

Um Protocolo de Roteamento Store-Carry-Forward para Unir Redes de Ônibus e Internet dos Drones

Lailla M. S. Bine^{1,2}, Azzedine Boukerche¹, Linnyer B. Ruiz³, Antonio A. F. Loureiro²

¹PARADISE Research Laboratory, University of Ottawa, Ottawa, Canadá

²Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

³Grupo de Pesquisa Manna, Universidade Estadual de Maringá, Brasil

laillabine@dcc.ufmg.br, boukerch@site.uottawa.ca,
lbruiz@uem.br, loureiro@dcc.ufmg.br

Abstract. *Internet of Drones (IoD) is an architecture that aims to enable different drones to share the same airspace. Store-carry-forward protocols may be suitable for maintaining network communication. Moreover, different networks can collaborate to fill these communication gaps. The main goal of this work is to present the IoDSCF – a store-carry-forward routing protocol for joint Bus Networks and IoD. IoDSCF takes advantage of both networks to extend the communication reachability. IoDSCF presents a better packet delivery rate and end-to-end delay than a solution based only on communication between drones. This is a promising strategy for data communication, mainly in smart cities.*

Resumo. *A Internet of Drones (IoD) é uma arquitetura que possibilita que diferentes drones compartilhem o mesmo espaço aéreo. Um protocolo store-carry-forward pode ser adequado para manter a comunicação na rede. Além disso, diferentes redes podem colaborar para preencher as lacunas de comunicação. O objetivo principal deste trabalho é apresentar o IoDSCF – um protocolo de roteamento store-carry-forward para integrar redes de ônibus e IoD. O IoDSCF aproveita essas redes para estender a acessibilidade da comunicação. IoDSCF apresenta uma melhor taxa de entrega de pacotes e atraso fim-a-fim do que uma solução baseada apenas na comunicação entre drones. Esta é uma estratégia promissora para comunicação de dados em cidades inteligentes.*

1. Introdução

Os drones, conhecidos como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), estão sendo usados em ambientes urbanos e não urbanos, em aplicações como transporte, agricultura, segurança e proteção, monitoramento ambiental, entretenimento, fotogrametria, comunicação e saúde, para citar algumas (Alsamhi et al., 2019; Oubbati et al., 2020). Atualmente, em fotogrametria e agricultura, é comum aplicações que envolvem drones usem apenas um único dispositivo. Por outro lado, há aplicações que certamente usarão vários drones como, por exemplo, entrega de objetos, saúde, monitoramento de tráfego urbano e assistência em desastres ambientais.

Em breve, espera-se que algumas aplicações multi-drones se juntem ao ambiente de IoT em cidades inteligentes. A entrega por drone, por exemplo, tem recebido muito interesse de grandes empresas como Amazon¹, Google², DHL³ e Uber Eats⁴.

¹<https://bit.ly/3dzshIF>

²<https://wing.com/>

³<https://bit.ly/dronedhl>

⁴<https://bit.ly/2THRwRp>

Considerando que muitas aplicações irão compartilhar o espaço aéreo, a sua organização e coordenação será necessária. Assim, Gharibi et al. (2016) propuseram a Internet dos Drones (IoD) com o objetivo de fornecer um ambiente seguro para serviços e aplicações de drones. Em IoD, espera-se a existência de um fluxo de tráfego permanente como é o caso de redes veiculares, que eventualmente podem ser combinadas para facilitar a comunicação fim-a-fim. Nesse caso, uma possível estratégia é a abordagem *store-carry-forward* (SCF) (Sami Oubbati et al., 2020), que armazena a mensagem até que um vizinho disponível seja encontrado para transmiti-la.

Como o tráfego em redes veiculares é dinâmico e possui cenários densos e esparsos, diferentes estratégias são necessárias para rotear pacotes nos casos em que poucos drones estão utilizando a rede aérea. Além disso, outras redes podem colaborar com a IoD para manter a conectividade entre os nós. Uma das redes que pode ser integrada à IoD é a rede de ônibus (Bus Network – BN). As BNs fazem parte das Redes de Transporte Público (PTNs), que têm características previsíveis quanto à periodicidade e trajeto de seus veículos. Assim, em uma integração das duas redes é possível planejar o trajeto dos drones considerando as rotas de transporte público, levando a uma entrega de mensagens mais eficiente em termos de custo, confiabilidade e flexibilidade. Esse é o tema central deste artigo considerando cenários que estarão disponíveis mais frequentemente no futuro, como é o caso de cidades inteligentes.

Especificamente, as principais contribuições deste trabalho compreendem: apresentar uma arquitetura topológica de vias aéreas para drones em cidades inteligentes; apresentar um método para o planejamento de trajetórias de drones auxiliado por trajetórias de ônibus; e introduzir o protocolo IoDSCF, uma solução de roteamento *store-carry-forward* para BNs e IoD. Os resultados obtidos mostram que o protocolo IoDSCF tem melhor desempenho em termos de número de pacotes de entrega e atraso fim-a-fim do que um protocolo com apenas comunicação drone-drone.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 discute a motivação e os trabalhos relacionados deste estudo. A Seção 3 apresenta uma arquitetura topológica de vias aéreas para drones em cidades inteligentes. A Seção 4 descreve o cenário de vias aéreas utilizado neste trabalho. A Seção 5 apresenta uma estratégia para criar o planejamento de rotas de drones considerando trajetórias de ônibus. A Seção 6 apresenta o protocolo de roteamento IoDSCF. A Seção 7 apresenta os parâmetros de simulação usados na avaliação e a Seção 8 discute os resultados obtidos. Por fim, a Seção 9 apresenta as conclusões.

2. Trabalhos Relacionados e Motivação

Recentemente, muitas empresas investiram em projetos relacionados à entrega de mercadorias usando drones, como Google, Amazon, DHL, Uber Eats, para citar alguns. Assumindo um cenário em que a entrega de drones seja viável, drones diferentes precisam compartilhar o mesmo espaço aéreo. Além disso, é razoável esperar que haja uma maior concentração de drones nas áreas urbanas centrais. Outro ponto é que para compartilhar o mesmo espaço aéreo, os drones precisam trocar mensagens para garantir a segurança e o bom funcionamento da rede. Assim, Gharibi et al. (2016) propuseram a Internet dos Drones (IoD) para coordenar o acesso desses dispositivos ao espaço aéreo.

