKT apresenta comportamento contraintuitivo. Ela obtém taxas menores de colisões ao ser afetada pelo atraso. Constatamos também que um modelo viável pode ser implementado com parâmetros baseados nos diferentes desempenhos dos algoritmos anticolisão em cada situação.

A contribuição deste artigo é a constatação de que os atrasos aplicados prejudicam significativamente a eficiência dos algoritmos, independente da tecnologia de comunicação. A consequência dessa afirmação é o desenho de um modelo multialgoritmo que seleciona a estratégia anticolisão mais adequada de acordo com a tecnologia presente em determinada região. Outra contribuição importante do nosso estudo é a corroboração de que, mesmo em atrasos com valores baixos, são grandes os efeitos nos algoritmos anticolisão.

Na próxima seção, explicamos os conceitos básicos sobre drones e na terceira seção são apresentados os trabalhos relacionados. Na quarta seção, discutimos como são realizados os experimentos. Por fim, na quinta seção, são apresentados os resultados seguidos de uma breve discussão na seção seguinte e, na última seção, trazemos as conclusões e considerações para novas descobertas nessa área.

2. Conceitos Básicos

A área de estudos sobre drones apresenta vários desafios, como a constituição do equipamento, a escassez da bateria, a complexa cinética de suas hélices [Li et al. 2021] e consequente movimento do equipamento para realizar as manobras. Ademais, a acomodação dos módulos e dos sensores também está sujeita à interferência gerada pelas hélices. Além dos ajustes no próprio equipamento, é necessário que a eficiência e a segurança sejam garantidas em suas operações [Telli et al. 2023].

As estratégias anticolisão trabalham com o propósito de prover condições ideais para que os drones trafeguem sem que colidam com algum objeto ou outros drones. Além das boas condições de segurança no tráfego aéreo, consequentemente, as pesquisas contribuem para a otimização das entregas aéreas. Nesse artigo, as colisões são a principal parte afetada pelos experimentos, pois é na operação das estratégias anticolisão que os atrasos são aplicados. Portanto, um dos problemas que tratamos nesse artigo é a comunicação.

Um sensor de obstáculos é um dispositivo comum aos drones e fundamental para as estratégias anticolisão. Por esse motivo, consideramos também nesse artigo uma operação de comunicação como sendo o estabelecimento de contato com um obstáculo (estático ou dinâmico) independentemente de haver um retorno intencional. Em outras palavras, uma detecção via sensor Lidar [Kellner et al. 2019], na qual o drone avista e mapeia o ambiente, ou uma comunicação estabelecida via conexões 5G e 6G são consideradas tipos de comunicação para o nosso experimento.

A escolha do atraso como parâmetro é a forma mais direta de simular os atrasos de comunicação. Tendo em vista que o atraso envolve um conjunto de adversidades que influenciam no tempo em que algo é iniciado até a obtenção do resultado, esse é o parâmetro mais coerente com os resultados que o artigo pretende alcançar.

2.1. Sensores Lidar

A tecnologia de sensores utilizada para fundamentar os experimentos desse artigo foi a Lidar, especificamente aplicada aos drones [Kellner et al. 2019]. O desenvolvimento desse

tipo de sensor a laser foi iniciado na década de 1960 e, desde então, tem se consolidado em setores privados e órgãos governamentais. Seu funcionamento consiste basicamente em luz laser disparada em direção aos objetos e, conseqüentemente, o retorno dessa luz refletida. Aplicada aos drones, o retorno da luz do sensor possibilita a descoberta da distância entre o obstáculo e o drone. Além disso, o sensor pode utilizar as informações retornadas em conjunto com sensores inerciais para estimar se algo está em movimento, mapear determinados objetos, entre outras atribuições.

Os modos de operação de um sensor Lidar podem variar. Alguns operam utilizando varredura pulsada, na qual o tempo em que a luz do laser leva para ir até o objeto e voltar para o sensor Lidar é obtido através de pulsos de luz laser. Ao passo que a técnica de varredura contínua utiliza um feixe de laser contínuo, modularizado e que consegue obter mais informações em sequência dos objetos. O segundo modo de operação supracitado é mais rápido e leva vantagem em relação ao primeiro por não ter que aguardar cada pulso enviado e por possibilitar varreduras angulares que criam figuras tridimensionais dos objetos [Zhou 2022, Mehendale and Neoge 2020].

A estimativa do atraso de um sensor Lidar depende de muitos fatores, tais como a calibragem do equipamento, a resolução, a técnica de operação, o processador para os cálculos, o posicionamento no equipamento, a potência do pulso, a distância do alvo, entre outros. Por esse motivo, é adotada uma faixa de valores aleatórios que variam de 20 a 50 ms para executar as simulações. É fato que existem sensores Lidar de baixo e médio porte que não são utilizados para demandas imediatas como as de detecção de colisão com objetos. Por esse motivo, esse estudo baseia-se apenas nos valores de atraso de sensores mais rápidos e precisos para esse tipo de operação.

