



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

RIAN TEIXEIRA DIAS MOREIRA

**GWPRP: Um Protocolo de Roteamento de
Camada Cruzada Guloso e baseado em
Localização para Redes Ad-Hoc Voadoras**

NITERÓI

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

RIAN TEIXEIRA DIAS MOREIRA

GWPRP: Um Protocolo de Roteamento de Camada Cruzada Guloso e baseado em Localização para Redes Ad-Hoc Voadoras

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientadora:
Dianne Scherly Varela de Medeiros

NITERÓI

2023

Espaço reservado para Ficha Catalográfica

Rian Teixeira Dias Moreira

GWPRP: Um Protocolo de Roteamento de Camada Cruzada Guloso e baseado em
Localização para Redes Ad-Hoc Voadoras

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Aprovada em 06 de Dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dianne Scherly Varela de Medeiros, D.Sc. –
Orientadora, UFF

Prof. Natalia Castro Fernandes, D.Sc. – UFF

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa, Dr. – UFRJ

Niterói
2023

À minha esposa.

Agradecimentos

Agradeço à minha esposa, Kamila Quintão Quintanilha, por ter me apoiado e incentivado para que eu pudesse concluir esse processo que sempre foi um dos meus objetivos e, principalmente, por toda a paciência que teve durante as épocas mais estressantes.

Agradeço aos meus pais, que me apoiaram para que conseguisse cursar a graduação de engenharia, sem a qual não teria entrado no mestrado.

À minha orientadora Dianne por ter aceitado ser minha orientadora com menos de um ano para a conclusão do mestrado e por todo o conhecimento, amizade, apoio e confiança que culminaram neste trabalho.

Aos professores da banca examinadora pela disponibilidade em participar da defesa desta dissertação e pelas contribuições para a melhoria do trabalho.

Resumo

As Redes *Ad-hoc* Voadoras (*Flying Ad-hoc Networks* - FANETs) potencializam a capacidade de cobertura em redes celulares por meio do encaminhamento de dados em múltiplos saltos usando Veículos Aéreos Não Tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles* - UAVs). No entanto, a qualidade do enlace em FANETs depende de diversas características inerentes às redes *ad-hoc*. Contudo, diferentemente das redes *ad-hoc* tradicionais, as FANETs têm características específicas que tornam os protocolos de roteamento clássicos de redes *ad-hoc* obsoletos. Dentre essas características estão a alta velocidade dos nós e a movimentação no espaço tridimensional com pouca limitação na trajetória seguida pelo dispositivo. O espaço tridimensional não é considerado pelos protocolos de roteamento clássicos de redes *ad-hoc* baseados em posicionamento. Essas duas características fazem com que os nós tenham um padrão de mobilidade mais complexo e mais dinâmico do que observado nas demais redes *ad-hoc*, gerando mudanças mais frequentes na topologia, com a criação e quebra de enlaces. Ademais, ao não considerar a terceira dimensão no encaminhamento de pacotes, a topologia da rede pode ser compreendida de forma errada, por exemplo, quando um nó está próximo a outro no plano bidimensional mas que, no pior caso, está fora de alcance ao considerar a terceira dimensão. Nesse contexto, este trabalho propõe o GWPRP (*Greedy Weighted Perimeter Routing Protocol*), um protocolo de roteamento guloso de camada cruzada baseado em posição, que leva em consideração a movimentação no espaço tridimensional. O GWPRP é baseado no GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*), seguindo uma estratégia gulosa semelhante. O GWPRP é um protocolo guloso que toma decisões de encaminhamento baseadas apenas em informações locais obtidas dos vizinhos visando otimizar o sucesso do encaminhamento. O protocolo é considerado de camada cruzada porque utiliza informações da camada de enlace e da camada de rede para tomar as decisões de encaminhamento. O protocolo é avaliado em ambiente simulado comparando o desempenho com o GPSR, protocolo tradicional para redes veiculares, e o EE HELLO AODV (*Energy Efficient Hello Ad-hoc On-Demand Distance Vector*), uma variante do AODV para FANETs. Os resultados mostram que o GWPRP alcança taxa de entrega de pacotes maior com menores atraso e *jitter* médios fim-a-fim.

Palavras-chave: FANET, protocolos de roteamento, redes *ad-hoc*, UAV.

Abstract

The Flying *Ad-hoc* Networks (FANETs) enhance the coverage capacity in cellular networks by forwarding data over multiple hops using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). However, link quality in FANETs depends on several characteristics inherent to *ad-hoc* networks. However, unlike traditional ad-hoc networks, FANETs have specific characteristics that make classic ad-hoc network routing protocols obsolete. Among these characteristics are the high speed of the nodes and movement in three-dimensional space with little limitation on the trajectory followed by the UAVs. Three-dimensional space is not considered by classic position-based ad-hoc network routing protocols. These two characteristics cause nodes to have a more complex and dynamic mobility pattern than that observed in other ad-hoc networks, generating more frequent changes in the topology, with the creation and breaking of links. Furthermore, by not considering the third dimension when forwarding packets, the network topology can be misunderstood, for example, when a node is close to another in the two-dimensional plane but which, in the worst case, is out of reach when considering the third dimension. In this context, this work proposes (*Greedy Weighted Perimeter Routing Protocol*), a position-based cross-layer greedy routing protocol, which takes into account movement in three-dimensional space. GWPRP is based on GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing), following a similar greedy strategy. GWPRP is a greedy protocol that makes routing decisions based only on local information obtained from neighbors in order to optimize routing success. The protocol is considered cross-layer because it uses information from the link layer and the network layer to make routing decisions. The protocol is evaluated in a simulated environment comparing performance with GPSR, a traditional protocol for vehicular networks, and EE HELLO AODV (Energy Efficient Hello *Ad-hoc* On-Demand Distance Vector), a variant of AODV for FANETs. The results show that GWPRP achieves higher packet delivery rate with lower end-to-end average delay and *jitter*.

Keywords: FANET, routing protocol, ad-hoc networks, UAV.

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Relação entre as redes <i>ad-hoc</i> móveis. As Rede <i>Ad-hoc</i> Voadoras (<i>Flying Ad-hoc NETWORKS</i> – FANETs) são um subgrupo de Rede <i>Ad-hoc</i> Veiculares (<i>Veicular Ad Hoc Networks</i> – VANETs), que por sua vez são um subgrupo das Rede <i>Ad-hoc</i> Móvel (<i>Mobile Ad Hoc Network</i> – MANET). Cada rede apresenta características específicas. Os enlaces podem servir para comunicação entre nós ou entre nós e infraestrutura. | 5 |
| 2.2 | Exemplo de rede cujos Veículo Aéreo Não Tripulados (<i>Unmanned Aerial Vehicless</i> – UAVs) se movem seguindo o modelo de mobilidade aleatória semi circular. Cada Veículo Aéreo Não Tripulado (<i>Unmanned Aerial Vehicles</i> – UAV) se move em uma trajetória circular sobre uma região pré-estabelecida. | 8 |
| 2.3 | Os 5 tipos de trajetória possíveis de se aplicar utilizando o modelo de mobilidade paparazzi. O Veículo Aéreo Não Tripulados (<i>Unmanned Aerial Vehicless</i> – UAVs) pode seguir apenas um desses tipos de trajetória. | 8 |
| 2.4 | Exemplo de um cenário que deve ser modelado utilizando um modelo de mobilidade de grupo contendo 2 grupos e uma estação base controladora da missão. | 9 |
| 3.1 | Funcionamento do Protocolo de Roteamento Guloso de Perímetro Ponderado (<i>Greedy Weighted Perimeter Routing Protocol</i> – GWPRP), executado a cada salto. Sempre que existe um pacote para transmitir, busca-se a localização do destino e calcula-se o Potencial dos vizinhos. O pacote é encaminhado para o vizinho com maior Potencial, que tende a ser aquele mais próximo do destino. Caso recaia em um ótimo local, o modo de Recuperação é iniciado. | 22 |
| 3.2 | Formato da mensagem de controle <code>hello</code> modificada. Além da posição X e Y já existente na mensagem <code>hello</code> do Roteamento Guloso Perimetral Sem Estado (<i>Greedy Perimeter Stateless Routing</i> – GPSR), adiciona-se um campo para taxa de erro de quadros e ocupação da fila L3. | 23 |

| | | |
|-----|--|----|
| 3.3 | Exemplo de encaminhamento em uma Rede <i>Ad-hoc</i> Voadora (<i>Flying Ad-hoc NETWORK</i> – FANET) usando o Protocolo de Roteamento Guloso de Perímetro Ponderado (<i>Greedy Weighted Perimeter Routing Protocol</i> – GWPRP), entre a origem \mathcal{A} e o destino \mathcal{H} . A cada salto o Potencial é calculado para cada vizinho e o pacote é encaminhado para o vizinho de maior Potencial. Setas azuis indicam o caminho escolhido a cada salto. | 24 |
| 4.1 | Influência da variação da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes sobre a taxa de entrega de pacotes no Cenário 1. | 31 |
| 4.2 | Influência da variação da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes sobre o atraso médio fim-a-fim sofrido pelos pacotes entregues no cenário 1 | 33 |
| 4.3 | Influência da variação da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes sobre o <i>jitter</i> sofrido pelos pacotes entregues no cenário 1 | 34 |
| 4.4 | Influência da variação da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes sobre a taxa de entrega de pacotes no Cenário 2. | 35 |
| 4.5 | Influência da variação da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes sobre o atraso sofrido pelos pacotes entregues no Cenário 2. | 37 |
| 4.6 | Influência da variação da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes sobre o <i>jitter</i> sofrido pelos pacotes entregues no Cenário 2. | 38 |
| 4.7 | Influência média da variação da quantidade de nós nas métricas de (a), (b) taxa de entrega de pacotes, (c), (d) atraso médio fim-a-fim e (e), (f) <i>jitter</i> médio fim-a-fim, considerando que os nós possuem um raio de cobertura de 300 ou 500 m. A média de cada métrica é calculada considerando-se tamanhos de pacotes distintos, variando entre 64 e 1024 Bytes. O Protocolo de Roteamento Guloso de Perímetro Ponderado (<i>Greedy Weighted Perimeter Routing Protocol</i> – GWPRP) supera o Roteamento Guloso Perimetral Sem Estado (<i>Greedy Perimeter Stateless Routing</i> – GPSR) e o Vetor de Distância sob Demanda para Redes <i>Ad-hoc</i> com <i>Hello</i> Energicamente Eficiente (<i>Energy Efficient Hello Ad-hoc On-Demand Distance Vector</i> – EE HELLO AODV), mantendo a média da taxa de entrega de pacotes ligeiramente melhor, enquanto reduz as médias de <i>jitter</i> e atraso médios fim-a-fim. | 39 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Arquivos de código fonte criados para a implementação do Protocolo de Roteamento Guloso de Perímetro Ponderado (<i>Greedy Weighted Perimeter Routing Protocol</i> – GWPRP). | 27 |
| 4.1 | Resumo dos parâmetros de configuração usados nos dois cenários de simulação. | 29 |