As vias aéreas podem ter um fluxo denso ou esparsos de veículos, dependendo da programação e do fluxo de drones. Por exemplo, um aumento no tráfego pode ocorrer nos horários das refeições. Por outro lado, vias terrestres podem ter quase nenhum tráfego

ao amanhecer. A densidade de drones nas vias aéreas também pode estar relacionada à região. Em grandes centros, por exemplo, o trânsito pode ser mais frequente, enquanto em bairros mais distantes, o trânsito pode ser mais esparsos.

Para facilitar a organização do espaço aéreo, a IoD emprega vias aéreas, que por sua vez precisam ter regulamentos e leis para sua utilização, controle e organização. O nó responsável pela coordenação dos drones é o *Zone Service Provider* (ZSP). Na IoD, o ZSP é responsável pelo controle do espaço aéreo.

A Figura 1 ilustra um cenário em que o drone *A* precisa enviar uma mensagem para o ZSP, mas não há um drone em seu alcance. Um drone precisa enviar uma mensagem para o ZSP em diversos momentos como, por exemplo, em uma situação de falha no hardware (Gharibi et al., 2016). No meio do caminho, há um ônibus que pode ser usado como um nó intermediário e encaminhar a mensagem para o drone *B*. As BNs são previsíveis por terem rotas e normalmente horários bem definidos disponibilizados no formato GTFS⁵. Os drones podem ter seu trajeto projetado para seguir caminhos em que há fluxos de ônibus para melhorar o desempenho da colaboração. Assim, este trabalho propõe o protocolo IoDSCF – um protocolo store-carry-forward para integrar redes de ônibus e IoD.

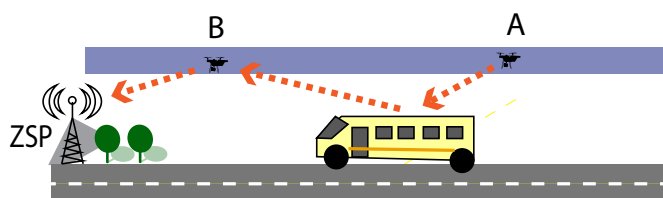


Figura 1. Exemplo de comunicação IoD auxiliada por ônibus

Um protocolo store-carry-forward é normalmente usado sempre que a fragmentação da rede ocorre (Sami Oubbati et al., 2020). Quando uma rede está fragmentada, muitas vezes não é possível ter caminhos disponíveis entre nós origem e destino. Assim, usamos essa técnica para conectar drones em cenários esparsos.

Na literatura, existem alguns trabalhos recentes relacionados à colaboração entre drones e outras redes, como redes veiculares (Bouachir et al., 2020), redes IoT (Labib et al., 2021), redes celulares (Qin et al., 2020), e PTNs (Choudhury et al., 2021; Jin et al., 2021; Pan et al., 2021; Qi et al., 2021). Algumas propostas se concentram em drones como auxílio a outras redes. Por exemplo, Fawaz et al. (2017) usaram drones como nós store-carry-forward para redes veiculares. Assim, o objetivo é melhorar a conectividade e diminuir o atraso na entrega de pacotes em uma rede veicular. No entanto, nosso trabalho foca no oposto, ou seja, utilizar outras redes para auxiliar a IoD. Especificamente, nosso objetivo é a colaboração entre drones e PTNs, especificamente BNs.

Apesar de haver mais de um drone envolvido nos estudos, nenhum trabalho especifica que os drones estejam em rede com comunicação entre eles. Outro ponto é que a maioria das propostas tem foco nas PTNs auxiliadas por drones. No entanto, Qi et al. (2021) usaram drones para identificar áreas de risco para pontos de ônibus. Além disso, até onde sabemos, nosso trabalho é o primeiro que explora a colaboração de IoD e BNs no projeto de protocolos de roteamento para este cenário.

A Tabela 1 apresenta estudos relacionados a UAVs, IoD e protocolos store-carry-forward, alguns deles relacionados a drones e protocolos de roteamento store-carry-

⁵General Transit Feed Specification, <https://bit.ly/3BU1O58>

forward. Essas propostas se concentram no uso de drones para auxiliar redes veiculares e melhorar a conectividade de veículos. Alguns deles lidam com problemas específicos, como seleção de relés (He et al., 2020) e mudanças frequentes de topologia (Oubbati et al., 2017). No entanto, nenhum deles usa a IoD para cooperar com redes veiculares.

Tabela 1. Estudos relacionados aos protocolos UAV, IoD e Store-carry-forward

Ano	Ref.	Cenário	SCF	Objetivo principal
2017	(Fawaz et al., 2017)	UAV-VANETs	✓	Usa UAVs como nós Store-carry-forward para redes de veículos
2017	(Oubbati et al., 2017)	UAV-VANETs	✓	Há duas abordagens: entrega de pacotes de dados exclusivamente em vias terrestres, e transmissão de pacotes em vias aéreas usando um protocolo de roteamento reativo
2019	(Khabbaz et al., 2019)	UAV-VANETs	✓	Investigar a capacidade de UAVs de servirem como possíveis relés
2020	(Sami Oubbati et al., 2020)	UAV-VANETs	✓	Um protocolo reativo para VANETs auxiliados por UAVs
2020	(He et al., 2020)	UAV-VANETs	✓	Investigar o problema de seleção de relé para VANETs assistidos por UAVs
2021	(Bine et al., 2021)	IoD		Um protocolo geocast baseado em vias aéreas para IoD
2022	IoDSCF	IoD auxiliado por BN	✓	Protocolo de roteamento store-carry-forward para redes IoD com colaboração de BNs

Nosso trabalho anterior (Bine et al., 2021) é o único protocolo de roteamento, até onde sabemos, que usa o cenário IoD com vias aéreas bem definidas. No entanto, o trabalho (Bine et al., 2021) é um protocolo geocast para IoD. Assim, este é o primeiro estudo a investigar o caso de redes esparsas com protocolo de roteamento store-carry-forward para IoD com vias aéreas bem definidas. Este trabalho apresenta um novo protocolo de roteamento store-carry-forward para IoD que conta com a colaboração de BNs para preencher as lacunas na comunicação de drones.

3. Arquitetura Topológica da Via Aérea

Esta Seção propõe uma arquitetura topológica de vias aéreas para IoD. Como mencionado, espera-se que em breve os drones desempenhem um papel maior nas cidades inteligentes (Alsamhi et al., 2019). A entrega de produtos por drone provavelmente levará a um maior fluxo de tráfego. Além disso, outros aplicativos, como monitoramento e detecção de cidades inteligentes, compartilharão o mesmo espaço aéreo. Além disso, algumas aplicações podem fornecer serviços com mais urgência, descritos a seguir.