2.2. Conexões 5G e 6G

Quando optamos pela comunicação via conexões 5G ou 6G, temos também a influência das antenas no atraso do sinal. A tecnologia atualmente mais em evidência no campo da pesquisa é o 6G, que ainda não tem uma faixa de valores consolidada. O 3GPP [3rd Generation Partnership Project (3GPP) 2023], que direciona parte dos seus estudos para as tecnologias de comunicação com drones, emitindo relatórios e especificações técnicas, até o momento da submissão desse artigo, não havia publicado nenhum estudo sólido sobre 6G. Entretanto, em [Mishra et al. 2021] é desenvolvido um estudo sobre o uso dos drones em redes 6G e os possíveis efeitos. Para os pesquisadores, o cenário com drones utilizando 6G exigirá ampla integração entre as tecnologias. O estudo apresenta as tecnologias que podem compor esse cenários e os desafios na comunicação a partir da perspectiva de redes de comunicações aéreas.

Masaracchia et al. analisam novas tecnologias para comunicação 5G e 6G em drones [Masaracchia et al. 2021]. O artigo de revisão apresenta uma pesquisa sobre o estado da arte das comunicações de baixa latência ultra confiáveis (URLLCs, do inglês *Ultra-reliable low-latency*), um novo conceito de rede que promete níveis de atraso abaixo de 1 ms. No entanto, algumas hipóteses são levantadas, como o problema do tamanho das mensagens, tecnologia das centrais de repetição, interferências de sinal, entre outros fatores que elevam para a média de 15 ms de atraso. Logo, baseado nesses dados e considerando eventuais problemas de comunicação, optamos por aplicar a faixa de valores aleatórios entre 5 ms e 20 ms para as simulações no contexto da tecnologia 6G.

Os valores médios para as simulações da conexão 5G foram estabelecidos a partir de relatórios da 3GPP [3rd Generation Partnership Project (3GPP) 2022]. Em condições ideais, fora do contexto dos drones, o atraso do 5G chega a valores aproximados de 20 ms. Contudo, considerando os problemas semelhantes ao 6G, que são comuns em comunicações, esses valores aumentam consideravelmente. Assim, baseado nos relatórios da 3GPP, que consideram a ida e a volta de um sinal que passa por uma torre de transmissão e pode sofrer os problemas supracitados, adotamos a faixa de valores para o 5G de 50 ms a 100 ms [3rd Generation Partnership Project (3GPP) 2022].

2.3. Abordagens Anticolisão

As estratégias de desvio anticolisão escolhidas para o estudo foram: SpeedDrone, MultiDrone e SingleDrone [Oliveira et al. 2023], SKKT [Seo et al. 2017] e a abordagem FazerNada. Essa última é incluída nas simulações como patamar de base das taxas de colisão, mas, como nenhum tipo de comunicação é envolvido nela, não faz sentido aplicar atrasos nessa abordagem. O funcionamento das estratégias escolhidas para a análise nesse artigo consiste basicamente na detecção do objeto estático ou dinâmico e posterior ação de prevenção da colisão. A abordagem que utiliza a estratégia FazerNada simula uma situação na qual o drone não possui algoritmo anticolisão e assume o risco de colisão.

O funcionamento básico inicial das estratégias SpeedDrone, MultiDrone e SingleDrone consiste em considerar uma esfera ao redor do drone como raio de detecção das tecnologias de comunicação, calcular a possibilidade de colisão e desviar caso necessário. No entanto, existem algumas diferenças entre elas. SingleDrone desvia do primeiro obstáculo que detecta e escolhe o menor ângulo de desvio para evitar o gasto de energia, enquanto as estratégias MultiDrone e SpeedDrone desviam de todos os obstáculos em rota de colisão. Outra diferença entre as estratégias é a velocidade. MultiDrone mantém a velocidade máxima e não a reduz se detectar uma colisão. SingleDrone começa com a velocidade máxima e a reduz pela metade se detectar uma colisão, enquanto SpeedDrone começa com uma velocidade aleatória entre o valor máximo e a sua metade e a reduz para um valor aleatório entre a velocidade atual e metade dela quando é detectada uma colisão.

A quarta estratégia geométrica utilizada em nosso estudo é proposta por Seo et al. [Seo et al. 2017] e aqui chamada de SKKT, que é uma estratégia anticolisão aplicável em drones individuais ou em enxames. Ela consiste em um envelope de prevenção de colisões que leva em consideração os limites da taxa de detecção de objetos e os ângulos para determinar a viabilidade de desvio. SKKT é composta do método que estabelece um ângulo de desvio em relação a todos os obstáculos que apresentam risco de colisão com um drone específico. No entanto, essa estratégia apresenta algumas ressalvas quanto ao número de drones simultâneos, variações de velocidades e o cenário bidimensional no qual ela foi testada. De toda forma, seus resultados e a relevância nos trabalhos relacionados a qualifica a compor os experimentos desse estudo.

3. Trabalhos Relacionados

Os algoritmos anticolisão visam deixar as viagens de drones mais seguras, utilizando diferentes estratégias para atingir esse objetivo. De Oliveira et al. propõem três estratégias geométricas de prevenção de colisões e comparam com estratégias da literatura [Oliveira et al. 2023]. As estratégias propostas reduzem significativamente a taxa

de colisões em comparação com todas as estratégias avaliadas, enquanto estratégias geométricas da literatura aumentam essa taxa. Os drones autônomos são apoiados por sensores Lidar [Kellner et al. 2019] e realizam entregas de pacotes. Resultados obtidos através de simulações compreendem a viagem desde a decolagem de um centro de distribuição de mercadorias, o voo em cruzeiro, aterrissagem e decolagem no local de entrega e retorno ao ponto inicial [Oliveira et al. 2023].