Lista de Abreviaturas e Siglas

| | |
|--|----|
| 3DSRW 3D Smooth Random Walk Mobility Model | 7 |
| ABPP Adaptive Beacon Scheme for Geographic Routing | 19 |
| AHP Analytic Hierarchy Process | 25 |
| AODV Ad-hoc On Demand Distance Vector | 3 |
| COLSR Contention-Based Optimized Link State Routing Protocol | 10 |
| DSDV Destination Sequenced Distance Vector | 14 |
| DSR Dynamic Source Routing | 14 |
| EE HELLO AODV Energy Efficient Hello Ad-hoc On-Demand Distance Vector | 3 |
| FANET Flying Ad-hoc NETWORK | 1 |
| GBR Greedy-based Backup Routing | 19 |
| GLS Grid Location Service | 12 |
| GPS Location-Aware Routing for Opportunistic Delay Tolerant | 13 |
| GPS Global Positioning System | 1 |
| GPSR Greedy Perimeter Stateless Routing | 2 |
| GWPRP Greedy Weighted Perimeter Routing Protocol | 2 |
| HLS Hierarchical Location Service | 12 |
| LEPR Link stability Estimation-based Preemptive Routing | 17 |
| MANET Mobile Ad Hoc Network | 4 |
| MAODV Multicast Ad-hoc On Demand Distance Vector | 10 |
| MG Manhattan Grid | 7 |

| | |
|--|----|
| ML-OLSR Mobility and Load-Aware Optimized Link State Routing Protocol . . . | 10 |
| MPCA Mobility Prediction Clustering Algorithm | 11 |
| MPR MultiPoint Relay | 16 |
| NS-3 Network Simulator 3 | 2 |
| OLSR Optimized Link State Routing Protocol | 10 |
| P-OLSR Predictive Optimized Link State Routing Protocol | 10 |
| RARP Robust and Reliable Routing Protocol | 17 |
| RERR Route Error | 16 |
| RLS Reactive Location Service | 12 |
| RREP Route Reply | 14 |
| RREQ Route Request | 14 |
| RWP Random Way Point | 8 |
| STGM Spatiotemporally Correlated Group Mobility Model | 8 |
| TS-AODV Time-Slotted Ad-hoc On Demand Distance Vector | 10 |
| UAV Unmanned Aerial Vehicles | 1 |
| UVAR Unmanned-Aerial-Vehicle-Assisted Vehicle Ad-Hoc Network Routing Protocol | 12 |
| VANET Veicular Ad Hoc Network | 1 |

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Objetivo | 2 |
| 1.2 | Contribuições | 2 |
| 1.3 | Proposta | 3 |
| 1.4 | Estrutura do Texto | 3 |
| 2 | Redes <i>Ad-hoc</i> Voadoras e Protocolos de Roteamento | 4 |
| 2.1 | Características das Rede <i>Ad-hoc</i> Voadoras (<i>Flying Ad-hoc NETWORKS</i> – FANETs) | 4 |
| 2.2 | Roteamento em Rede <i>Ad-hoc</i> Voadoras (<i>Flying Ad-hoc NETWORKS</i> – FANETs) | 9 |
| 2.2.1 | Protocolos de roteamento tradicionais | 14 |
| 2.3 | Trabalhos Relacionados | 16 |
| 3 | O Protocolo de Roteamento de Camada Cruzada Guloso e baseado em Localização - GWPRP | 20 |
| 3.1 | Aspectos relevantes para o desenvolvimento do protocolo | 20 |
| 3.2 | Funcionamento do GWPRP | 21 |
| 3.2.1 | Cálculo do Potencial | 24 |
| 3.3 | Implementação do GWPRP | 26 |
| 4 | Resultados e Discussão | 28 |
| 4.1 | Cenários de avaliação | 28 |
| 4.2 | Cenário 1 | 30 |

| | |
|--|-----------|
| Sumário | xii |
| 4.3 Cenário 2 | 32 |
| 4.4 Comparação entre os cenários | 36 |
| 5 Conclusão | 40 |
| Referências | 42 |

Capítulo 1

Introdução

O progresso recente da tecnologia sem-fio tem sido testemunhado no cotidiano, principalmente devido à grande disponibilidade de interfaces de rádio de baixo custo e à proliferação de dispositivos da Internet das Coisas. Ademais, outros componentes microeletrônicos como Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* – GPS), sensores, microcomputadores, dentre outros, também passaram a ser facilmente obtidos e implantados em diversas soluções. Com isso, há uma maior facilidade para desenvolvimento de pequenos veículos voadores inteligentes, como um Veículo Aéreo Não Tripulado (*Unmanned Aerial Vehicles* – UAV). Alguns UAVs são autônomos, de forma que seus movimentos são controlados por algoritmos computacionais sem nenhuma interação humana e podem ser implantados facilmente para formar uma rede de comunicação *ad-hoc*. Esse tipo de rede é denominado Rede *Ad-hoc* Voadora (*Flying Ad-hoc NETWORK* – FANET).

As FANETs permitem a criação de diferentes tipos de aplicações civis e militares, como a coordenação de equipes de resgate no solo, fiscalização e rastreamento autônomo, monitoramento agrícola e segurança pública. Devido à sua mobilidade flexível e controlada, os nós da FANET também podem auxiliar redes altamente móveis no solo, como Rede *Ad-hoc* Veiculares (*Veicular Ad Hoc Networks* – VANETs), além de permitirem a extensão da cobertura de outras redes móveis com infraestrutura fixa, como as redes celulares. Os nós que constituem as FANETs, denominados UAVs, são fáceis de serem implantados e podem ser despachados em diferentes ambientes, o que permite que a FANET atue como uma rede de substituição no caso de uma rede no solo parar de funcionar.

O roteamento é um serviço essencial para que as FANETs sejam capazes de encaminhar pacotes, mesmo com a alta dinâmica da topologia da rede. Assim, é essencial projetar protocolos de roteamento eficientes para melhor suportar a transmissão de pacotes entre UAVs. No entanto, existem alguns problemas complexos que tornam a concepção

de protocolos de roteamento dedicados para FANETs bastante complexa. Por exemplo, a mobilidade dos UAVs é muito mais complexa que a observada nas demais redes *ad-hoc*, como VANETs, devido à movimentação tridimensional e possibilidade de os nós terem uma maior velocidade. A dinâmica ainda mais intensa do que a das VANETs leva a modificações mais frequentes na topologia da rede, gerando caminhos intermitentes e consequente falha na comunicação. É importante avaliar as diferentes estratégias de roteamento para definir qual delas apresenta melhor desempenho no cenário de FANETs [1].

1.1 Objetivo

Esta dissertação tem como objetivo geral melhorar o desempenho das FANETs. Para isso, propõe-se o Protocolo de Roteamento Guloso de Perímetro Ponderado (*Greedy Weighted Perimeter Routing Protocol – GWPRP*), que utiliza uma abordagem gulosa para tomada de decisão. O GWPRP é um protocolo de camada cruzada, que agrega resiliência à comunicação sem aumentar a sobrecarga de mensagens de controle. O GWPRP é derivado do protocolo de Roteamento Guloso Perimetral Sem Estado (*Greedy Perimeter Stateless Routing – GPSR*), evoluindo esse protocolo para considerar a mobilidade tridimensional dos nós da rede e métricas da camada de enlace e de rede no cálculo do roteamento.

A fim de alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são estabelecidos:

- Desenvolver uma métrica ponderada para contabilizar a estabilidade e a qualidade dos enlaces na decisão de encaminhamento;
- Definir os melhores pesos para os termos que compõem a métrica;
- Avaliar comparativamente o desempenho do protocolo proposto em relação a outros protocolos de roteamento para redes *ad-hoc*.

1.2 Contribuições

A proposta desta dissertação contribui para o avanço do estado-da-arte ao melhorar o processo de roteamento de pacotes em uma FANET. O protocolo é implementado no Simulador de Rede 3 (*Network Simulator 3 – NS-3*) e seu desempenho é avaliado através de simulações em cenários distintos. Assim, esta dissertação contribui com o desenvolvimento de um módulo adicional para o NS-3.

A pesquisa realizada nesta dissertação originou a seguinte publicação:

GWPRP: Um Protocolo de Roteamento de Camada Cruzada Guloso e baseado em Localização para Redes Ad-Hoc Voadoras, XXII Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação, 2023.

1.3 Proposta

O GWPRP é construído com base no GPSR com a ideia de limitar o impacto das mensagens de controle no roteamento de pacotes de dados. Assim, as mensagens de controle do GPSR são alteradas para considerar a terceira dimensão na localidade e incluem contadores da camada de enlace, sem aumentar significativamente a sobrecarga de controle na rede. Quando um nó possui um pacote para transmitir, o GWPRP é acionado para decidir qual nó vizinho é o melhor candidato a seguir com a transmissão.

A avaliação de desempenho do protocolo é feita de forma comparativa, utilizando como referência os protocolos GPSR e Vetor de Distância sob Demanda para Redes *Ad-hoc* com *Hello* Energeticamente Eficiente (*Energy Efficient Hello Ad-hoc On-Demand Distance Vector* – EE HELLO AODV) [2], um protocolo baseado no Vetor de Distância sob Demanda para Redes *Ad-hoc* (*Ad-hoc On Demand Distance Vector* – AODV) criado para FANETs. Varia-se a quantidade de nós na rede, mantendo-se a proporção entre a quantidade de nós transmissores e a quantidade total de nós na rede. Varia-se também o tamanho dos pacotes transmitidos. Os resultados mostram que o GWPRP tem um desempenho melhor do que o GPSR e o EE HELLO AODV, apresentado melhor taxa de entrega de pacotes com menores atraso e *jitter* médios fim-a-fim.

1.4 Estrutura do Texto

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. Após a introdução realizada neste capítulo, o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre redes *ad-hoc*, detalhando o que torna as FANETs diferentes das demais, descrevendo tipos de protocolos de roteamento e resumindo os principais trabalhos relacionados e suas respectivas limitações. No Capítulo 3, apresenta-se o protocolo GWPRP, detalhando seu funcionamento e discutindo suas vantagens e limitações. O Capítulo 4 descreve os cenários de simulação para avaliação do protocolo e discute os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 5 conclui a dissertação, destacando os principais resultados e discutindo direções de pesquisa futuras.

Capítulo 2

Redes *Ad-hoc* Voadoras e Protocolos de Roteamento

Este capítulo introduz as redes *ad-hoc* voadoras. Destacam-se as principais características dessas redes, que tornam os requisitos dos protocolos de comunicação diferentes das demais redes *ad-hoc*. Em seguida, detalham-se modelos de mobilidade, aplicações e principais técnicas de roteamento para esse tipo de rede.

2.1 Características das FANETs

As redes *ad-hoc* sem fio são classificadas de acordo com sua utilização, implantação, comunicação e missão. Por definição, a FANET é um tipo de Rede *Ad-hoc* Móvel (*Mobile Ad Hoc Network* – MANET), e há muitas considerações de projeto comuns para MANETs e FANETs [3]. Além disso, a FANET também pode ser classificada como um subconjunto de VANET, que por sua vez é um subgrupo de MANET [4]. A Figura 2.1 ilustra a relação entre essas redes. Como uma área de pesquisa emergente, a FANET compartilha características comuns aos outros tipos de redes *ad-hoc* móveis, mas também apresenta desafios de projeto únicos como interferência atmosférica na mobilidade dos UAVs, limitação energética dos UAVs e mudanças na topologia derivadas da mobilidade tridimensional em alta velocidade [5].