3.1. Vias Aéreas Paralelas às Vias Terrestres

Um dos grandes desafios de IoD é determinar por onde as vias aéreas podem passar. Para superar este problema é possível fazer um paralelo das vias aéreas com as estradas terrestres existentes. Assim, os drones só passariam por áreas públicas permitidas. O uso de vias aéreas paralelas às estradas terrestres pode ajudar a organizar o tráfego de drones e facilitar a construção de leis que regulem o tráfego. Além disso, essa estrutura pode ajudar a aceitar drones pela sociedade, pois as pessoas saberão exatamente por onde os drones podem ir. A Figura 2-A exemplifica vias aéreas paralelas às rotas terrestres.

A Figura 2.a classifica as vias em públicas e privadas. Empresas e agências governamentais podem ter vias aéreas dentro de suas propriedades para permitir a entrega de produtos, onde apenas drones autorizados podem entrar. Essa configuração ajuda a proteger áreas onde o voo de drones é proibido, como aeroportos e prédios governamentais.

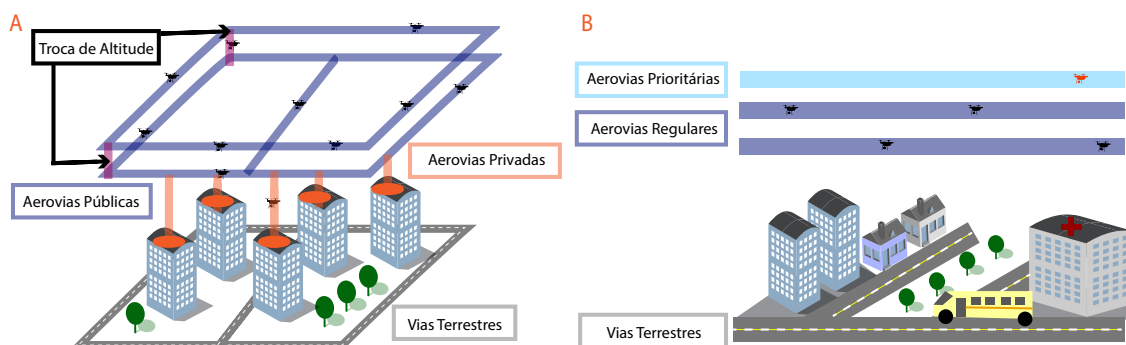


Figura 2. (a) Vias aéreas paralelas às vias públicas × vias privadas. (b) Vias aéreas prioritárias

3.2. Vias aéreas sobrepostas

As áreas centrais das cidades com muitas áreas de entrega podem ter tráfego pesado de drones. Esse fato pode causar congestionamento no tráfego de drones e afetar a segurança rodoviária. Espera-se que quanto maior o trânsito, maiores as chances de ocorrência de acidentes inesperados. Portanto, em algumas áreas da cidade, serão necessárias mais vias aéreas para acomodar o tráfego de drones. Conforme ilustrado na Figura 2.a, essas vias aéreas podem ser sobrepostas formando novos caminhos. Nessa arquitetura, os drones podem mudar de altitude usando vias aéreas específicas. Além disso, essa arquitetura ainda segue a regra de permitir vias aéreas apenas paralelas às vias terrestres.

3.3. Vias aéreas prioritárias

Drones têm sido usados em aplicações tão diversas como microbiologia e doenças infecciosas (Hii et al., 2019; Poljak & Šterbenc, 2020). Alguns usos são a entrega de medicamentos e outros produtos relacionadas à saúde, como sangue, órgãos, suprimentos médicos e equipamentos (Poljak & Šterbenc, 2020). Os drones também têm sido usados no combate à pandemia da Covid-19 (Skorup & Haaland, 2020). Por exemplo, no monitoramento de áreas afetadas pela doença, pulverização aérea e desinfecção e entrega de sangue e medicamentos (Lamprey & Serwaa, 2020; Gupta et al., 2021).

Esse tipo de entrega está relacionado a salvar vidas. Assim, algumas categorias de entrega devem ser priorizadas. Além disso, diferentes tipos de aplicações podem se beneficiar da prioridade no uso de vias aéreas, por exemplo, em missões de busca e salvamento. A Figura 2.b ilustra as vias aéreas prioritárias e regulares que podem ser usadas para diferentes finalidades e ocasiões.

4. Definição de cenário

Como mencionado, o principal objetivo da IoD é fornecer segurança e coordenar o acesso ao espaço aéreo. Neste trabalho, a IoD é composta por quatro componentes: um conjunto de drones D , um único ZSP que coordena os drones, um grafo G representando as vias aéreas e suas conexões, e um conjunto P de rotas. Para isso, temos as definições:

- ZSP: responsável por coordenar o conjunto de drones D ;
- Vias aéreas: semelhantes a um cenário rodoviário urbano real. O conjunto de estradas/vias aéreas e suas interseções formam um grafo direcionado $G = (V, E)$. Cada interseção é um vértice $v \in V$ e cada estrada uma aresta $e \in E$, definida pela tripla $\langle v_{source}, v_{destination}, altitude \rangle$. Um vértice v é um ponto 3D no espaço representado pela tripla $\langle x, y, z \rangle$;

- Drones: Cada drone $d \in D$ tem um planejamento de caminho e só podem voar por uma via aérea;
- Planejamento de caminho: Cada drone tem um caminho pré-definido $p \in P$, formado por uma sequência de vértices, sendo o primeiro a origem e o último o destino, e os demais pontos intermediários usando as arestas correspondentes;

Neste estudo, uma BN é uma rede composta apenas por ônibus públicos, que possui três componentes: conjunto de ônibus B , grafo T representando as estradas e seus cruzamentos, e um conjunto W de rotas de ônibus. Seus componentes são:

- Estradas terrestres: estradas e seus cruzamentos que formam um grafo direcionado $T = (N, R)$. Cada interseção é um vértice $n \in N$ e a estrada é uma aresta $r \in R$. Considerando que as estradas estão na altitude $z = 0$, um vértice n é uma tupla $\langle x, y \rangle$. Além disso, uma estrada r é uma tupla $\langle n_{source}, n_{destination} \rangle$;
- Ônibus: cada ônibus $b \in B$ tem uma rota que só podem circular numa estrada;
- Rotas de ônibus: cada ônibus tem uma rota pré-definida $w \in W$ identificada por arestas. Assim, é possível saber quando um ônibus b está em um dado local.