Em outras abordagens, os pesquisadores contrapõem uma estratégia probabilística com um método que utiliza Aprendizado por Reforço [Ouahouah et al. 2022]. Nas simulações desse estudo, são considerados outros fatores como consumo de energia e ambiente com muitos drones se movimentando aleatoriamente. Existem muitos outros estudos que tratam a problemática das colisões. As abordagens variam entre métodos geométricos [Oliveira et al. 2023], Aprendizado Profundo [Thumiger and Deghat 2022], Aprendizado por Reforço [Wang et al. 2020], dentre outros. São inúmeras variações e combinações de técnicas em busca de algoritmos eficientes que garantam segurança e otimizem as operações dos drones.

Entretanto, os algoritmos propostos na literatura não consideram o atraso em diferentes tecnologias de comunicação. O atraso causado na transmissão dos dados necessários para os algoritmos podem alterar ou inviabilizar a estratégia anticolisão ao gerar um grande aumento nas colisões. Este trabalho analisa cinco estratégias anticolisão sob atrasos causados por três tecnologias de comunicação e duas situações de atraso crítico. De acordo com o nosso conhecimento, não existem outros estudos que avaliam o atraso na comunicação em um sistema anticolisão para drones.

4. Metodologia

Esta seção apresenta a metodologia e está dividida em: seleção dos atrasos, plataforma de testes e cenário e implementação dos atrasos no simulador.

4.1. Seleção dos Valores para as Simulações

Para os valores selecionados para atraso, são considerados eventuais problemas no estabelecimento das conexões 5G e 6G: a estrutura tecnológica, como no caso de uma torre de comunicação e sua tecnologia, o tempo que uma informação demora até chegar em seu destino, entre outras questões. Apesar dos cenários de comunicações poderem ser auxiliados por algoritmos que atenuam problemas de atrasos, o propósito desse estudo é maximizar os efeitos de possíveis problemas em comunicação.

Também são consideradas duas simulações de situações hipotéticas que não correspondem a nenhuma tecnologia específica, mas que extrapolam o tempo médio de atraso e apresentam um cenário crítico. Por mais que os cenários acima de 100 ms até 1 s destoem dos valores dos atrasos médios para o 5G, 6G e Lidar, o propósito dessas duas situações é emular o pior cenário. Dada uma situação sem comunicação ou uma ocasional perda de sinal, o valor acima de 1 s iguala os efeitos da abordagem FazerNada. Em estudos futuros, esses valores poderão ser testados até que se esgote a eficiência dos algoritmos anticolisão, porém, nesse momento, determinamos o limite de 1 s como valor máximo da última faixa de valores aleatórios. A Tabela 1 define os valores para os diferentes tipos de atraso para as simulações.

Tabela 1. Faixas de atraso de comunicação para diferentes situações

Situação	Tipo do atraso	Atraso (ms)
S1	6G	5 – 20
S2	Lidar	20 – 50
S3	5G	50 – 100
S4	Atraso crítico 1	100 – 500
S5	Atraso crítico 2	500 – 1000

4.2. Plataforma de Testes e Cenário

Para se alcançar o objetivo da pesquisa, são aplicados os atrasos nos algoritmos anticollisão já implementados e funcionais [Oliveira et al. 2023]. Portanto, o ponto de partida do nosso estudo é a implementação dos atrasos nos algoritmos. O simulador UTSim utilizado em nossa pesquisa é um arcabouço baseado em *Unity* e desenvolvido para simulação de voos de drones [Al-Mousa et al. 2019].

Os experimentos são configurados com drones de asa rotativa e taxas médias de lançamento de 6 e 12 drones por minuto, efetuando decolagens e aterrissagens em uma área de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, conforme ilustrado na Figura 1, que representa a perspectiva superior do cenário simulado. Os círculos laranjas na imagem correspondem aos centros de distribuição. Nesses centros, são realizados os pousos e decolagens dos veículos e eles operam com a distância segura de 50 metros entre eles. A área central destacada em azul equivale a $0,81 \text{ km}^2$. Consideramos essa área um espaço de tráfego livre para os drones, no qual os veículos têm liberdade para trafegar em qualquer velocidade, altitude, latitude ou longitude.

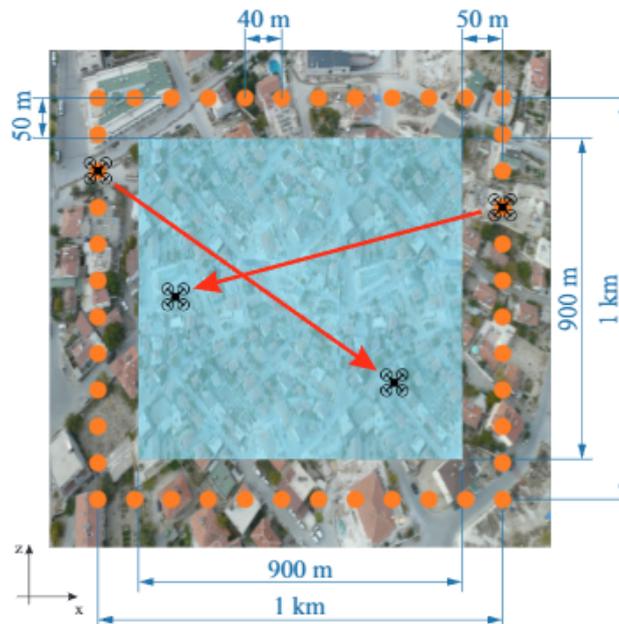


Figura 1. Vista superior do cenário para as simulações [Oliveira et al. 2023].