Os nós das VANETs estão restritos ao movimento em rodovias ou estradas em duas dimensões. Portanto, nessas redes os modelos de mobilidade são previsíveis. Diferentemente, nas FANETs os UAVs se movem em um espaço tridimensional livre, isto é, não restringido pelos limites impostos por estradas. Assim, os UAVs podem se mover em qualquer direção, em altitudes variadas, dificultando a previsibilidade do movimento [6],

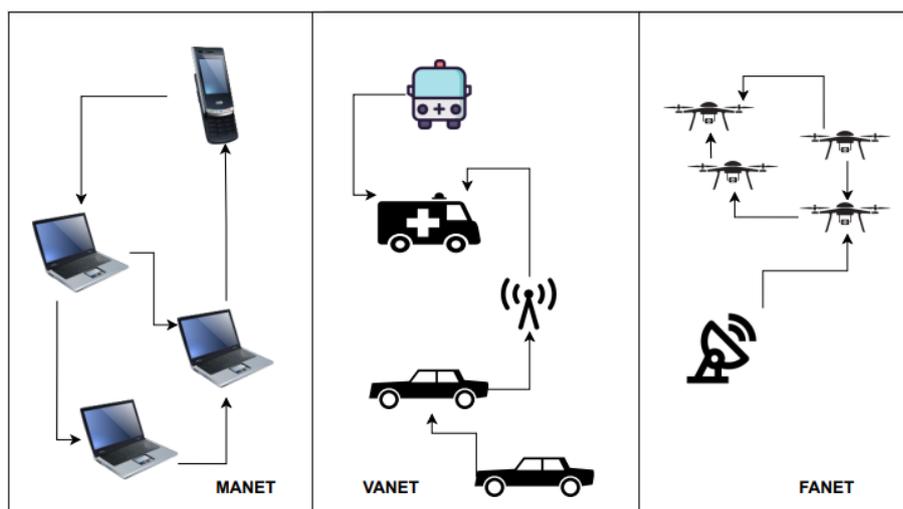


Figura 2.1: Relação entre as redes *ad-hoc* móveis. As FANETs são um subgrupo de VANETs, que por sua vez são um subgrupo das MANET. Cada rede apresenta características específicas. Os enlaces podem servir para comunicação entre nós ou entre nós e infraestrutura.

mesmo quando a trajetória dos UAVs é predeterminada [7]. A topologia pode mudar com frequência devido à falha de UAVs, entrada de novos UAVs, influência da atmosfera, alteração da distância entre os UAVs modificando a qualidade do enlace [8], dentre outros motivos, obrigando os UAVs a se reorganizarem. No processo de reorganização, os UAVs se movimentam em qualquer direção para ocupar a nova posição, o que dificulta a previsibilidade do movimento [7].

Os UAVs são geralmente dispersos no céu e a distância entre UAVs pode ser de centenas de metros, podendo chegar a até um quilômetro [9]. Como resultado a densidade de nós nas FANETs pode variar bastante. A densidade pode ser definida como o número médio de nós em uma unidade de área, e tende a ser muito menor do que em MANETs e VANETs. Em MANETs o movimento dos nós acontece com velocidades baixas, próximas a 3 km/h [10], sendo uma mobilidade lenta em relação aos nós das VANETs. Nas VANETs os veículos se movimentam com velocidades variadas limitadas pela velocidade máxima das estradas. Considerando cidades, é comum o limite estar abaixo de 80 km/h. Mesmo em autoestradas sem limites de velocidade, um carro comum normalmente não alcança velocidades superiores a 200 km/h. Em FANETs, um UAV pode atingir velocidades entre 30 e 460 km/h [11], constituindo uma mobilidade muito mais rápida em relação às MANETs e VANETs. Essa velocidade elevada deriva desafios de projeto para comunicação nas FANETs [12], pois acarreta em mudanças de topologia mais frequentes do que nas MANETs e VANETs [13, 14] devido a possibilidade de a velocidade relativa entre os nós ser maior em FANETs.

A formação das FANETs só é possível se houver comunicação constante entre os UAVs [15]. Ao menos um dos UAVs age como um *gateway*, permitindo a comunicação dos outros nós da FANET com uma estação base [16]. Assim, há dois tipos de comunicação possíveis nos enlaces da FANET, (i) entre UAVs; e (ii) entre UAV e outra infraestrutura física, por exemplo, satélite ou uma estação base de uma rede celular [17]. O alcance da comunicação entre UAVs pode ser estendido ao permitir a comunicação em múltiplos saltos. Já a conectividade com outra infraestrutura física possibilita a oferta de serviços adicionais, como o acesso à Internet [17].

Além da mobilidade diferente em comparação às outras redes *ad-hoc*, o meio de propagação dos sinais de rádio nas FANETs também apresenta características que o diferenciam. Nas MANETs e VANETs os nós estão próximos ao solo, tipicamente sem linha de visada entre os nós fonte e destino. Nesse cenário, os sinais de rádio são mais afetados pela estrutura geográfica do terreno e as construções presentes na região [18]. Em FANETs os nós estão distantes do solo, sobrevoando uma região acima da maioria dos obstáculos existentes, o que reduz a influência da reflexão e difração do sinal no solo e em outros obstáculos, como árvores. Dessa forma, aumenta-se consideravelmente a probabilidade de que a comunicação entre os UAVs seja feita em linha de visada direta. A comunicação entre o UAV e a estação base pode sofrer maior influência do meio de propagação se a estação rádio base não estiver em uma altura suficiente para evitar obstáculos na linha de visada [19, 20].

Um critério também muito importante sobre o funcionamento dos UAVs é o consumo de energia para a mobilidade e a comunicação do UAV [21]. O consumo de energia do equipamento de comunicação é substancial e pode limitar o tempo útil de voo e a vida útil da rede. Uma solução para o problema da energia limitada é o carregamento de uma fonte de energia secundária para alimentar os equipamentos de comunicação. Jain Gupta et al verificam que ao incluir a segunda fonte de energia, o tempo de vida médio dos UAVs aumenta em 20% [22]. No entanto, deve ser mencionado que não é apenas na camada física que os dispositivos podem ser projetado para economizar energia. Protocolos de camada de enlace e de camada de rede energeticamente eficientes também devem ser utilizados [23].

A criação de modelos de mobilidade coerentes com as características das FANETs é essencial para retratar o movimento dos nós e analisar o comportamento da rede [24]. Em FANETs, isso implica em retratar a velocidade, direção e aceleração do UAVs, dentro de uma região especificada [25]. A aplicação correta dos modelos de mobilidade em

ambientes simulados auxilia na implantação de UAVs, permitindo uma melhor previsão do desempenho. Há vários modelos de mobilidade criados para redes FANET e o modelo mais coerente com o cenário deve ser aplicado. Cada modelo de mobilidade tem suas vantagens e desvantagens que podem ajudar na compreensão da transmissão da mensagem. Alguns dos modelos de mobilidade mais usados são o aleatório, o semi aleatório circular, o Gauss-Markov, o paparazzi, o de feromônios e o de grupo [26].

No **modelo de mobilidade aleatório**, a direção e a velocidade dos nós são escolhidas aleatoriamente. As ações de mobilidade de um UAV são completamente independentes dos outros UAVs e de ações passadas. Durante um determinado período, o UAV se move em uma direção escolhida aleatoriamente com uma velocidade também escolhida aleatoriamente [27]. Exemplos de modelos de mobilidade aleatória específicos para FANETs são o Modelo de Mobilidade de Passeio Aleatório Suave 3D (*3D Smooth Random Walk Mobility Model* – 3DSRW) [28], que estende um modelo de mobilidade aleatória 2D [27] para considerar a terceira dimensão tornando-o coerente com FANETs, e o Grade de Manhattan (*Manhattan Grid* – MG) [29], que usa uma topologia de estradas em grade para restringir o movimento dos UAVs nas direções horizontal e vertical em um mapa urbano.

Os **modelos de mobilidade semi aleatórios circulares** são projetados para cenários nos quais os UAVs têm o objetivo de capturar informações sobre determinadas regiões. Cada UAV sobrevoa uma sub-região específica [30]. A Figura 2.2 ilustra essa situação.

O **modelo de mobilidade paparazzi** opera conforme uma técnica baseada em caminho predefinidos [31] na qual os UAVs podem seguir um de cinco tipos de trajetória previamente predefinidos: (1) *Eight*, no qual a trajetória do UAV forma a figura do numeral oito, (2) *Stay-At*, na qual os UAVs sobrevoam uma posição fixa, (3) *Scan*, na qual os UAVs percorrem uma área, (4) *Oval*, em que os UAVs percorrem um caminho e retornam ao ponto original e (5) *waypoint*, na qual os UAVs se movimentam em uma linha reta [32]. A Figura 2.3 ilustra esses tipos de trajetória.

Nos modelos descritos anteriormente, o movimento de cada UAV é independente dos outros UAVs. Contudo, em FANETs podem existir inúmeras circunstâncias nas quais é necessário que os nós viagem coletivamente. Por exemplo, o movimento dos UAVs pode seguir um plano de voo predefinido no qual os UAVs têm uma missão a cumprir [33]. Nesses casos, os UAVs se movem juntos através de um ponto de referência em uma área definida, introduzindo dependências espaciais e temporais entre os UAVs. Nesse caso, a mobilidade dos UAVs deve ser representada por um **modelo de mobilidade**

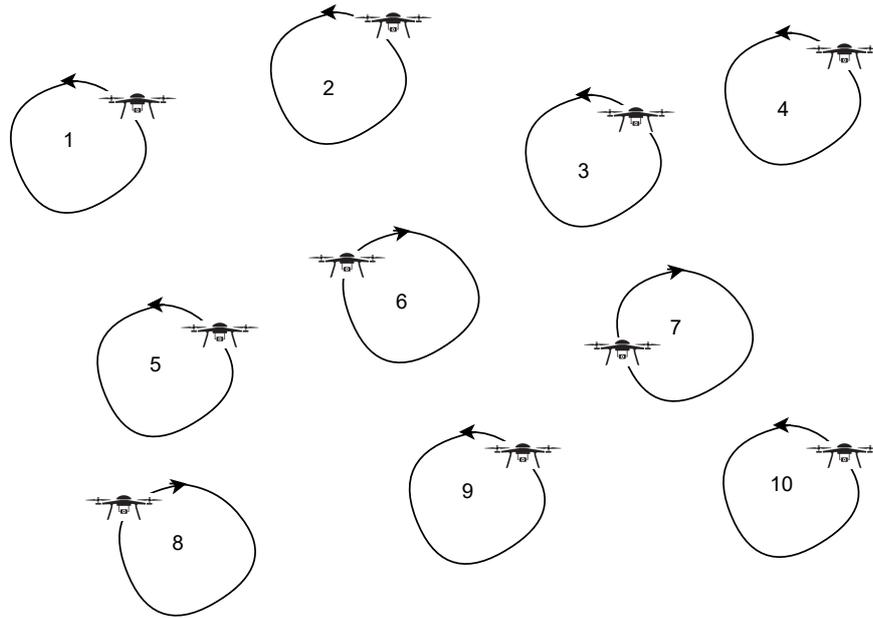


Figura 2.2: Exemplo de rede cujos UAVs se movem seguindo o modelo de mobilidade aleatória semi circular. Cada UAV se move em uma trajetória circular sobre uma região pré-estabelecida.

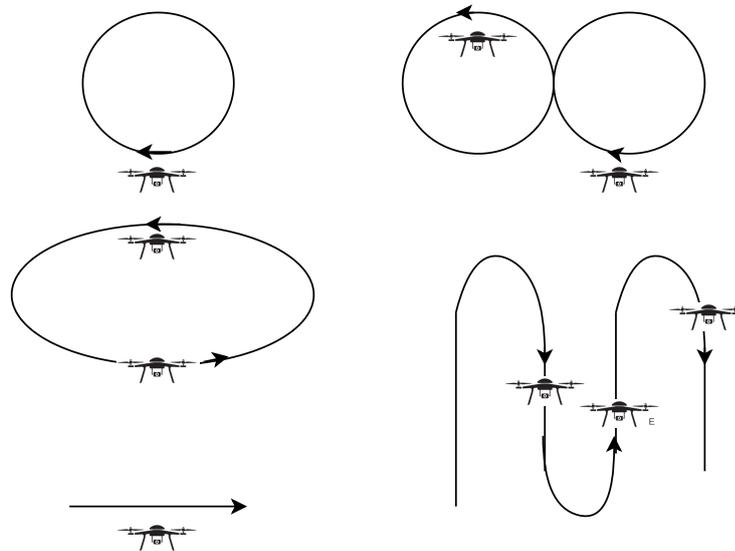


Figura 2.3: Os 5 tipos de trajetória possíveis de se aplicar utilizando o modelo de mobilidade paparazzi. O UAVs pode seguir apenas um desses tipos de trajetória.

de grupo. Tal modelo deve considerar o movimento dos UAVs como um grupo e não como nós isolados. Portanto modelos clássicos como o Ponto de Passagem Aleatório (*Random Way Point – RWP*) acabam não sendo ideais. Xianfeng et al. criam o Modelo de Mobilidade de Grupo Correlacionado Espaço-temporalmente (*Spatiotemporally Correlated Group Mobility Model – STGM*) para tentar replicar o movimento dos UAVs para o caso da movimentação em grupo. A Figura 2.4 ilustra uma situação de uma missão formada

por 2 grupos onde há uma estação base que controla a missão.