Uma BN, semelhante a um cenário real, é utilizada para simular a rede híbrida. Usamos o conjunto de dados RioBuses⁶ que teve seus dados coletados do sistema de transporte público da cidade do Rio de Janeiro, no dia 1/10/2014. A área utilizada faz parte do bairro de Ipanema, conforme ilustrado na Figura 3.a.

Neste trabalho, utilizamos a arquitetura apresentada na Seção 3. Assim, temos as vias aéreas paralelas às ruas. Um grafo das principais vias foi gerado para criar a simulação de rotas e vias aéreas, ilustrado na Figura 3.b. Além disso, a maioria das vias aéreas tem a mesma direção que sua via correspondente terrestre.

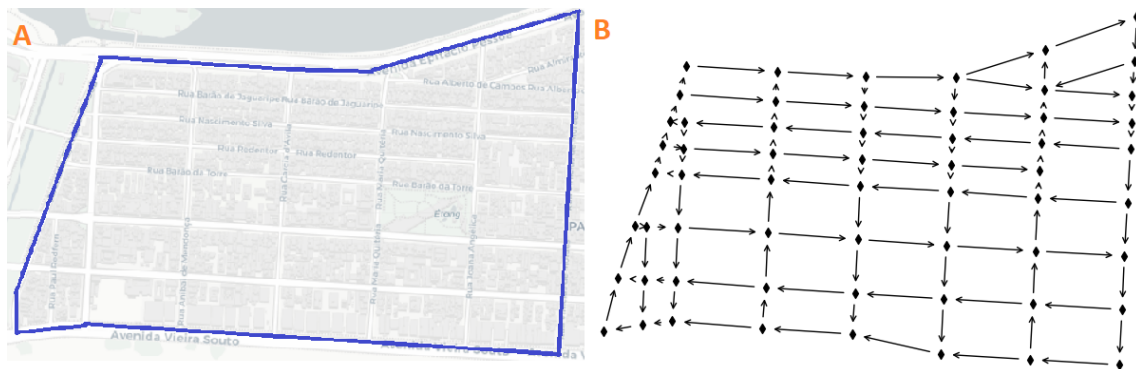


Figura 3. (a) região de Ipanema, Rio de Janeiro. (b) grafo dessa região

Cada via aérea tem apenas uma direção. Para melhor adequar o mapa ao simulador, apenas o trecho mais à direita teve seu sentido alterado em relação às estradas reais. Na vida real, as ruas são no sentido oposto ao utilizado. Esse cenário possui aproximadamente 15154 m de vias aéreas que são cilíndricas com um raio de 1 m.

O drone pode voar dentro desse espaço cilíndrico, mas não além das bordas. Os drones não voam em linha reta e podem sofrer alguma ação externa que afete sua trajetória, como o vento. Nesse trabalho, para simular a trajetória do drone foi utilizado o modelo de mobilidade Gauss-Markov. No cenário avaliado, as vias aéreas de decolagem e pouso não foram especificadas. Cada drone simulado tem um ponto de partida e um ponto de

⁶<https://crawdad.org/coppe-ufri/RioBuses/20180319/>

chegada na rota. Assim, assume-se que existe uma via aérea para decolagem e outra para pouso nos pontos escolhidos para início e fim da rota.

5. Planejamento de trajetos de drones auxiliados por trajetórias de ônibus

Em um cenário onde drones trabalham em conjunto com outras redes, eles devem aproveitar características dessas redes. PTNs são redes consolidadas, onde é possível rastrear ônibus usando uma IoT (Patel et al., 2019). Por exemplo, os usuários podem rastrear os ônibus em tempo real e saber melhor se um ônibus já passou por uma parada ou não (Patel et al., 2019). Uma característica essencial da rede é que ela é bastante previsível, considerando o dia da semana e a hora do dia.

Considerando esses fatos, as BNs podem colaborar com a IoD. Os drones podem ter seus planejamentos de trajetos vinculados às rotas de ônibus para que essa colaboração seja eficiente. A Figura 4 ilustra a densidade de ônibus em Ipanema, no dia 01/10/2014, entre 11h00m e 11h10m. É possível observar quais ruas possuem rotas de ônibus e quais são frequentemente utilizadas. Assim, vamos supor que uma empresa de drones que faz entregas esteja localizada em Ipanema e tenha entrega nessa mesma região. O drone que fará a entrega pode ter sua rota planejada para dar preferência a vias aéreas em que também haja rotas de ônibus em terra. Este fato permite a colaboração entre as redes.

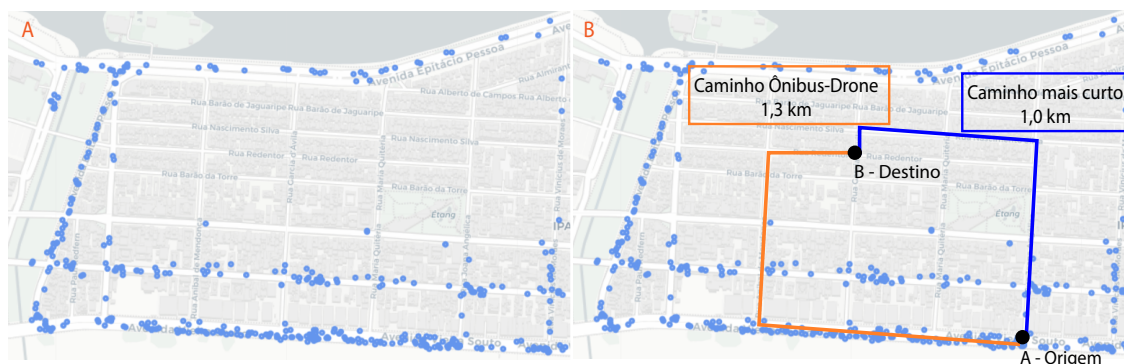


Figura 4. (a) Densidade de rotas de ônibus em Ipanema, 01/10/2014, das 11h00m às 11h10m. (b) Exemplo de caminho mais curto e caminho de ônibus-drone para entregar um pacote do ponto A ao ponto B

Pode-se observar na Figura 4.a que nesse período, há áreas em que a densidade de ônibus é alta, outras onde é baixa e algumas onde os ônibus não passam. É bastante razoável supor que existem muitos cenários semelhantes na vida real. Assim, conforme mostrado no exemplo, algumas entregas podem ser definidas fora da área de cobertura das BNs. O cenário ideal para uma entrega por drone seria que o caminho mais curto fosse totalmente coberto pela rede de ônibus. No entanto, isso nem sempre é possível. Na Figura 4.b, um drone precisa entregar um pacote do ponto A ao ponto B.