Sob a perspectiva apresentada na Figura 2, o cenário fica mais nítido e com-

preensível. O alto volume de drones em operação e os outros obstáculos aleatórios exigem que os algoritmos anticollisão tenham alto desempenho e garantam a segurança dos equipamentos. Portanto, o propósito das simulações é aproximar-se ao máximo das situações reais em operações de drones e entender os efeitos dos ocasionais problemas de comunicação.

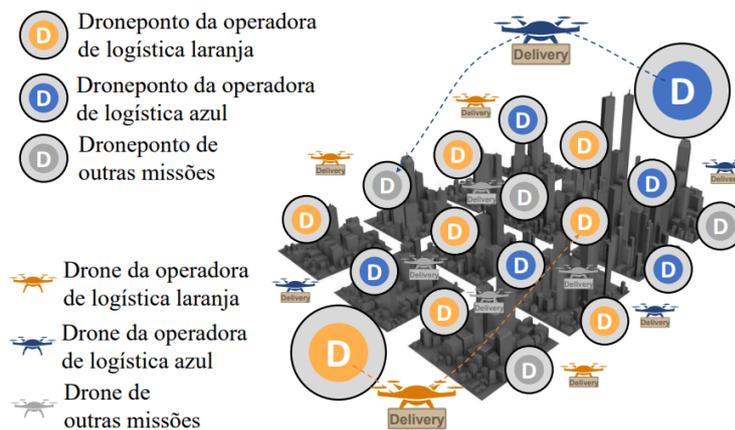


Figura 2. Cenário de serviço de entregas por drones [Oliveira et al. 2021].

4.3. Implementação dos Atrasos para as Simulações

Os atrasos implementados com faixas aleatórias são aplicados através de geradores de números aleatórios para o intervalo correspondente. Para as simulações do 6G, são estabelecidos valores aleatórios na faixa de 0,005 s a 0,020 s; para o Lidar, os valores de 0,020 s e 0,050 s; e, para o 5G, números entre 0,050 s e 0,100 s. Para as situações críticas, são geradas faixas de valores também aleatórias entre 0,100 s e 0,500 s para S4 e 0,500 s a 1,000 s para S5. A implementação do atraso é aplicada como condicional que permite a detecção de colisão somente após o término do tempo de atraso da comunicação. Isto é, toda vez que o drone detecta outro drone em seu raio de alcance, a comunicação dos dados necessários para a detecção sofre esse atraso e só então o processo de prevenção de colisões continua.

Os resultados das simulações das estratégias sem os atrasos são reutilizadas nas comparações [Oliveira et al. 2023]. Após as simulações, os dados são processados, os gráficos são gerados e são apresentados e explicados na próxima seção. Para a quantidade de drones, são utilizadas duas taxas que geram 6 e 12 drones por minuto. Em cada estratégia, são realizadas 30 execuções com cada taxa. A média de drones lançados por execução em cada taxa de lançamento é de 280 e 550, respectivamente.

5. Resultados

Em todos os cenários, os atrasos ocasionam elevado aumento das colisões nas demais estratégias, chegando ao ponto de igualar-se à FazerNada. De modo geral, os resultados gerados pelas simulações mantêm uma proporção conforme os atrasos são aplicados. Embora os atrasos não são aplicados na estratégia FazerNada, sua taxa de colisões fica acima das demais em todo o estudo, exceto em SKKT. Somente em alguns momentos, as taxas

de outras estratégias que são testadas com atrasos não apresentam diferenças estatísticas, considerando os intervalos de confiança.

Na Figura 3, são apresentados os resultados das simulações em cenários com conexão 6G. SpeedDrone é a estratégia mais afetada pelo atraso. O intervalo de confiança apresentado na Figura 3a, no qual o experimento é realizado com taxa de 6 drones por minuto, indica que SpeedDrone e FazerNada não apresentam diferenças estatísticas.