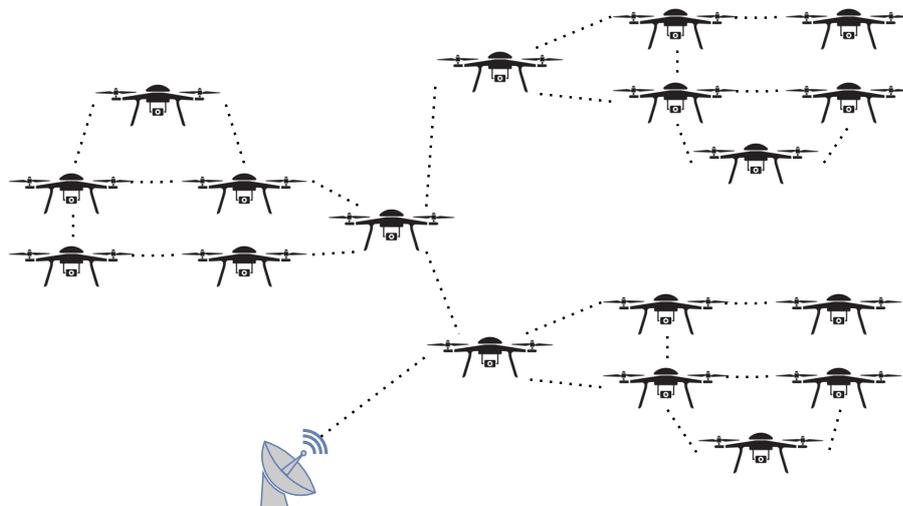


Figura 2.4: Exemplo de um cenário que deve ser modelado utilizando um modelo de mobilidade de grupo contendo 2 grupos e uma estação base controladora da missão.

2.2 Roteamento em FANETs

Protocolos de roteamento para FANETs são os mecanismos aplicados pelos UAVs para realizar a transmissão de dados entre UAVs ao estabelecer um caminho para o encaminhamento dos pacotes. Contudo, o uso de UAVs como elementos de rede capazes de rotear traz diversos desafios que não são comuns às MANETs ou às VANETs. Os UAVs são limitados em recursos computacionais e bateria e sofrem mais intensamente com interferências atmosféricas. Além disso, o padrão de mobilidade dos UAVs é diferente, sendo mais rápidos do que os nós das outras redes *ad-hoc* e se movimentando em um espaço tridimensional que tende a possuir menor quantidade de obstáculos e movimentação livre, não limitada por estradas. A previsibilidade do movimento dos UAVs é mais difícil do que os nós das VANETs e MANETs e a topologia é ainda mais dinâmica do que nessas redes, provocando intermitência mais frequente nas rotas e dificultando a convergência das tabelas de roteamento. Uma característica única das FANETs que traz vantagens para essas redes é a maior probabilidade de se comunicarem em linha de visada, o que aumenta o raio de cobertura da comunicação entre UAVs [34]. Devido às características específicas das FANETs, os protocolos de roteamento propostos para MANETs e VANETs não são adequados para FANETs [35]. O padrão de mobilidade dos nós nas FANETs impõem um desafio complexo para a proposta de soluções de roteamento nessas redes, visto que não são projetados para lidar com as especificidades das FANETs.

Os protocolos de roteamento para FANETs podem ser divididos da seguinte forma: baseados em topologia, bio-inspirados, hierárquicos, focados em eficiência energética, heterogênicos e baseados em localização [36]. Nos protocolos **baseados em topologia**, a informação de roteamento deve ser obtida de acordo com a informação topológica dos nós antes dos dados serem transmitidos. O roteamento pode ser proativo ou reativo [37]. Os protocolos **proativos** são aqueles em que os nós registram rotas para alcançar todos os nós da rede, independente de terem ou não a intenção de se comunicarem com esses nós. Essa proatividade é suportada pela troca constante de informações entre os nós da rede para que todos os nós sempre possuam informação sobre a topologia atualizada da rede [38]. Assim, sempre que um nó deseja transmitir um pacote, a informação referente ao encaminhamento já está disponível em uma tabela, devido ao registro da rota para todos os nós da rede feito antes da transmissão do pacote de dados [39]. A desvantagem de protocolos proativos é a sobrecarga de mensagens de controle necessárias para manter e atualizar as tabelas de roteamento [40]. Em redes com topologias muito dinâmicas como as FANETs, a sobrecarga torna-se ainda maior devido às quebras de enlace frequentes, que alteram a topologia da rede. Entre os principais protocolos baseados em topologia proativos, destaca-se o Roteamento por Estado de Enlace Otimizado (*Optimized Link State Routing Protocol* – OLSR), que apesar de não ser projetado especificamente para FANETs, possui variados protocolos derivados que são voltados para FANETs, como o Roteamento por Estado de Enlace Otimizado Preditivo (*Predictive Optimized Link State Routing Protocol* – P-OLSR), Roteamento por Estado de Enlace Otimizado Ciente de Carga e Mobilidade (*Mobility and Load-Aware Optimized Link State Routing Protocol* – ML-OLSR) e Roteamento por Estado de Enlace Otimizado baseado em Contenção (*Contention-Based Optimized Link State Routing Protocol* – COLSR) [41].

Ao contrário dos protocolos proativos, os **reativos** descobrem as rotas sob demanda, isto é, somente quando um nó deseja transmitir um pacote para um determinado destino. Assim, a ação de enviar o pacote é precedida por um processo de descoberta de rota [42]. Protocolos reativos resultam em menor sobrecarga de controle na rede do que protocolos proativos, porém, o cálculo sob demanda pode aumentar a latência fim-a-fim [43]. Entre os principais protocolos baseados em topologia reativos, destaca-se o AODV que, assim como o GPSR, não foi projetado especificamente para FANETs porém inspirou a criação de muitos protocolos para FANETs, como Vetor de Distância sob Demanda para Redes *Ad-hoc Multicast* (*Multicast Ad-hoc On Demand Distance Vector* – MAODV) e Vetor de Distância sob Demanda para Redes *Ad-hoc* com Intervalo de Tempo (*Time-Slotted Ad-hoc On Demand Distance Vector* – TS-AODV) [41].

Muitas espécies na natureza formam uma coordenação coletiva através da cooperação entre indivíduos para compensar as deficiências de um único indivíduo, por exemplo, matilhas de lobos, agregação e migração de pássaros, enxame de abelhas, e colônias de formigas [44]. Os protocolos **bio-inspirados** têm como base esses comportamentos observados na natureza. O conceito de inteligência de enxame foi introduzido em 1989 por Gerardo Beni e Jing Wang [45], modelando matematicamente o comportamento de enxames na natureza, permitindo a criação de algoritmos de enxame. Esses algoritmos podem ser aplicados a diversos problemas, incluindo o roteamento em FANETs [46, 7]. Alexey [47] aplica algoritmo das abelhas, que é um tipo de algoritmo de enxame que tenta replicar o comportamento de uma colônia de formigas como estratégia de encaminhamento em uma FANET. Contudo, os resultados mostram que a estratégia é menos efetiva que protocolos tradicionais de redes *ad-hoc* como o AODV.

Protocolos **hierárquicos** tipicamente aplicam um algoritmo para dividir os UAVs em subgrupos, chamados de *clusters*, e então eleger um UAV primário, ou *cluster head*, para realizar a comunicação com os demais nós da rede que estão fora do *cluster* [48]. Os protocolos de roteamento baseados em hierarquia podem superar melhor a incerteza da topologia e do movimento nas FANETs. No entanto, os nós principais do *cluster* são pontos únicos de falha que podem resultar no particionamento da rede em caso de falha. Além disso, os protocolos baseados em hierarquia devem se preocupar com a variabilidade da topologia da FANET, instabilidade de enlaces, fraca proteção de segurança, grande heterogeneidade de aplicações e limitação de recursos computacionais [49]. Zang et al. propõem o Algoritmo de Agrupamento para Predição de Mobilidade (*Mobility Prediction Clustering Algorithm – MPCA*) [50], que é essencialmente um algoritmo de agrupamento preditivo, o qual utiliza a velocidade e a posição relativa entre cada par de nós para projetar o tempo de vida dos enlaces e então eleger o UAV que será o *clusterhead*. O UAV eleito age como *gateway* de comunicação para os nós contidos no *cluster*. Contudo, o MPCA não é eficiente em termos de consumo de energia, além de resultar em maior sobrecarga de controle quando há uma falha na rede [51].

Protocolos de roteamento **focados em eficiência energética** são cruciais para garantir a comunicação confiável e a vida útil prolongada das FANETs. Portanto, esses protocolos são projetados com base no princípio de minimizar o consumo de energia com a tarefa do roteamento para reduzir o uso de energia da rede [21] e prolongar a vida útil, mantendo a qualidade da comunicação [52, 22]. A maioria dos protocolos de roteamento existentes dependem de modelos simplificados de consumo de energia que podem não prever com precisão o consumo real de energia, levando à redução do desempenho do ro-

teamento. A maioria dos protocolos também ignora o problema de considerar simultaneamente múltiplos objetivos em aplicações práticas, como redução de atraso em combinação com aumento da confiabilidade. À medida que a FANET cresce em quantidade de nós, os protocolos de roteamento existentes podem enfrentar problemas relacionados à baixa escalabilidade e à alta complexidade [49].

As FANETs podem se conectar com outros tipos de rede simultaneamente e há alguns casos de uso para esse cenário. Nesse caso, podem ser utilizados protocolos de roteamento **heterogêneos**, geralmente empregados quando a FANET serve como ponte para outras redes, como a rede celular [53]. Esses protocolos costumam focar nas características das outras redes que cooperam com a FANET, podendo causar maior latência e consumo de energia na FANET. Omar et al. propõem Protocolo de Roteamento para Redes Veiculares *Ad-Hoc* Assistido por Veículo Aéreo Não Tripulado (*Unmanned-Aerial-Vehicle-Assisted Vehicle Ad-Hoc Network Routing Protocol – UVAR*), um protocolo de roteamento para redes de veículos assistidas por UAV, onde o UAV melhora a conectividade geral entre os veículos, coletando informações sobre a densidade do tráfego terrestre e o estado da conectividade dos veículos, a fim de retransmitir dados quando os únicos veículos no solo não podem ser conectados entre si, melhorando assim efetivamente o processo de roteamento.

Protocolos de roteamento **baseados em localização** utilizam as posições geográficas dos nós para realizar a decisão de encaminhamento. Cada nó determina sua própria posição geográfica e toma a decisão de encaminhamento baseando-se apenas na posição do destino e dos nós vizinhos. Essa decisão local torna os protocolos de roteamento baseados em posição adequados em cenários de redes grandes e altamente dinâmicas. Usando esses protocolos, os nós não precisam explorar a topologia da rede, nem armazenar tabelas de roteamento ou mesmo trocar mensagens de controle em toda a rede. Os protocolos baseados em localização são mais adequados para as FANETs [35] por se adaptarem rapidamente às mudanças na topologia, apesar de serem altamente dependentes da obtenção de informação acurada sobre a posição dos nós. Como todos os nós devem conhecer a posição geográfica, é necessário utilizar um serviço de GPS, como Serviço de Localização Reativo (*Reactive Location Service – RLS*), Serviço de Localização em Grade (*Grid Location Service – GLS*) ou Serviço de Localização Hierárquico (*Hierarchical Location Service – HLS*) [54]. Os protocolos baseados em localização visam principalmente fornecer um caminho ideal entre UAVs e reduzir a quantidade de mensagens de controle da rede. Apesar disso, tem como principal desvantagem a possibilidade de transmissão de informações obsoletas sobre a rota resultante da mudança constante de posição dos UAVs devido à

velocidade elevada, podendo ocasionar a transmissão do pacote para um nó que não tem mais comunicação.