O caminho mais curto é 1.0 km, mas apenas uma pequena parte dele permite a colaboração entre ônibus e drones. Neste exemplo, o ponto importante é que as vias aéreas e terrestres são de mão única. Por outro lado, o trajeto ônibus-drone apresenta uma possibilidade de comunicação entre drone e ônibus em quase todos os trajetos. Em particular, esse caminho é um pouco mais longo, totalizando 1,3 km.

O algoritmo 1 gera os caminhos do drone e considera duas opções: (i) o caminho mais curto baseado na distância (linha 1), e (ii) o caminho mais curto baseado nas rotas de ônibus (linha 2). Nos dois casos, foi utilizado o algoritmo de Dijkstra. Na geração

do caminho mais curto com base nas rotas dos ônibus, cada aresta do grafo teve seu peso baseado no número de ônibus que percorreram aquela aresta no período analisado. Assim, quanto mais ônibus percorrem essa aresta, maior a probabilidade de ela ser escolhida.

Algorithm 1: Geração de planejamento de trajetos de drones considerando rotas de ônibus

Input : matrix G , $source$, $destination$, $maxFactor$

Output: path

```

1  $sp \leftarrow shortestPath(G, source, destination)$ 
2  $bdp \leftarrow busDronePath(G, source, destination)$ 
3  $maxSortestPath \leftarrow sp.distance \times maxFactor$ 
4 if ( $bdp.distance \geq maxSortestPath$ ) then
5   | return  $sp.path$ 
6 return  $bdp.path$ 

```

A Equação 1 define qual caminho o drone seguiria (linha 3). Como as distâncias no cenário utilizado são relativamente pequenas, optamos por usar um $maxFactor$ de 30%. Assim, a rota do ônibus-drone do caminho só é escolhida se a distância da origem ao ponto de destino for menor ou igual a 30% (linha 4). Esse fator possui o objetivo de permitir que o compromisso entre distância percorrida e cobertura da rede fique a cargo da empresa de entregas. Um estudo mais aprofundado desse fator ficará para trabalho futuro.

$$maxSortestPath = distance \times maxFactor \quad (1)$$

Em cenários reais de entrega, a rota escolhida pode fazer a diferença no custo de entrega. Independentemente da distância do percurso, o drone só estará autorizado a iniciar a entrega se tiver capacidade energética adequada para essa tarefa. Rotas que permitem comunicação híbrida ônibus-drone podem ser consideradas mais seguras, pois possuem maior conectividade quando comparadas a rotas que não possuem tráfego de ônibus. Assim, o usuário final poderá escolher o tipo de entrega, e rotas mais seguras podem ter um preço mais alto quando comparadas às rotas tradicionais.

6. IoDSCF

Esta Seção apresenta o protocolo IoDSCF – uma solução de roteamento store-carry-forward para redes de ônibus conjuntas com a IoD. O protocolo proposto tem duas versões: a primeira não considera a BN e a segunda possui comunicação híbrida entre a BN e a IoD. Em ambos os casos, temos as seguintes hipóteses:

- Cada drone possui um identificador;
- Cada drone possui um receptor GPS e, conseqüentemente, sabe sua própria posição;
- Cada drone conhece a posição do ZSP;
- Este ambiente possui vias aéreas em apenas uma altitude;
- As vias aéreas têm formato cilíndrico.

6.1. Sem BNs

O protocolo IoDSCF funciona da seguinte forma. Cada drone transmite um *beacon* a cada 1 s. Nessa versão, a variável *Node* são apenas drones. Quando um drone recebe um

beacon de outros drones, ele armazena a posição de seus vizinhos. Algoritmo 2 mostra o algoritmo de roteamento de entrega de mensagens. Para iniciar a transmissão de uma mensagem direcionada ao ZSP, o drone de origem verifica primeiro se possui vizinhos (linha 1). Se não tem, o drone armazena a mensagem e aguarda os vizinhos (linha 10).

Algorithm 2: Roteamento de pacotes

```

Input : Packet  $M$ 
1 if ( Node has neighbors ) then
2   | if ( ZSP in Node.neighbors ) then
3   |   | Deliver  $M$  to ZSP
4   | else
5   |   | if Node has drone  $\in$  neighbors then
6   |   |   | Forward  $M$  to the nearest drone neighbor to the ZSP
7   |   | else
8   |   |   | Forward  $M$  to the nearest bus neighbor to the ZSP
9   | else
10  | Store, carry and wait for neighbors

```

Se o drone tiver vizinhos, dois cenários podem ocorrer. Primeiro, o ZSP é vizinho do drone de origem. Nesse caso, o drone entrega o pacote P ao ZSP (linha 3). Caso contrário, o drone de origem precisa escolher um vizinho para encaminhar a mensagem (linha 6). Para escolher um nó, o drone verifica qual vizinho está mais próximo do ZSP. Todos os drones sabem a posição do ZSP. Além disso, o drone transmite sua posição a seus vizinhos por meio de *beacons*. Nesse caso as linhas 5, 7 e 8, em negrito, não são utilizadas.

6.2. Com BNs

Nesta Seção, apresentamos o cenário onde a IoD é auxiliada pela BN. O objetivo é preencher as lacunas na comunicação dos drones com os ônibus. O Algoritmo 2 representa o algoritmo utilizado. A principal diferença é que a variável *Node* pode ser tanto drones como ônibus. Quando um drone deseja transmitir uma mensagem, ele verifica se tem vizinhos, que podem ser drones ou ônibus. Além disso, foi adicionado o *if* da linha 5 e o *else* da linha 7.

Supondo que mais de um vizinho seja encontrado, o algoritmo verifica se os drones são vizinhos (linha 5). Se houver drones, o drone mais próximo ao ZSP é escolhido para transmitir a mensagem (linha 6). Caso contrário, é escolhido o ônibus mais próximo do ZSP (linha 8). A preferência é dada aos drones, pois têm mais velocidade e um alcance maior do que os ônibus. Além disso, os ônibus podem sofrer intervenções como túneis e cânions urbanos. Assim, os ônibus são usados apenas quando necessário para preencher as lacunas na IoD.