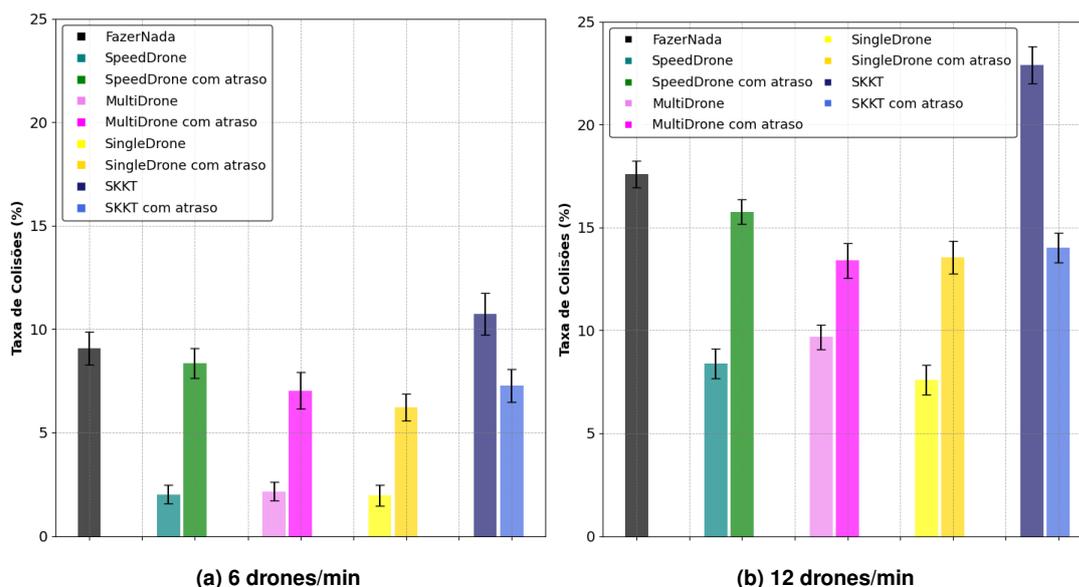


Figura 3. Simulações com atraso 6G.

A Figura 4 apresenta os resultados das simulações no cenário com o sensor Lidar e atesta que são semelhantes ao 6G. Entretanto, os resultados também são contraintuitivos, pois a taxa de colisões nas estratégias SpeedDrone e SingleDrone diminuem em relação ao cenário anterior, embora o atraso seja maior. O atraso aplicado para um sensor do tipo Lidar deveria aumentar o impacto na taxa de colisões dessas estratégias. A estratégia MultiDrone manteve a estabilidade nos cenários 6G e Lidar. O aumento na taxa de colisões permanece na mesma média, porém, as estratégias SpeedDrone e SingleDrone sofrem a redução do efeito do atraso em seus algoritmos. Novamente, SKKT apresenta comportamento contraintuitivo.

Nas simulações com atraso no contexto do 5G apresentados na Figura 5, em comparação aos resultados do Lidar, a estratégia SpeedDrone continua com taxas de colisão aumentando e se igualando a FazerNada. Contudo, a estratégia SingleDrone afetada pelos atrasos, considerando uma pequena margem do intervalo de confiança, ultrapassa as taxas da MultiDrone no cenário quando a taxa de lançamento de drones é de 6 drones por minuto.

Não obstante, outro fator que pode influenciar na alternância entre a segunda e a terceira estratégia como a mais afetada pelos atrasos pode ser a velocidade praticada ao detectarem um objeto. A estratégia MultiDrone mantém a velocidade máxima e não reduz se detectar uma colisão, a abordagem SingleDrone começa com uma velocidade máxima e a reduz pela metade se detectar uma colisão e a estratégia SpeedDrone inicia com velocidade aleatória e a reduz também aleatoriamente se detectar uma colisão. Essas tomadas

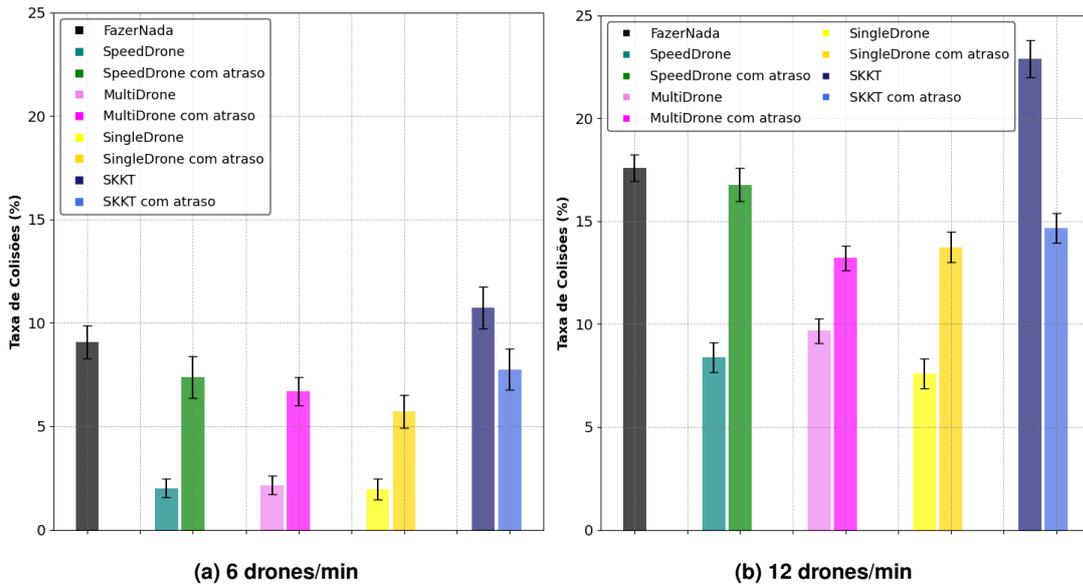


Figura 4. Simulações com atraso Lidar.