Independentemente da categoria do protocolo, os protocolos de roteamento podem seguir estratégias baseadas em predição, tolerância a atraso, algoritmo guloso, aprendizado de máquina, utilização de *beacons*, dentre outras [54]. As estratégias **baseadas em predição** consideram a posição geográfica, direção e velocidade dos nós para prever a posição futura dos nós e, portanto, são fortemente impactadas quando os nós podem se mover em qualquer direção no espaço tridimensional [54], tornando os protocolos mais complexos e menos assertivos. Conseqüentemente, pode haver aumento significativo no atraso devido à necessidade de retransmissões. A estratégia **baseada em tolerância a atraso** deve ser utilizada apenas quando a aplicação é de fato tolerante a atraso, visto que o mecanismo de encaminhamento empregado, “armazenar-carregar e encaminhar”, insere atraso significativo [55]. Os **algoritmos gulosos** escolhem sempre o nó mais próximo ao destino para encaminhar os dados, podendo ficar presos em um ótimo local quando não encontram nó mais próximo ao destino do que o atual e o atual não alcança diretamente o destino [54]. Abordagens **baseadas em aprendizado de máquina** otimizam as decisões de roteamento com base em diversos parâmetros da rede. Apesar de promissora, essa estratégia pode ser computacionalmente custosa, elevando consumo de memória e processamento [56]. Em consequência, aumenta-se o consumo de energia dos nós da rede, que é um recurso limitado em FANETs. Por fim, protocolos que **não utilizam *beacons* (*beaconless protocols*)** enviam dados em difusão para todos os nós vizinhos e apenas um desses nós encaminha os dados adiante de acordo com a posição relativa entre o nó e a origem e o destino. Essa abordagem ignora alguns problemas comuns em redes sem fio, como interferências, colisões e perdas de pacote, o que resulta na escolha de vizinhos não confiáveis como próximo salto. Assim, aumenta-se o número de retransmissões, conseqüentemente aumentando a sobrecarga de controle e o atraso total [57]. Kuiper et al. criam o Roteamento Ciente de Localização para redes Oportunistas Tolerantes a Atraso (*Location-Aware Routing for Opportunistic Delay Tolerant – GPS*), um protocolo *beaconless* no qual a aplicação resulta em um aumento no atraso dos pacotes [58]. Devido às características de cada abordagem, este trabalho considera que as abordagens sem uso de *beacon* e baseadas em aprendizado de máquina, predição e tolerância ao atraso não são adequadas devido ao aumento do atraso na comunicação e o aumento de consumo de energia e de recursos computacionais.

2.2.1 Protocolos de roteamento tradicionais

Os protocolos de roteamento tradicionais para redes *ad-hoc* móveis são baseados em topologia e podem ser proativos ou reativos.

O Roteamento por Vetor de Distância Sequenciado por Destino (*Destination Sequenced Distance Vector – DSDV*) [59] é um protocolo de roteamento proativo baseado em vetor de distância. O protocolo é baseado no algoritmo distribuído de Bellman-Ford, que ao convergir permite identificar as rotas com o menor número de saltos até cada destino. Os pacotes são transmitidos entre os nós da rede usando as tabelas de roteamento de cada nó. Sempre que um nó recebe uma atualização, ele notifica todos os seus vizinhos. Para que todos os nós tenham a topologia atualizada, as mensagens de controle são enviadas periodicamente. Cada mensagem de atualização enviada por um nó é marcada com um número de sequência. O número de sequência inicial para cada nó é aleatório porém sempre é incrementado quando ocorre uma atualização na topologia da rede. Devido à alta dinâmica das FANETs, a atualização de topologia é frequente, levando a uma quantidade significativa de mensagens de controle, que resulta em aumento de consumo de energia e de processamento dos nós, recursos escassos nos UAVs [60]. Por essa razão, esse protocolo não é avaliado neste trabalho.

O Roteamento por Origem Dinâmico (*Dynamic Source Routing – DSR*) [61] foi projetado especificamente para MANETs e emprega dois mecanismos para seu funcionamento: (1) descoberta de rota e (2) manutenção de rota. O processo de descoberta de rota busca calcular qual o melhor caminho entre a origem e o destino, enquanto o processo de manutenção de rota garante que a tabela de rotas sempre aponte o melhor caminho. A descoberta e a manutenção de rotas operam inteiramente sob demanda. O processo de descoberta de rota é iniciado quando um nó deseja transmitir dados para um nó de destino cuja rota é desconhecida. Para descobrir a rota, o nó fonte envia uma mensagem *Route Request* (Solicitação de Rota (*Route Request – RREQ*)) em difusão para os nós vizinhos. A mensagem RREQ carrega a informação sobre a origem, o destino, a identificação da solicitação e uma lista dos endereços dos nós intermediários por onde a mensagem RREQ é encaminhada. Cada nó que encaminha a mensagem adiciona seu próprio endereço na lista de registros e caso a mesma mensagem seja recebida novamente, o nó consegue identificar que há duplicidade através da identificação da solicitação, descartando-a caso seja uma duplicata. Quando o destino recebe a mensagem RREQ, retorna uma mensagem Resposta de Rota (*Route Reply – RREP*) ao iniciador do processo de descoberta de rota, que está registrado na lista existente na mensagem RREQ. A mensagem RREP é enca-

minhada pela sequência inversa dos nós atravessados pela mensagem RREQ. Ao receber a mensagem RREP, o nó de origem atualiza a tabela de rotas para envio das mensagens subsequentes, adicionando um temporizador para o tempo de vida da rota. O temporizador é atualizado sempre que a rota é usada. Se ficar ociosa por tempo suficiente para esgotar o temporizador, a rota é excluída da tabela automaticamente. Quando um nó transmissor tenta retransmitir um pacote o número máximo de vezes sem receber uma confirmação de que o pacote foi recebido, ele envia uma mensagem *Route Error* (RERR) para o nó de origem, assim todos os nós envolvidos na transmissão removem as rotas que utilizam aquele enlace. Então um novo processo de descoberta é iniciado pelo nó de origem. Por ser reativo, o DSR não necessita de uma troca de mensagens de controle periódica. À medida que os nós se movem mais e a topologia da rede é alterada, a quantidade de mensagens de controle é autodimensionada conforme necessário para as rotas atualmente em uso [62]. Apesar de ser projetado para MANET, o DSR tem desempenho pior do que outros protocolos de topologia reativos, como o AODV [63]. Dessa forma, o DSR não é utilizado na avaliação deste trabalho.

Assim como o DSR, o AODV [64] é um protocolo reativo baseado no algoritmo de Bellman-Ford que atua sob demanda, tendo suas rotas calculadas apenas quando um nó de origem possui dados para envio. O AODV responde rapidamente às mudanças topológicas que afetam as rotas ativas, sendo adequado para redes dinâmicas [65]. O AODV também emprega mecanismos para descoberta e manutenção de rotas com a inclusão de um número de sequência nas mensagens de controle, como o DSR para garantir que o UAV conheça o estado atual da rota e evitar a ocorrência de laços no cálculo da rota. O AODV realiza o roteamento baseado no estabelecimento dinâmico de entradas da tabela de rotas em nós intermediários, de forma que todo UAV mantém uma tabela de rotas contendo identificador do nó destino, tempo de vida da rota, identificador do nó do primeiro salto e quantidade de saltos. O tempo de vida da rota é reiniciado sempre que ela é utilizada. O processo de criação das rotas é similar ao DSR. Primeiramente é enviada uma mensagem RREQ em difusão para os nós vizinhos. A mensagem RREQ carrega a informação sobre a origem, o destino, a identificação da solicitação e um contador de saltos intermediários até o destino por onde a mensagem RREQ é encaminhada. Cada nó que encaminha a mensagem incrementa o contador de saltos. Quando o destino recebe a mensagem RREQ, retorna uma mensagem RREP ao iniciador do processo de descoberta de rota, que está registrado na lista existente na mensagem RREQ. A mensagem RREP é encaminhada pela sequência inversa dos nós atravessados pela mensagem RREQ. É possível que um nó receba mais de um RREP, sendo que a mensagem mais recente é descartada caso tenha

um número de saltos maior do que a rota registrada, ou é usada para atualizar a tabela caso tenha menos saltos que a rota já registrada. Ao receber a mensagem RREP, o nó de origem atualiza a tabela de rotas para envio das mensagens subsequentes. Para realizar a manutenção das rotas, os nós disponíveis enviam uma mensagem Erro de Rota (*Route Error* – RERR) quando há a interrupção de um enlace ou ocorre um erro de transmissão, indicando a todos os nós da rede que utilizam o enlace que ele não é mais válido e a lista de nós que estão inacessíveis. O AODV informa também todos os nós afetados pela falha, diferentemente do comportamento do DSR [66].

O OLSR [67] é um protocolo de roteamento proativo e, portanto, tende a apresentar sobrecarga de controle significativa. Contudo, o OLSR implementa uma estratégia para reduzir o número de transmissões de mensagens de controle. Para otimizar o envio das mensagens de controle, reduzindo sua quantidade na rede, o protocolo usa a técnica de retransmissão multiponto Relé Multiponto (*MultiPoint Relay* – MPR). O OLSR discrimina as rotas através da quantidade de saltos necessários para chegar ao destino e a atualização da tabela de rotas é feita através das mensagens de controle trocadas periodicamente com os nós vizinhos de até 2 saltos de distância. A partir das informações de vizinhança, os nós MPR são escolhidos. Esses nós são os responsáveis por disseminar a informação de topologia da rede pelos demais nós, diminuindo a sobrecarga na rede. Por ser um protocolo proativo, sempre existirá um atraso inicial para o encaminhamento de dados devido ao tempo de convergência do protocolo. Além disso, também há um tempo para que os nós MPR sejam definidos para então todos os nós criarem a tabela de rotas [68]. Sua principal desvantagem, além do tempo de convergência, é o aumento da sobrecarga de controle conforme a topologia da rede se torna mais dinâmica, o que aumenta o uso do processamento e por consequência o custo energético do protocolo [69]. Por isso, esse protocolo não é utilizado na avaliação comparativa deste trabalho.

2.3 Trabalhos Relacionados

Mahmud et al. introduzem protocolos baseados em topologia variantes do AODV e do OLSR para FANETs, a fim de adaptá-los à característica específica das FANETs da limitação de energia que os UAVs possuem [2]. Os autores propõem métodos para calcular a densidade da rede e se a quantidade de UAVs é o suficiente para que a rede tenha um nível de desempenho adequado. O julgamento da qualidade da rede é feito baseado na taxa de pacotes transmitidos com sucesso e a vazão de dados. Com base nessas métricas, o intervalo entre mensagens de controle é ajustado dinamicamente de acordo

com a velocidade dos UAVs e a quantidade de UAVs na rede. Caso a rede não tenha a quantidade de UAVs suficiente para obter desempenho adequado, então é aplicado também um mecanismo de retroalimentação (*feedback*) sobre as mensagens de controle *hello*, no qual quando um UAV receptor de uma mensagem de controle responde com outra mensagem de controle confirmando a conectividade, o intervalo entre as mensagens de controle é atualizado nos UAVs. Dessa forma, UAVs em alta velocidade devem ter pequenos valores para o intervalo entre mensagens de controle para refletir rapidamente mudanças na topologia da rede. Já UAVs mais lentos podem ter valores maiores para esse intervalo, ajudando a reduzir a sobrecarga de controle na rede. Quando a rede está mais densa, as mudanças de topologia são mais frequentes e o intervalo deve ser menor. Já quando a rede está pouco densa, as mudanças tendem a ser menos frequentes e podem ser utilizados intervalos maiores.