7. Modelagem da Simulação

Para simular a rede, usamos a ferramenta IoDSIM⁷, um simulador para a Internet dos Drones desenvolvido em OMNeT++⁸ e a biblioteca INET⁹. O IoDSIM permite a criação

⁷<https://github.com/svaigen/iodsim>

⁸<https://omnetpp.org/>

⁹<https://inet.omnetpp.org/>

de vias aéreas em diferentes altitudes. A ferramenta usa um arquivo xml que especifica as vias aéreas como entrada. Na avaliação, utilizamos o cenário mostrado na Figura 3. A Tabela 2 mostra os parâmetros de configuração usados no simulador.

Tabela 2. Configurações de simulação

Parâmetro	Drones	Bus-Drones
Modelo de mobilidade	Gauss-Markov	Gauss-Markov
Número de drones	10–50	10–50
Número de ônibus	-	39
Área simulada	vias aéreas	vias terrestres e aéreas
Velocidade do drone	13 m/s – 16 m/s	13 m/s – 16 m/s
Velocidade do ônibus	-	8 m/s – 12 m/s
Alcance de transmissão dos drones	300 m	300 m
Alcance de transmissão dos ônibus	-	200 m
Número de simulações	30	30
Tempo de simulação	120 s	120 s

Realizamos 30 simulações para cada configuração de número de drones (10, 20, 30, 40, 50). A velocidade do drone foi baseada na velocidade real dos drones DJI Phantom 4 Pro¹⁰ e DJ Spark¹¹. Para a velocidade do ônibus, definimos um intervalo entre 8 m/s e 12 m/s. Consideramos que um ônibus tem uma velocidade média menor que o drone. Especificamente, os ônibus têm paradas para embarque e desembarque de passageiros. Assim, consideramos drones mais rápidos em cenários urbanos do que ônibus devido à velocidade dos drones.

Outro ponto é o alcance de transmissão dos nós. No caso dos drones, quando comparados aos ônibus, eles estão em um ambiente com menos interferência de obstáculos como prédios e casas. Esse fato proporciona um melhor alcance de transmissão. No caso dos ônibus, a comunicação é afetada por túneis e cânions urbanos (Celes et al., 2019). Assim, definimos o alcance de transmissão dos ônibus menor que o dos drones, cujo alcance foi definido com base no cenário apresentado na Figura 3. É razoável supor que os drones possam alcançar drones vizinhos em vias aéreas paralelas.

Cada uma das 30 simulações tem diferentes planejamentos de caminhos para os drones. A mesma posição foi usada para o ZSP em todos os planejamentos de caminho. Essa posição foi definida de forma aleatória no início das simulações. Além disso, em cada simulação, os pontos de origem e destino de cada drone foram gerados aleatoriamente. O Algoritmo 1 determina o caminho que cada drone deve seguir para chegar ao seu destino. O caminho de volta do destino à origem também é escolhido. É razoável supor que o drone retorne à sua origem após a entrega de um pacote.

Uma adaptação do trajeto real percorrido foi considerada para gerar as rotas de ônibus. Os trajetos foram extraídos do dataset RioBuses. No total, foram utilizados 39 ônibus. No simulador, todos os drones iniciam no solo. Devido ao posicionamento dos drones, a transmissão da mensagem ocorre no tempo $t = 12s$. No entanto, o primeiro *beacon* é transmitido no tempo $t = 2s$. O tempo máximo de vida da mensagem é de 10 s. Independente da simulação considerar ou não as BNs, o drone com $id = 1$ inicia a transmissão da mensagem, que ocorre a cada 10 s. Para a avaliação de desempenho, foram consideradas as seguintes métricas:

- Taxa de entrega de pacotes: o número de pacotes recebidos com sucesso para o ZSP dividido pelo número de pacotes gerados por um drone;

¹⁰<https://www.dji.com/ca/phantom-4-pro/info>

¹¹<https://www.dji.com/ca/spark/info>

- Atraso fim-a-fim: O tempo médio necessário para que um pacote gerado por um drone chegue ao ZSP;
- Tipo de nós escolhidos por rota: A média de tipos de nós escolhidos por rota. Foi considerado o número total de nós utilizados para chegar ao destino e cada tipo de nó separadamente. Especificamente, quantos desses nós eram ônibus e quantos eram drones;
- Distância percorrida por pacote por rota: A distância média percorrida por pacote por rota. Considerou a distância total e a distância percorrida por meio de transmissões de drones e a distância percorrida por meio de transmissões de ônibus.

8. Análise de desempenho

Esta Seção apresenta e discute os resultados obtidos. A Figura 5.a ilustra a taxa de entrega de pacotes \times número de drones, que variou conforme descrito na Tabela 2. Os resultados mostram que o protocolo IoDSCF, utilizando uma BN como parte da rede, permitiu um maior número de entrega de pacotes em todos os cenários. No entanto, à medida que o número de drones se aproxima do número de ônibus (39), a diferença entre os resultados diminui. Assim, para 50 drones, os resultados são muito próximos. A Tabela 3 apresenta os resultados para a métrica de taxa de entrega de pacotes.

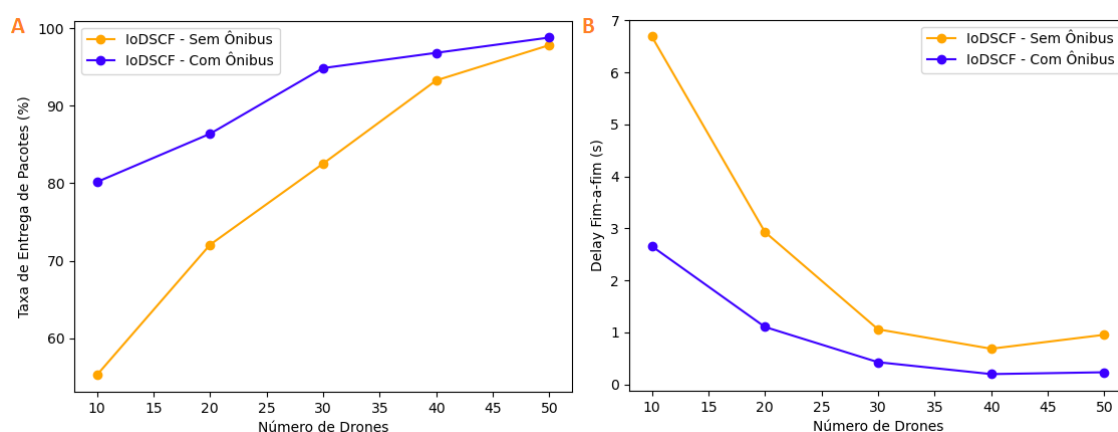


Figura 5. (a) Taxa de entrega de pacotes \times Número de drones. (b) Atraso fim-a-fim \times Número de drones

A Figura 5.b mostra a métrica de atraso fim-a-fim \times número de drones. No início, o atraso é próximo a sete segundos no IoDSCF sem ônibus. Esse fato ocorre porque nesse cenário a rede é esparsa. Portanto, o drone pode precisar levar a mensagem por mais tempo antes de encontrar outro drone para retransmitir a mensagem. Com o uso da BN, as diminuições dos atrasos são estatisticamente menores. À medida que o número de drones aumenta, percebe-se que o atraso diminui para ambas as configurações de rede (com e sem ônibus). No entanto, à medida que o número de drones se aproxima do número do ônibus, a diferença entre os atrasos é menor. A Tabela 3 apresenta a sumarização dos dados da métrica de atraso fim-a-fim.