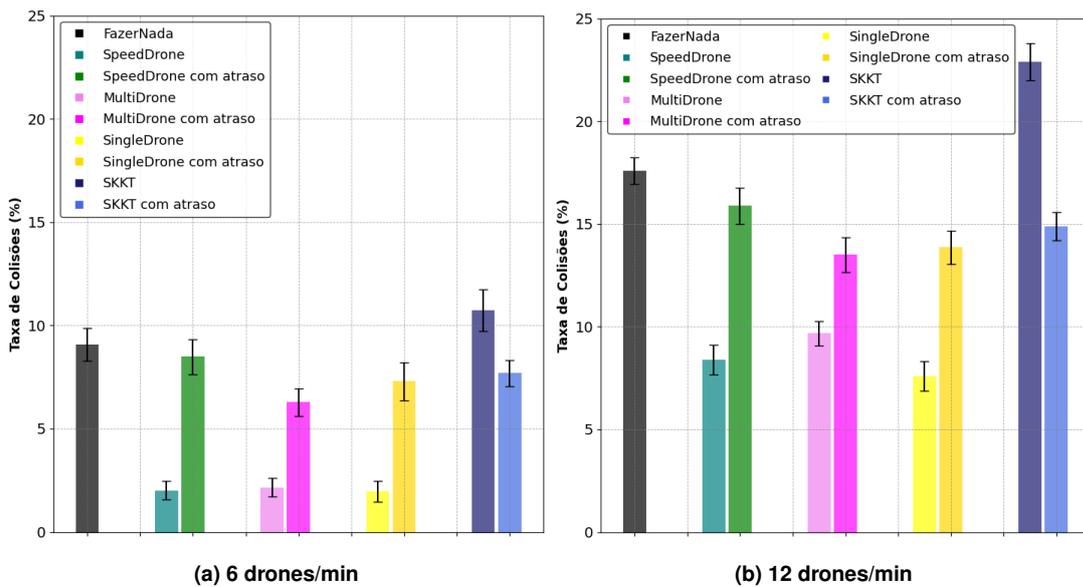


Figura 5. Simulações com atraso 5G.

de decisão dos algoritmos podem influenciar quando a comunicação é estabelecida após o atraso. Além do fato do aumento na taxa de chegada de drones também ser um agente influenciador nas simulações.

As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados das simulações com as faixas de atraso de 100 ms a 500 ms e 500 ms a 1000 ms das situações críticas. Essas simulações também apresentam dados interessantes e controversos. O resultado mais contraintuitivo continua sendo o da estratégia SKKT quando sofre atraso. Enquanto as demais estratégias aumentam suas colisões com o atraso, SKKT tem um resultado inverso. Contudo, SKKT apresenta uma menor redução na taxa de colisões para 6 drones por minuto, não apresentando diferenças estatísticas com SKKT sem atraso no atraso crítico de 100 ms a 500 ms. Nas

Figuras 6b e 7a, quando consideramos o intervalo de confiança, FazerNada não apresenta diferenças estatísticas com SpeedDrone com os atrasos.

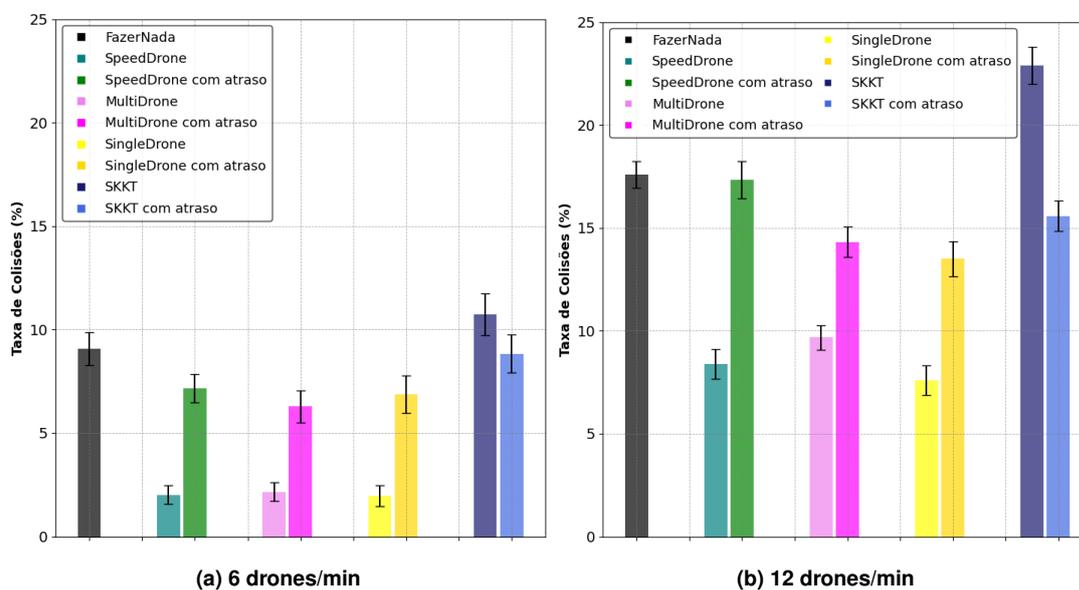


Figura 6. Simulações com atraso crítico de 0,1 s a 0,5 s.