Li e Yan propõem o protocolo baseado em topologia Roteamento Preemptivo baseado em Estimativa de Estabilidade de Enlace (*Link stability Estimation-based Preemptive Routing* – LEPR) que evolui o AODV para prevenir a quebra de enlaces que irão ser rompidos em pouco tempo [70]. Utilizando a distância entre dois UAVs, o alcance máximo de transmissão e a diferença de distância entre os dois UAVs considerando as duas últimas mensagens de controle *hello*, estima-se a estabilidade do enlace para então serem aplicados dois métodos para o roteamento de pacotes: (1) processo de descoberta de rota reativo e (2) processo de manutenção de rotas semi-proativo. Para implementar o processo de descoberta de rota reativo, as mensagens de controle *hello* do AODV são modificadas para incluir a localização do UAV, obtida através do GPS. Já as mensagens RREQ são alteradas para incluir o identificador do UAV do primeiro salto e a métrica de estabilidade do enlace. Os pacotes são transmitidos através da rota com a maior estabilidade do enlace. O protocolo monitora constantemente a qualidade de comunicação no enlace e quando percebe que um enlace está na iminência de ser quebrado, o mecanismo semi-proativo de manutenção de rotas é ativado para calcular qual enlace alternativo oferece a melhor estabilidade para continuar a transmissão dos pacotes. O LEPR reduz a sobrecarga de controle na rede, que é um dos principais problemas do AODV para FANETs devido à constante quebra de enlaces provocada pela dinâmica da rede.

Gankhuyag et al. introduzem o protocolo baseado em topologia Protocolo de Roteamento Robusto e Confiável (*Robust and Reliable Routing Protocol* – RARP) [71], construído a partir do AODV. As mensagens RREQ do AODV são alteradas para enviar também a localização, trajetória, movimentação do UAV e a probabilidade de o UAV falhar. Essa probabilidade é calculada baseada em dois atributos: (1) informações do

UAV, como a quantidade de bateria e (2) condições geográficas, como a existência de chuva, vento ou prédios nas proximidades do UAV. Com esses atributos, o algoritmo calcula o tempo de conexão e o risco de falha de um enlace entre dois nós. Somado a esses atributos, o RARP também considera a quantidade de saltos na transmissão com a intenção de escolher rotas com menor quantidade de UAVs envolvidos na transmissão para diminuir o atraso na transmissão, além de evitar nós com maior probabilidade de falhas na transmissão. Após o cálculo da rota, o UAV transmissor calcula qual será o posicionamento futuro do UAV destino para então utilizar antenas direcionais para realizar a transmissão. O uso de antenas direcionais aumenta a distância de transmissão e evita a colisão de pacotes. Contudo, o RARP gera um grande número de mensagens de controle e não há um mecanismo para balancear as demandas de transmissão para evitar sobrecarga em um nó.

Imtiaz et al. introduzem o protocolo baseado em topologia EE HELLO AODV [2], construído a partir do AODV. O EE HELLO AODV utiliza parâmetros do UAV e da rede para alterar o intervalo entre mensagens de controle `hello` trocadas e o tempo de vida de um enlace para diminuir o custo energético do protocolo sobre o UAV, mantendo os mecanismos de criação e manutenção de rotas originais do AODV. O objetivo é diminuir a sobrecarga na rede devido a mensagens de controle que está intrinsecamente ligada ao custo energético sobre o UAV. Nós em alta velocidade ou redes muito densas são propícias a terem um menor intervalo entre as mensagens de controle `hello` enquanto nós em baixa velocidade ou redes com baixa densidade de nós são propícias para terem um maior intervalo entre as mensagens de controle. A densidade da rede é baseada na quantidade de UAVs, na região pela qual a rede se estende e na distância de transmissão média dos UAVs. A Equação 2.1 define o tempo de vida de um enlace aplicado no AODV,

$$T = IxH, \quad (2.1)$$

onde H é a quantidade de falhas no recebimento de mensagens de controle `hello` e I representa o intervalo entre as mensagens de controle. Desse modo, o EE HELLO AODV tem um tempo de vida dos enlaces dinâmico e baseado no intervalo de mensagens de controle. Ademais, quando o EE HELLO AODV identifica a rede como sendo de baixa densidade, também é aplicado um mecanismo de retroalimentação para as mensagens de controle `hello` a fim de maximizar as chances dos UAVs perceberem que um enlace é válido por um curto período de tempo.

Li e Huang propõem o protocolo baseado em localização Esquema de *Beacon* Adaptativo para Roteamento Geográfico (*Adaptive Beacon Scheme for Geographic Routing – ABPP*), que tem como base o GPSR [72]. O ABPP analisa o histórico de movimentação dos UAVs para tentar prever suas posições futuras aplicando o método de regressão linear. Ao aplicar um sistema de lógica difusa que tem como entrada um grau de erro de previsão, a saída é o intervalo entre as mensagens de controle. O método de adaptar o intervalo das mensagens de controle também pode ser replicado a outros protocolos de transmissão baseados em topologia.

Yang et al. propõem o protocolo baseado em localização Roteamento Alternativo Guloso (*Greedy-based Backup Routing – GBR*) como uma solução para todas as redes *ad-hoc*, usando o GPSR como método de descoberta de rota [73]. Todos os nós enviam mensagens de controle em difusão periódicas contendo sua localização, de forma que todos os nós saibam a posição dos vizinhos. Os pacotes RREQ são transmitidos via GPSR e contêm a posição, a velocidade e o tempo de vida esperado do enlace. O protocolo cria duas tabelas de rotas distintas, a rota primária, sendo o caminho ideal seguido pelo GPSR; e a rota alternativa (*backup*) para o próximo salto da transmissão caso o enlace primário seja perdido. Contudo, o GBR não considera a terceira dimensão no movimento dos nós e, apesar de apresentar bons resultados em simulações, a análise não é feita em comparação com protocolos mais difundidos e reconhecidos por terem bom desempenho, como o AODV ou GPSR.

Diferentemente dos protocolos baseados em posição discutidos, o protocolo GWPRP proposto neste trabalho é um protocolo de roteamento de camada cruzada, que utiliza informações da camada de rede e da camada de enlace na tomada de decisão de encaminhamento, considerando a mobilidade tridimensional dos nós. O protocolo é projetado para gerar baixa sobrecarga de controle na rede, visando economizar a bateria dos UAVs. Além disso, evita-se encaminhar pacotes para nós que estejam sobrecarregados ou com alta taxa de erros na camada de enlace, a fim de reduzir a taxa de perda de pacotes e atraso na transmissão.

Capítulo 3

O Protocolo de Roteamento de Camada Cruzada Guloso e baseado em Localização - GWPRP

O GWPRP é um protocolo de roteamento de camada cruzada que utiliza uma estratégia gulosa para o encaminhamento dos pacotes. O GWPRP tem como base o GPSR, porém incorpora estratégias adicionais para redução da sobrecarga de controle e melhoria do desempenho da comunicação em relação ao atraso e à perda de pacotes. O protocolo leva em consideração aspectos relacionados às FANETs com o objetivo de melhorar a entrega de pacotes e reduzir a latência. Este capítulo detalha o protocolo proposto e as estratégias incorporadas.

3.1 Aspectos relevantes para o desenvolvimento do protocolo

O GWPRP é desenvolvido levando em conta aspectos de confiança no enlace, tempo de processamento, sobrecarga de controle, tempo de vida da rede e latência fim-a-fim. É um protocolo de roteamento para transmissão *unicast* que utiliza informações de posicionamento geográfico e das camadas de enlace e de rede para encontrar o caminho até o destino usando uma estratégia de encaminhamento gulosa.

A disponibilidade do enlace representa a possibilidade de que uma ligação com um nó vizinho ainda esteja válida. Essa disponibilidade pode ser representada pela confiança sobre a informação da topologia da rede a um salto de distância. O foco principal do GWPRP é aumentar a taxa de entrega de pacotes e, portanto, é importante haver

estabilidade nos enlaces, de forma que a informação da topologia seja acurada para que pacotes não sejam encaminhados para um nó vizinho que, após a última troca de mensagens de controle, está em uma distância maior do que o alcance de transmissão dos nós.

O **tempo de processamento** é o período necessário para que um UAV identifique para qual UAV vizinho deve ser encaminhado o pacote. Um dos requisitos iniciais para o desenvolvimento do GWPRP é manter a complexidade do algoritmo baixa para evitar o aumento da latência fim-a-fim devido ao tempo de processamento e evitar o consumo excessivo de recursos escassos em UAVs, como poder computacional e capacidade energética. Dessa forma, as mensagens de controle do GWPRP são baseadas nas mensagens de controle do GPSR, mas inclui novos campos de informação como a taxa de erro de quadros e a quantidade de pacotes na fila de transmissão dos UAVs.

A **sobrecarga de mensagens de controle** na rede aumenta de acordo com a quantidade de mensagens de controle necessárias para que o protocolo de roteamento funcione corretamente. Uma motivação para se basear no GPSR é o modelo de troca de informações entre os nós da rede, com o envio periódico das mensagens de controle e agnóstico a características da rede, como a taxa de tráfego de dados. Assim como no GPSR, o envio de mensagens de controle é periódico no GWPRP evitando o aumento de mensagens de controle necessárias em redes densas observado em protocolos proativos e reativos, como o OLSR e AODV respectivamente [74].

O **tempo de vida da rede** depende da autonomia dos UAVs em se manterem ativos, ou seja, depende do tempo até que a bateria dos UAVs seja completamente descarregada. Assim, o protocolo não deve sobrecarregar o processamento do UAV para não gastar demasiados recursos energéticos. O GWPRP é projetado para evitar o consumo excessivo de energia nos UAVs ao levar em consideração a necessidade de reduzir a sobrecarga de controle, reduzindo o consumo de energia. Uma das formas de reduzir essa sobrecarga é evitar a escolha de rotas que tendem a não ser estáveis.

3.2 Funcionamento do GWPRP

O GWPRP é baseado no GPSR e se diferencia por considerar (i) a localização tridimensional; e (ii) as informações de camada cruzada no algoritmo de decisão do roteamento. O GWPRP funciona conforme o fluxograma apresentado na Figura 3.1, em que o algoritmo é executado a cada salto e para cada pacote. Sempre que a camada de rede do transmissor

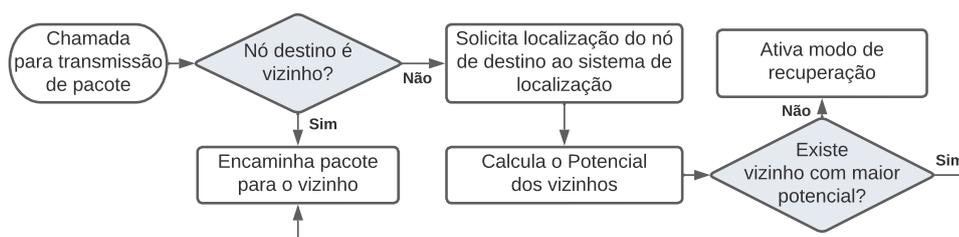


Figura 3.1: Funcionamento do GWPRP, executado a cada salto. Sempre que existe um pacote para transmitir, busca-se a localização do destino e calcula-se o Potencial dos vizinhos. O pacote é encaminhado para o vizinho com maior Potencial, que tende a ser aquele mais próximo do destino. Caso recaia em um ótimo local, o modo de Recuperação é iniciado.

recebe um pedido de transmissão, o protocolo solicita ao sistema de localização o posicionamento do nó que possui o endereço IP desejado. Em seguida, calcula os pesos de todos os vizinhos a um salto de acordo com uma métrica denominada **Potencial**, proposta neste trabalho. Após calcular o Potencial dos vizinhos, o GWPRP utiliza uma heurística de encaminhamento gulosa semelhante à do GPSR. O pacote é encaminhado para o vizinho de maior Potencial, que fica responsável por seguir com o encaminhamento. O vizinho que possui o maior Potencial é o que está mais próximo do destino, possui maior estabilidade na conectividade com o transmissor, menor ocupação na fila de transmissão e menor taxa de erro de quadro. Assim, o GWPRP tende a enviar os dados para os vizinhos que possuem a menor distância até o destino.