A Figura 6.a mostra a média de tipos de nós escolhidos por rota. Nesse cenário, pode-se observar que, em média, tanto para o caso em que são utilizadas BNs quanto para as que não são utilizadas, as mensagens são entregues com no máximo três saltos. Para o IoDSCF com BNs, observa-se que nos casos em que o número de drones é menor que o número de ônibus, a rede leva em média mais saltos para entregar a mensagem do

Tabela 3. Resultados para taxa de entrega de pacotes e atraso fim-a-fim

#Drones	Taxa de Entrega de Pacote (%)		Atraso (s)	
	Sem Ônibus	Com Ônibus	Sem Ônibus	Com Ônibus
10	55.26 ± 1.92	80.16 ± 1.25	2.6568 ± 0.2360	6.6920 ± 0.6683
20	72.06 ± 1.36	86.37 ± 1.19	1.1033 ± 0.0999	2.9289 ± 0.2196
30	82.53 ± 1.02	94.84 ± 0.53	0.4251 ± 0.0262	1.0575 ± 0.0955
40	93.26 ± 0.58	96.81 ± 0.61	0.1963 ± 0.0110	0.6843 ± 0.0484
50	97.81 ± 0.46	98.78 ± 0.20	0.2315 ± 0.0054	0.9526 ± 0.1233

que o protocolo IoDSCF sem BNs. Novamente, quando o número de drones e ônibus está próximo, os protocolos funcionam de forma semelhante. Observa-se também que à medida que o número de drones aumenta, o número de ônibus utilizados diminui. A Tabela 4 resume a média de tipos de nós escolhidos por rota.

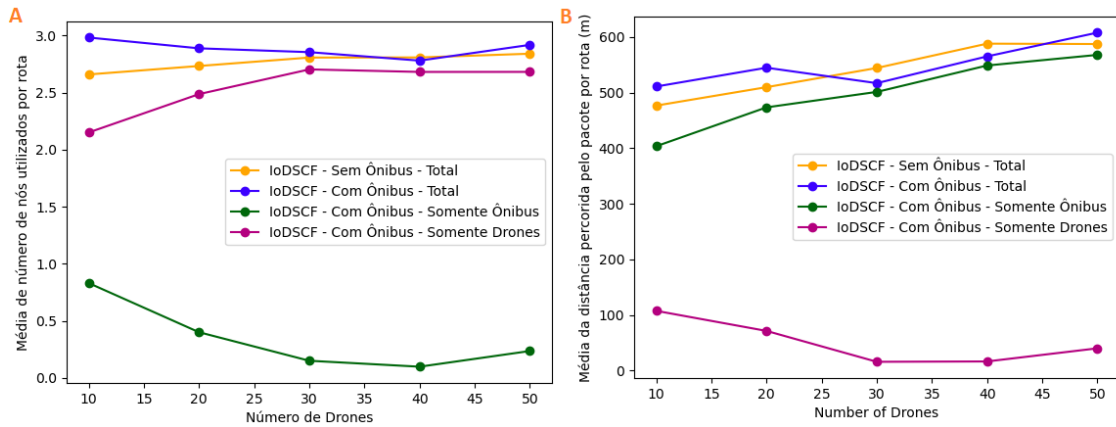


Figura 6. (a) Média de tipo de nó escolhido por rota × Número de drones. (b) Média da distância por rota × Número de drones

A Figura 6.b mostra a distância média percorrida pelo pacote por rota. Observe que, no início, a distância percorrida ao usar uma BN é maior do que quando não está usando. Quando não são utilizados drones, esse fato se inverte, sendo a distância maior. Isso provavelmente se deve ao fato de que no início, como a mensagem trafega mais por ônibus que têm um alcance menor, mais nós são utilizados, tornando a distância percorrida maior no final. No entanto, quando o número de drones se aproxima do número de ônibus, a simulação apenas com drones passa a ter uma distância maior, pois os drones possuem um alcance maior e, assim, outros nós podem ser alcançados, fazendo com que a distância percorrida aumente.

Assim como em outras métricas, à medida que o número de drones aumenta, a distância percorrida pelos ônibus diminui. Por outro lado, a distância percorrida pelos drones aumenta. No cenário de 10 drones, o pacote viajou em média 107 m. Para 30 drones, a mensagem viaja, em média, apenas 15 m. Esse fato também reflete o que foi observado na Figura 6.a, pois à medida que o número de saltos de cada tipo de nó diminui, também diminui a distância média percorrida em cada rede. A Tabela 4 mostra os resultados resumidos para a métrica de distância.

9. Conclusões

Neste artigo, apresentamos o protocolo de roteamento IoDSCF (IoD store-carry-forward) para IoD e BNs. O protocolo proposto permite entregar pacotes em cenários esparsos

Tabela 4. Resumo dos resultados para as métricas média de número de hops e média da distância percorrida

#D	Média de número de hops				Média da distância (m)			
	IoDSCF - Sem Ônibus	IoDSCF - Com Ônibus			IoDSCF - Sem Ônibus	IoDSCF - Com Ônibus		
		Total	Drones	Ônibus		Total	Drones	Ônibus
10	2.65 ± 0.017	2.98 ± 0.016	2.15 ± 2.485	0.83 ± 0.013	476.49 ± 6.6	510.81 ± 5.9	403.43 ± 5.4	107.38 ± 3.0
20	2.73 ± 0.012	2.88 ± 0.012	2.48 ± 0.009	0.40 ± 0.007	509.64 ± 5.0	544.60 ± 1.9	473.32 ± 4.1	71.27 ± 1.9
30	2.80 ± 0.011	2.77 ± 0.010	2.70 ± 0.009	0.15 ± 0.007	544.13 ± 4.2	516.80 ± 3.3	501.10 ± 3.3	15.75 ± 0.7
40	2.80 ± 0.009	2.77 ± 0.009	2.68 ± 0.009	0.09 ± 0.003	587.88 ± 3.9	564.99 ± 4.0	548.60 ± 3.9	16.39 ± 0.7
50	2.83 ± 0.009	2.91 ± 0.010	2.68 ± 0.009	0.23 ± 0.004	587.21 ± 3.9	607.69 ± 3.4	567.69 ± 3.3	40.00 ± 0.9

e fazer melhor uso dos recursos de comunicação existentes. Avaliamos nossa proposta utilizando apenas drones e com a colaboração de redes de ônibus. As BNs são muito previsíveis e têm o potencial de ajudar nas comunicações na IoD. Para habilitar a IoD, os drones precisam ter um ambiente onde possam ser organizados no espaço aéreo. Portanto, apresentamos uma arquitetura topológica de vias aéreas para cidades inteligentes.