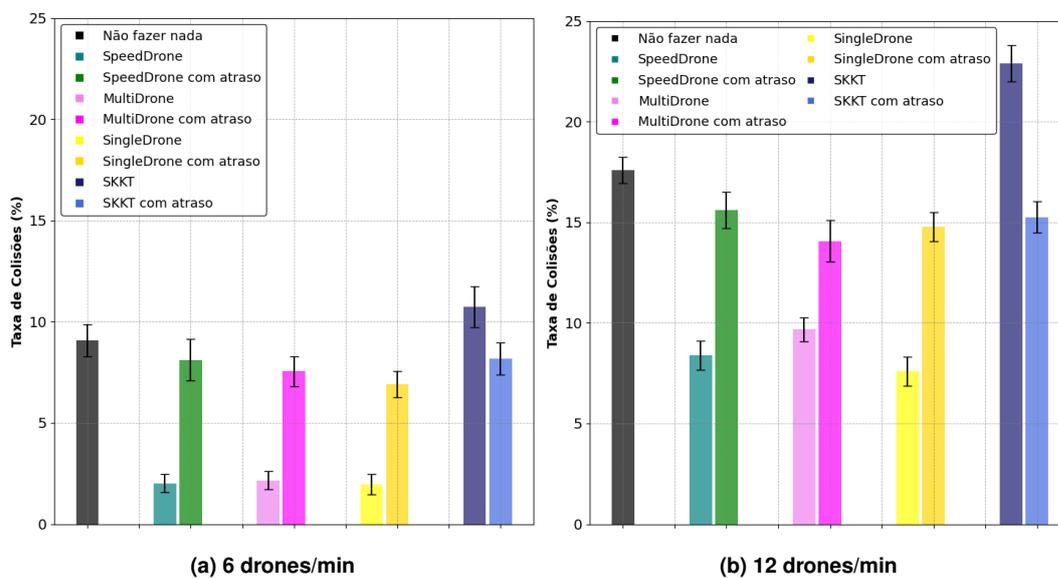


Figura 7. Simulações com atraso crítico de 0,5 s a 1 s.

Na última simulação, na qual são testados os algoritmos com faixas de atraso crítico com valores entre 500 ms e 1000 ms, há uma constatação interessante nos experimentos com taxa de 12 drones por minuto. Segundo a Figura 7b, todas as estratégias afetadas pelo atraso não apresentam diferenças estatísticas entre si e quase chegam ao nível da abordagem FazerNada. Essa constatação é um ponto de atenção muito importante: o fato do estado de “não ação” igualar-se à ação das estratégias desenvolvidas é um grande indício de que ajustes são necessários. Atrasos na maioria das estratégias prejudicam as ações dos algoritmos, ao passo que estratégias ineficazes como SKKT se beneficiam desses atrasos.

6. Discussão

O contexto da operação de drones necessita de inúmeras tecnologias que assegurem o trânsito desses veículos no cotidiano das empresas e cidadãos. As linhas de pesquisas e suas especificidades apontam para uma área em constante desenvolvimento e para a necessidade de estudos mais aprofundados. Algumas discussões, como a autonomia das baterias, a comunicação (objeto desse estudo), dispositivos e protocolos, a adoção ou não de inteligência artificial nos algoritmos anticollisão, formações com enxames de drones, procedimentos de decolagens e aterrissagens, entre outras especificidades, são áreas em aberto que ainda precisam ser exploradas.

Esse estudo apresenta resultados relevantes que poderão ser considerados em futuras pesquisas. O efeito do atraso nos algoritmos anticollisão não gera um resultado plenamente previsível. Por mais que as colisões aumentem conforme atrasos maiores são aplicados, o comportamento dos algoritmos divergem na maneira que foram afetados. Não é necessário ocorrer um atraso tão alto quanto o de 500 ms a 1000 ms para impactar as estratégias anticollisão. As taxas de colisão, mesmo com o baixo atraso aplicado nas simulações com comunicações 5G, 6G ou Lidar, sofrem um considerável aumento em todas as estratégias e cenários, exceto na estratégia SKKT que se beneficia da aplicação dos atrasos em quase todos os cenários. Entretanto, essa estratégia opera com taxas de colisão muito altas em condições normais, logo, podemos deduzir que o número de decisões equivocadas deste algoritmo durante os desvios diminui e, assim, produz os resultados contraintuitivos.

Algumas estratégias chegam a triplicar suas colisões quando afetadas pelos atrasos implementados. As estratégias SpeedDrone e SingleDrone que tinham média de 2% de colisões alcançam valores de 7% em simulações com atrasos na faixa de 100 ms a 500 ms e taxas de 6 drones por minuto. Nas simulações com atrasos na faixa de 500 ms a 1000 ms, além das estratégias SpeedDrone e SingleDrone, a estratégia MultiDrone também tem seus resultados triplicados. Anteriormente, tinham média de 2% e, após a ação dos atrasos, os valores ultrapassam 7%.

A velocidade dos drones é um fator relevante e precisa ser levada em consideração. Todas as estratégias trabalham com procedimentos diferentes tanto em relação à velocidade no momento da detecção do objeto quanto no momento do desvio. Em conjunto a essa variável, o momento da viagem e a ação dos outros drones também são aspectos muito importantes. Diante disso, a hipótese de operar com diversos algoritmos anticollisão simultaneamente, sendo selecionados de acordo com o cenário, é uma abordagem promissora. Esse modelo multialgoritmos selecionaria o melhor algoritmo de acordo com a demanda, ou seja, o atraso modelaria a situação da comunicação. Um modelo que trabalhe com o atraso como variável de escolha do melhor algoritmo e é parametrizado com os resultados dessa pesquisa se encaixa adequadamente a esse tipo de problema.