Se o nó transmissor atual possuir o maior Potencial comparado aos seus vizinhos, ocorre um problema de ótimo local, não sendo possível decidir para qual vizinho o pacote deve ser encaminhado. Nesse caso, o protocolo ativa o modo de Recuperação, no qual há dois mecanismos hierarquizados para continuar a transmissão. Primeiro tenta-se identificar se existe um nó mais próximo ao nó destino do que o transmissor atual, na tentativa de seguir com a transmissão de forma gulosa baseada somente na distância até o nó destino. Se nenhum vizinho estiver melhor localizado que o nó transmissor, o pacote é transmitido para o nó vizinho que mantém a trajetória angular mais próxima a uma trajetória imaginária em linha reta que interliga o transmissor atual e o nó de destino, ignorando a possibilidade de obstáculos como prédios no ambiente. Se também não houver um nó vizinho nesta situação, então o pacote é descartado pois considera-se não ser possível alcançar o destino.

A métrica de **Potencial** tem como objetivo identificar o nó vizinho com a maior probabilidade de obter sucesso na transmissão do pacote, e com o menor atraso. Para cada nó o cálculo é feito a partir das informações enviadas pelo vizinho em pacotes de

controle `hello`, em difusão, a cada um segundo. A Figura 3.2 ilustra o formato da mensagem de controle `hello` do GWPRP. Esses pacotes contêm a posição nos eixos X, Y e Z, a taxa de erro de quadros e a ocupação da fila do nó transmissor, isto é, a quantidade de pacotes que o nó transmissor possui em fila na camada de rede (L3) para transmitir. Cada nó também registra a quantidade de pacotes `hello` recebidos de cada vizinho como um indicador de estabilidade da conectividade com o vizinho. O não recebimento de um `hello` de um vizinho por dois segundos implica na sua remoção da tabela do nó transmissor. Se a conectividade com o vizinho removido for reestabelecida, ele é tratado como um nó novo, desconsiderando o histórico anterior à sua remoção da tabela.

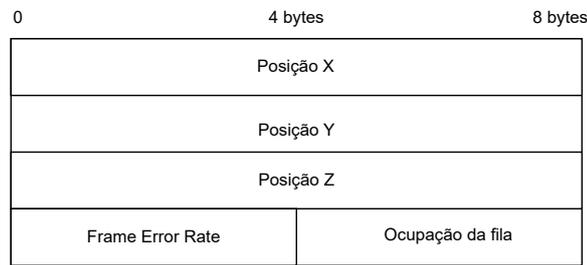


Figura 3.2: Formato da mensagem de controle `hello` modificada. Além da posição X e Y já existente na mensagem `hello` do GPSR, adiciona-se um campo para taxa de erro de quadros e ocupação da fila L3.

O GWPRP usa três tipos de informações para a tomada de decisão sobre o próximo salto, (i) distância até o nó destino, calculada a partir da informação de posição do nó vizinho recebida no pacote de controle e da posição do destino através do sistema de posicionamento; (ii) a qualidade do enlace, que está relacionada com a taxa de erro de quadros e a ocupação da fila de transmissão na camada de rede do próximo salto; e (iii) a estabilidade da conectividade com cada vizinho, determinada pela quantidade de pacotes `hello` recebidos. A taxa de erro de quadros é calculada para cada nó considerando todos os enlaces que o nó possui. Ao considerar a quantidade de pacotes na fila e a taxa de erro de quadros, o processo de escolha para a transmissão penaliza nós que já estão tendo dificuldade para atender a demanda de transmissão. A quantidade de pacotes `hello`, por sua vez, penaliza os nós que mantiveram conectividade por um curto período de tempo com o nó transmissor.

A Figura 3.3 mostra um exemplo de encaminhamento com o GWPRP. Cada UAV envia pacotes `hello` periodicamente, permitindo que todos os UAVs construam ou atualizem uma lista de vizinhos a um salto. Quando o UAV \mathcal{A} deseja enviar um pacote para o UAV \mathcal{H} , o encaminhamento ocorre da seguinte forma. \mathcal{A} usa \mathcal{C} para seguir com a transmissão. Ao receber o pacote, \mathcal{C} calcula os Potenciais de \mathcal{D} e \mathcal{E} . No exemplo, \mathcal{D} e \mathcal{E}

estão a uma mesma distância de \mathcal{C} , mas \mathcal{E} possui uma quantidade muito alta de pacotes em transmissão na sua fila e uma elevada taxa de erro de quadros (*Frame Error Rate* – FER) na camada de enlace. Assim, o Potencial calculado de \mathcal{D} é melhor do que o de \mathcal{E} , e \mathcal{C} decide enviar o pacote para \mathcal{D} . Por sua vez, \mathcal{D} envia para \mathcal{F} . Como \mathcal{F} possui conectividade direta com o destino \mathcal{H} , a transmissão é feita diretamente para ele.

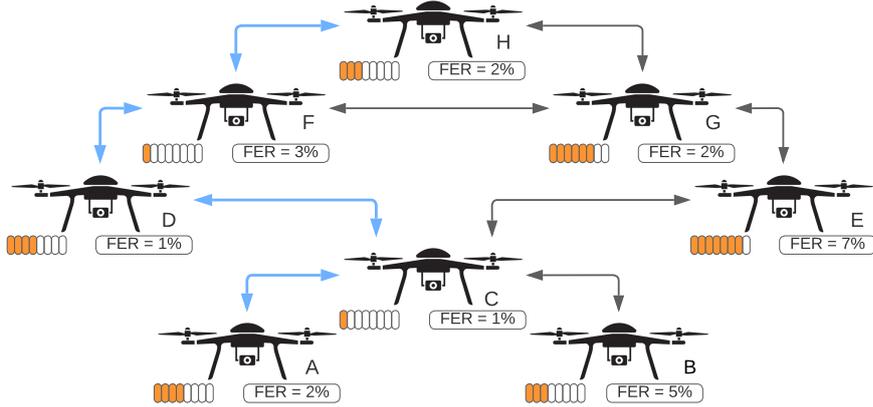


Figura 3.3: Exemplo de encaminhamento em uma FANET usando o GWPRP, entre a origem \mathcal{A} e o destino \mathcal{H} . A cada salto o Potencial é calculado para cada vizinho e o pacote é encaminhado para o vizinho de maior Potencial. Setas azuis indicam o caminho escolhido a cada salto.

3.2.1 Cálculo do Potencial

O cálculo do Potencial é feito conforme a Equação 3.1, onde D é a distância geográfica entre o nó vizinho e o nó de destino, H é a quantidade de pacotes hello recebidos do vizinho, Q é a taxa de ocupação da fila de transmissão na camada de rede do vizinho e FER (*Frame Error Rate*) é a taxa de erro de quadros do vizinho.

$$Potencial = [D \cdot (\delta + \eta \cdot H + \kappa \cdot Q + \phi \cdot FER)]^{-1} \quad (3.1)$$

Os elementos δ , η , κ e ϕ são multiplicadores relacionados às variáveis D , H , Q e FER , respectivamente. O GWPRP utiliza a distância como métrica prioritária, aplicando as demais métricas para adequar a percepção sobre a distância do vizinho ao nó destino observada pelo nó transmissor, refletindo nessa percepção a qualidade do enlace. Dessa forma, penaliza-se a percepção de distância aumentando-se a distância percebida quando a qualidade do enlace é reduzida. A alteração na percepção é feita através do cálculo do

Potencial, de acordo com o valor obtido para as demais métricas consideradas.

O cálculo dos pesos multiplicadores é feito com base no modelo de tomada de decisão *Analytic Hierarchy Process* (AHP), idealizado para auxiliar na tomada de decisões complexas [75]. O modelo Processo Hierárquico Analítico (*Analytic Hierarchy Process* – AHP) divide o problema geral em avaliações de menor importância, enquanto mantém, ao mesmo tempo, a participação desses problemas menores na decisão global. Para isso, relativiza a importância de cada critério sobre outros critérios individualmente. A partir do modelo AHP, constrói-se a matriz de julgamento cujas colunas j e linhas i representam os critérios de um mesmo nível. Os elementos m_{ij} representam uma comparação de importância entre pares de critérios i, j de um mesmo nível. Os valores da matriz triangular inferior são sempre iguais ao inverso dos valores da matriz triangular superior. Se $m_{ij} = 1$, os critérios i, j possuem a mesma importância. Se m_{ij} é igual a um valor no conjunto $\{3, 5, 7, 9\}$, o critério i é pouco, razoavelmente, consideravelmente ou significativamente mais importante que o critério j . Os valores $\{2, 4, 6, 8\}$ para m_{ij} são intermediários. Para o GWPRP, a matriz de julgamento é a seguinte:

$$\begin{array}{ccc} & \textit{Loc.} & \textit{Qual.} & \textit{Est.} \\ \textit{Loc.} & \left(\begin{array}{ccc} 1 & 9 & 9 \\ 1/9 & 1 & 2 \\ 1/9 & 1/2 & 1 \end{array} \right) & & \end{array}$$

Os elementos da diagonal principal são iguais a 1, já que um critério é sempre igualmente importante a ele mesmo. O critério localidade, *Loc.*, é representado pela primeira coluna ou pela primeira linha e é significativamente mais importante que todos os outros ($m_{12} = m_{13} = 9$). O critério qualidade, *Qual.*, é ligeiramente mais importante que a estabilidade, *Est.*, ($m_{23} = 2$). Assim, a distância é significativamente mais importante que as demais variáveis, a taxa de erro de quadros e a ocupação da fila possuem a mesma importância, mas são ligeiramente menos importantes do que a quantidade de pacotes hello. A definição dos valores é obtida empiricamente, considerando que a localização dos nós deve ser mais importante que as demais variáveis, uma vez que determina o cálculo do Potencial, e que o índice de consistência da matriz de julgamento deve ser menor do que 0,1 para que a matriz seja considerada consistente. O índice de consistência da matriz construída é 0,053. Calcula-se a prioridade de cada métrica através do autovetor normalizado da matriz. Os respectivos pesos de cada variável na Equação 3.1 são iguais aos autovalores da matriz seguindo as colunas da matriz de prioridades. Para o critério de qualidade do enlace, que possui dois atributos, o peso de cada atributo é metade da

prioridade da qualidade do enlace. Assim, os pesos na Equação 3.1 são os seguintes: $\delta = 0,814$, $\eta = 0,057$, $\kappa = 0,057$ e $\phi = 0,072$.

A quantidade de pacotes `hello` (H) e a ocupação da fila de transmissão (Q) são escalonadas antes de serem computadas no Potencial. Considerando h a quantidade de pacotes `hello` recebidos do vizinho ininterruptamente, q o tamanho da fila do vizinho e c a capacidade do *buffer* do vizinho, as Equações 3.2 e 3.3 mostram como as variáveis H e Q são escalonadas, respectivamente.

$$H = \begin{cases} 0,5, & \text{se } h = 2, \\ 0,25 & \text{se } h > 2, \\ 1 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$Q = \begin{cases} 0,8, & \text{se } q \leq 0,9 \cdot c, \\ 1,1 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.3)$$

O limiar da quantidade de mensagens de controle `hello` e o tamanho do *buffer* são parametrizáveis. Neste trabalho utilizam-se os valores 2 omissões de pacotes `hello` e 64 pacotes como limite máximo da fila, respectivamente.