Além disso, introduzimos um planejamento de rotas de drones que considera as rotas de ônibus para melhorar a colaboração entre as redes. Os resultados da simulação demonstraram que o protocolo IoDSCF com colaboração de redes de ônibus supera o protocolo sem BNs, reduzindo o atraso médio fim-a-fim e maximizando a taxa de entrega de pacotes em ambientes esparsos. Um fato importante observado nos resultados é que as BNs são mais úteis quando o número de ônibus é maior que o número de drones. Quando esses valores são próximos, os resultados são semelhantes.

Como trabalho futuro pretendemos melhorar a seleção de nós de retransmissão e considerar cenários com mão dupla. Além disso, planejamos estender o IoDSCF para considerar outras redes, como trens e VANETs. O objetivo final é ter mais confiabilidade e escalabilidade da IoD.

Agradecimentos

O presente trabalho foi parcialmente realizado com apoio da NSERC CREATE TRANSIT, NSERC DIVA Strategic Research Network, Canada Research Chairs Program, CAPES, CNPq (processos 311685/2017-0 & 310620/2019-8), e processos 15/24494-8 & 18/23064-8, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Referências

- Alsamhi, S. H., Ma, O., Ansari, M. S., & Almalki, F. A. (2019). Survey on collaborative smart drones and internet of things for improving smartness of smart cities. *Ieee Access*, 7, 128125–128152.
- Bine, L. M., Boukerche, A., Ruiz, L. B., & Loureiro, A. A. (2021). Iodagr: An airway-based geocast routing protocol for internet of drones. In *Icc* (pp. 1–6).
- Bouachir, O., Aloqaily, M., Al Ridhawi, I., Alfandi, O., & Salameh, H. B. (2020). Uav-assisted vehicular communication for densely crowded environments. In *Noms* (pp. 1–4).
- Celes, C., Boukerche, A., & Loureiro, A. A. (2019). Mobility data assessment for vehicular networks. In *Icc* (pp. 1–6).
- Choudhury, S., Solovey, K., Kochenderfer, M. J., & Pavone, M. (2021). Efficient large-scale multi-drone delivery using transit networks. *Journal of AI Research*, 70, 757–788.
- Fawaz, W., Atallah, R., Assi, C., & Khabbaz, M. (2017). Unmanned aerial vehicles as store-carry-forward nodes for vehicular networks. *IEEE Access*, 5, 23710–23718.

- Gharibi, M., Boutaba, R., & Waslander, S. L. (2016). Internet of drones. *IEEE Access*, 4, 1148–1162.
- Gupta, K., Bansal, S., & Goel, R. (2021). Uses of drones in fighting covid-19 pandemic. In *Smart* (pp. 651–655).
- He, Y., Zhai, D., Wang, D., Tang, X., & Zhang, R. (2020). A relay selection protocol for uav-assisted vanets. *Applied Sciences*, 10(23), 8762.
- Hii, M. S. Y., Courtney, P., & Royall, P. G. (2019). An evaluation of the delivery of medicines using drones. *Drones*, 3(3), 52.
- Jin, Y., Xu, J., Wu, S., Xu, L., Yang, D., & Xia, K. (2021). Bus network assisted drone scheduling for sustainable charging of wireless rechargeable sensor network. *Journal of Systems Architecture*, 116, 102059.
- Khabbaz, M., Antoun, J., & Assi, C. (2019). Modeling and performance analysis of uav-assisted vehicular networks. *IEEE TVT*, 68(9), 8384–8396.
- Labib, N. S., Brust, M. R., Danoy, G., & 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.
- Lamprey, E., & Serwaa, D. (2020). The use of zipline drones technology for covid-19 samples transportation in ghana. *HighTech and Innovation Journal*, 1(2), 67–71.
- Oubbati, O. S., Atiqzaman, M., Ahanger, T. A., & Ibrahim, A. (2020). Softwarization of uav networks: A survey of applications and future trends. *IEEE Access*, 8, 98073–98125.
- Oubbati, O. S., Lakas, A., Zhou, F., Güneş, M., Lagraa, N., & Yagoubi, M. B. (2017). Intelligent uav-assisted routing protocol for urban vanets. *Computer communications*, 107, 93–111.
- Pan, Y., Li, S., Chen, Q., Zhang, N., Cheng, T., Li, Z., ... Zhu, T. (2021). Efficient schedule of energy-constrained uav using crowdsourced buses in last-mile parcel delivery. *IMWUT*, 5(1), 1–23.
- Patel, D., Narmawala, Z., Tanwar, S., & Singh, P. K. (2019). A systematic review on scheduling public transport using iot as tool. *Smart innovations in communication and computational sciences*, 39–48.
- Poljak, M., & Šterbenc, A. (2020). Use of drones in clinical microbiology and infectious diseases: current status, challenges and barriers. *Clinical Microbiology and Infection*, 26(4), 425–430.
- Qi, W., Ruan, L., Zhi, Y., & Shen, B. (2021). Risk area identification model of bus bay stops based on distribution of conflicts. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021.
- Qin, Y., Kishk, M. A., & Alouini, M.-S. (2020). Performance evaluation of uav-enabled cellular networks with battery-limited drones. *IEEE Communications Letters*, 24(12), 2664–2668.
- Sami Oubbati, O., Chaib, N., Lakas, A., Bitam, S., & Lorenz, P. (2020). U2rv: Uav-assisted reactive routing protocol for vanets. *Inter. Journal of Comms Systems*, 33(10), e4104.
- Skorup, B., & Haaland, C. (2020). How drones can help fight the coronavirus. *Mercatus Center Research Paper Series, Special Edition Policy Brief (2020)*.