As condições nas quais os drones trafegam são diversas e podem variar de acordo com a situação. O cenário de entregas aéreas poderá impor condições climáticas que ocasionem ruídos na comunicação, alta densidade de drones, falha de equipamentos, entre outras. Contudo, essas condições precisam ser tratadas para que a operação seja segura e possamos otimizar a operação dos drones, que é o eixo principal das pesquisas nesse contexto. Como constatado nesse estudo, atrasos de menos de 1 segundo geram grande diminuição na eficiência dos algoritmos anticollisão. Dessa maneira, evitar o aumento do

atraso de forma estrutural e combinar as características dos algoritmos de acordo com a tecnologia presente numa região são passos promissores para a solução desse problema.

7. Conclusão

Esse artigo avalia o impacto de atrasos de comunicação nos algoritmos anticollisão de drones. Através de experimentos implementados no arcabouço UTSim, são simuladas e testadas estratégias anticollisão de drones em situações de atraso de comunicação. Na avaliação dos cenários, há poucas diferenças entre os resultados com os atrasos estimados para o 5G, 6G, Lidar e os atrasos críticos. A taxa de colisões intensifica-se conforme os atrasos aumentam. Constatamos que até as faixas de atraso mais baixas experimentadas nas simulações causaram aumentos significativos na taxa de colisões.

Outra constatação importante é que o atraso na comunicação dos drones pode aumentar ou diminuir as colisões. Os algoritmos funcionam de formas diferentes, diferenciando-se pela velocidade da ação anticollisão e velocidade em cruzeiro. O propósito desse artigo é, assim, avaliar a aplicação desses atrasos como forma de selecionar e parametrizar os algoritmos de acordo com as situações propostas.

Embora o presente trabalho tenha apresentado resultados relevantes, para futuras pesquisas, seria interessante avançar no desenvolvimento de algoritmos que solucionem o problema das colisões. A inserção do problema da comunicação no contexto dos algoritmos anticollisão determina que se desenvolvam pesquisas mais profundas nessa área. Uma abordagem multidisciplinar que considere os resultados deste estudo e a análise dos protocolos de comunicação ou dos sensores utilizados em drones podem produzir avanços significativos nessa área de pesquisa.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2021/00199-8, CPE SMARTNESS, e FAPESP processo 2023/16328-7. 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

- 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2022). 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Work Plan. https://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/. Acessado em 22 de janeiro de 2023.
- 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2023). Resultados de busca para “6G”. <https://www.3gpp.org/component/finder/search?q=6g&f=4&Itemid=101>. Acessado em 22 de janeiro de 2023.
- 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(5):1–19.
- 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.

- Huang, S., Teo, R. S. H., and Tan, K. K. (2019). Collision avoidance of multi unmanned aerial vehicles: A review. *Annual Reviews in Control*, 48:147–164.
- Kellner, J. R., Armston, J., Birrer, M., Cushman, K., Duncanson, L., Eck, C., Falleger, C., Imbach, B., Král, K., Krček, M., et al. (2019). New opportunities for forest remote sensing through ultra-high-density drone lidar. *Surveys in Geophysics*, 40:959–977.
- Li, Y., Yonezawa, K., and Liu, H. (2021). Effect of ducted multi-propeller configuration on aerodynamic performance in quadrotor drone. *Drones*, 5(3).
- Mansoor, N., Hossain, M. I., Rozario, A., Zareei, M., and Arreola, A. R. (2023). A Fresh Look at Routing Protocols in Unmanned Aerial Vehicular Networks: A Survey. *IEEE Access*, 11:66289–66308.
- Masaracchia, A., Li, Y., Nguyen, K. K., Yin, C., Khosravirad, S. R., Costa, D. B. D., and Duong, T. Q. (2021). UAV-Enabled Ultra-Reliable Low-Latency Communications for 6G: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 9:137338–137352.
- Mehendale, N. and Neoge, S. (2020). Review on lidar technology. Available at SSRN.
- Mishra, D., Vegni, A. M., Loscrí, V., and Natalizio, E. (2021). Drone networking in the 6g era: A technology overview. *IEEE Communications Standards Magazine*, 5(4):88–95.
- Oliveira, F., Bittencourt, L., 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, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- 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*.
- Ouahouah, S., Bagaa, M., Prados-Garzon, J., and Taleb, T. (2022). Deep-Reinforcement-Learning-Based Collision Avoidance in UAV Environment. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(6):4015–4030.
- Rodrigues, T. A. and outros (2022). Drone flight data reveal energy and greenhouse gas emissions savings for very small package delivery. *Patterns*, 3(8):100569.
- Seo, J., Kim, Y., Kim, S., and Tsourdos, A. (2017). Collision Avoidance Strategies for Unmanned Aerial Vehicles in Formation Flight. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 53(6):2718–2734.
- Telli, K., Kraa, O., Himeur, Y., Ouamane, A., Boumehraz, M., Atalla, S., and Mansoor, W. (2023). A comprehensive review of recent research trends on unmanned aerial vehicles (uavs). *Systems*, 11(8).
- Thumiger, N. and Deghat, M. (2022). A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Approach for Practical Decentralized UAV Collision Avoidance. *IEEE Control Systems Letters*, 6:2174–2179.
- Wang, D., Fan, T., Han, T., and Pan, J. (2020). A Two-Stage Reinforcement Learning Approach for Multi-UAV Collision Avoidance Under Imperfect Sensing. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2):3098–3105.
- Zhou, J. (2022). A Review of LiDAR sensor Technologies for Perception in Automated Driving. *Academic Journal of Science and Technology*, 3:255–261.