Os valores de escalonamento desses atributos são obtidos empiricamente. Um maior Potencial é obtido quando o denominador da Equação 3.1 é menor e, portanto, valores menores para D , H , Q e FER são melhores. A variável H tem relação com a estabilidade da conectividade, de forma que quanto maior a quantidade de pacotes `hello` recebidos, menor deve ser o valor de H e melhor será a estabilidade. Analogamente, Q é melhor quanto menor for, de forma que a quantidade de pacotes na fila de transmissão, q , deve ocupar a menor fração possível da capacidade do *buffer*, c .

3.3 Implementação do GWPRP

O Algoritmo 1 mostra como a decisão de encaminhamento a cada salto é tomada. Nas linhas 6 a 11, calcula-se o Potencial de cada vizinho para encontrar aquele com maior Potencial. Caso o vizinho seja encontrado, o pacote é encaminhado, conforme linhas 27 e 28. Caso contrário, ocorreu um ótimo local e inicia-se o processo de Recuperação, especificado nas linhas 12 a 26, que consiste em uma busca pelo vizinho de menor distância ao destino (linhas 14 a 19) e de menor ângulo (linhas 20 a 26). Ao final do processo de

Recuperação, se o vizinho não for encontrado, ocorre o descarte do pacote conforme linhas 29 e 30.

Algoritmo 1 Processo de tomada de decisão de encaminhamento.

```

Entrada: TransmissionRequest
1: maior_potencial  $\leftarrow$  CALCULARPOTENCIAL(no_transmissor)
2: vizinho  $\leftarrow$   $\emptyset$ 
3: recuperacao  $\leftarrow$  true
4: recuperacao_angulo  $\leftarrow$  true
5:
6: para i  $\leftarrow$  0 até tamanho_lista_vizinhos faça
7:   aux  $\leftarrow$  CALCULARPOTENCIAL(lista_vizinhos[i])
8:   se aux > maior_potencial então
9:     aux  $\leftarrow$  maior_potencial
10:    recuperacao  $\leftarrow$  false
11:    vizinho  $\leftarrow$  lista_vizinhos[i]
12: se recuperacao então
13:   menor_distancia  $\leftarrow$  CALCULARDISTANCIADESTINO(no_transmissor)
14:   para i  $\leftarrow$  0 até tamanho_lista_vizinhos faça
15:     aux  $\leftarrow$  CALCULARDISTANCIADESTINO(lista_vizinhos[i])
16:     se aux < menor_distancia então
17:       aux  $\leftarrow$  menor_distancia
18:       recuperacao_angulo  $\leftarrow$  false
19:       vizinho  $\leftarrow$  lista_vizinhos[i]
20:   se recuperacao_angulo então
21:     menor_angulo  $\leftarrow$  360
22:     para i  $\leftarrow$  0 até tamanho_lista_vizinhos faça
23:       aux  $\leftarrow$  CALCULARANGULODESTINO(lista_vizinhos[i])
24:       se aux < menorAngulo então
25:         aux  $\leftarrow$  menorAngulo
26:         vizinho  $\leftarrow$  lista_vizinhos[i]
27: se vizinho  $\neq$   $\emptyset$  então
28:   ENVIARPACOTE(vizinho)
29: senão
30:   DESCARTARPACOTE()

```

O GWPRP é implementado no NS-3, um simulador de redes de eventos discretos amplamente usado na literatura [76]. O NS-3 é um simulador de código aberto e mantido por uma comunidade mundial e desenvolve um ambiente de simulação para pesquisa em rede, fornecendo uma grande quantidade de modelos validados com alta qualidade. Com base nas simulações realizadas com o NS-3, a proposta pode ser avaliada em detalhes com confiança nos dados obtidos e permitindo sua reprodutibilidade [77]. A Tabela 3.1 descreve brevemente os arquivos criados para a implementação do GWPRP¹.

Tabela 3.1: Arquivos de código fonte criados para a implementação do GWPRP.

| Arquivo | Descrição |
|--------------------|---|
| gwprp-packet.h/.cc | Definem os métodos e a operação sobre os pacotes do GWPRP |
| gwprp-ptable.h/.cc | Definem os métodos e a operação da tabela de roteamento |
| gwprp-rqueue.h/.cc | Definem os métodos e a operação da fila de pacotes |
| gwprp.h/.cc | Definem os métodos e a operação do GWPRP |

¹O módulo está disponível em <https://github.com/rdias612/GWPRP-ns3>.29

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Este capítulo está subdividido em quatro seções. A primeira apresenta os parâmetros utilizados nas simulações, os dois cenários criados para analisar o desempenho do GWPRP sobre simulações com densidades de nós distintas. Na segunda e na terceira seções são apresentados os resultados para os dois cenários de simulações com configurações de transmissão distintas. Por fim, na quarta seção é feita uma análise englobando as duas avaliações.

4.1 Cenários de avaliação

Avalia-se o GWPRP por meio de uma análise comparativa em um ambiente simulado utilizando o NS-3 versão 3.29, amplamente usado na literatura [76]. A comparação é feita com os protocolos EE HELLO AODV, baseado no AODV e criado para FANETs [2], e o GPSR, protocolo tradicional baseado em localização, comumente utilizado em VANETs. A base de configuração para ambos os cenários de avaliação consiste em uma rede com 40% dos nós agindo como origem, 40% como destino, e 20% dos nós agindo apenas como relés com a intenção de garantir que existam nós na rede nos três estados possíveis: (i) transmitindo pacotes, (ii) recebendo pacotes e (iii) retransmitindo pacotes. Todos os nós possuem capacidade de roteamento e um nó origem é par de um único nó destino. As aplicações instaladas nos pares de nós são agrupadas em grupos de 4 pares. Cada grupo transmite em instantes de tempo ligeiramente diferentes para evitar colisões no início da simulação. As aplicações enviam dados durante 120 s com uma taxa de tráfego Constant Bit-Rate (CBR) de 5 pacotes/s [78] onde o tamanho dos pacotes varia no conjunto $\{64 B, 128 B, 256 B, 512 B, 1024 B\}$. Varia-se a quantidade de nós no conjunto $\{30, 40, 50, 60, 70\}$, mantendo a proporção de nós origem/destino. Os nós seguem uma

trajetória aleatória com velocidade constante, mas escolhida aleatoriamente entre 18 km/h e 144 km/h [2]. As simulações são executadas 10 vezes para cada combinação de protocolo, quantidade de nós e tamanho de pacote, alterando-se a semente de aleatoriedade para modificar a movimentação, o posicionamento inicial dos nós e o conjunto de nós em que as aplicações cliente e servidor são instaladas. A propagação é modelada utilizando o modelo de Friis. Utiliza-se o padrão para FANET IEEE 802.11p [79] para comunicação em todas as simulações. A diferença entre o Cenário 1 e o Cenário 2 é o raio de alcance de transmissão dos UAVs e o tamanho da região de simulação. No Cenário 1, o alcance é de 300 m [80, 81], enquanto no Cenário 2 é de 500 m [82]. No Cenário 2 os nós se movimentam em uma região de 125.000.000 m³ enquanto no Cenário 1 os nós se movimentam em uma região de 27.000.000 m³. Os parâmetros de configuração dos cenários são resumidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resumo dos parâmetros de configuração usados nos dois cenários de simulação.

| Parâmetro | Cenário 1 | Cenário 2 |
|--|--|--|
| Posicionamento inicial | Aleatório | Aleatório |
| Região | $300\text{ m} \times 300\text{ m} \times 300\text{ m}$ | $500\text{ m} \times 500\text{ m} \times 500\text{ m}$ |
| Alcance de transmissão dos nós | 300 m | 500 m |
| Modelo de propagação | Velocidade constante | Velocidade constante |
| Perda de propagação | Modelo de Friis | Modelo de Friis |
| Protocolo de camada de enlace e física | 802.11p | 802.11p |
| Tipo de tráfego | Taxa de Bit Constante (<i>Constant Bit-Rate</i> – CBR) | Taxa de Bit Constante (<i>Constant Bit-Rate</i> – CBR) |
| Protocolo da camada de transporte | Protocolo de Datagrama de Usuário (<i>User Datagram Protocol</i> – UDP) | Protocolo de Datagrama de Usuário (<i>User Datagram Protocol</i> – UDP) |
| Tempo de simulação | 120 segundos | 120 segundos |
| Mobilidade | Gauss Markov | Gauss Markov |
| Velocidade | 18 a 144 km/h | 18 a 144 km/h |

Os protocolos são comparados em relação à taxa de entrega de pacotes, ao atraso fim-a-fim médio na chegada de pacotes e à média da variação desse atraso (*jitter*). Os resultados são apresentados com um intervalo de confiança de 95%, considerando a distribuição T de Student. É válido destacar que em todas as análises, os diagramas de caixa mostram tanto a mediana (linha sólida) quanto a média (linha tracejada). A principal diferença entre os cenários é a densidade da rede, o que permite verificar o comportamento do protocolo ao variar a densidade da rede. A Equação 4.1 define o cálculo de densidade da rede utilizado,.

$$D = NxT/A, \quad (4.1)$$

onde N é a quantidade de nós, T é o alcance de transmissão dos nós e A é a região onde a transmissão ocorre. No Cenário 1, a densidade varia de 0,22 a 0,52 nós/m² e no Cenário 2 varia de 0,12 a 0,28 nós/m³.

4.2 Cenário 1

A Figura 4.1 apresenta a taxa de entrega de pacotes ao variar a quantidade de nós e o tamanho do pacote, considerando que os nós têm um raio de transmissão de 300 metros. Os desempenhos dos protocolos são muito semelhantes. Considerando todos os protocolos, as Figuras 4.1(a) a 4.1(e) mostram que a taxa de entrega de pacotes tende a diminuir com o aumento da quantidade de nós na rede. Isso é esperado porque aumenta-se a competição pelo meio. Contudo, a Figura 4.1(f) mostra que o GWPRP tende a apresentar menor variabilidade na taxa de entrega e a ser menos afetado quando o tamanho dos pacotes varia, mesmo considerando todos os resultados obtidos para as diferentes quantidades de nós. As Figuras 4.1(a) a 4.1(e) mostram que o GWPRP também é menos afetado quando o tamanho dos pacotes aumenta, principalmente quando há mais nós na rede. A média da taxa de entrega para o GWPRP fica em torno de 85% considerando todas as variações de tamanho de pacote e quantidade de nós, já para o AODV fica em torno de 81%. O GPSR apresenta a pior média, em torno de 79%. O primeiro quartil, que representa 25% dos registros, para o GPSR está sempre abaixo de 74% de taxa de entrega, enquanto para o AODV esse valor é de 76% e para o GWPRP é de 80%.

A Figura 4.2 apresenta o resultado para o atraso médio fim-a-fim ao variar a quantidade de nós e o tamanho do pacote, considerando que os nós têm um alcance de transmissão de 300 m. As Figuras 4.2(a) a 4.2(e) mostram que o GWPRP apresenta desempenho superior ao EE HELLO AODV para todas as quantidades de nós e tamanhos de pacotes. O melhor desempenho se torna mais evidente à medida em que a quantidade de nós na rede aumenta, alcançando uma média de atraso médio fim-a-fim 43,67% menor que o EE HELLO AODV para pacotes de 512 B e 36,23% menor para pacotes de 1024 B. Comparado ao GPSR, o GWPRP apresenta desempenho semelhante, mas a partir de 60 nós torna-se evidente que o GPSR pode apresentar problemas de escalabilidade, visto que o crescimento do atraso tende a ser exponencial quando o tamanho do pacote trans-

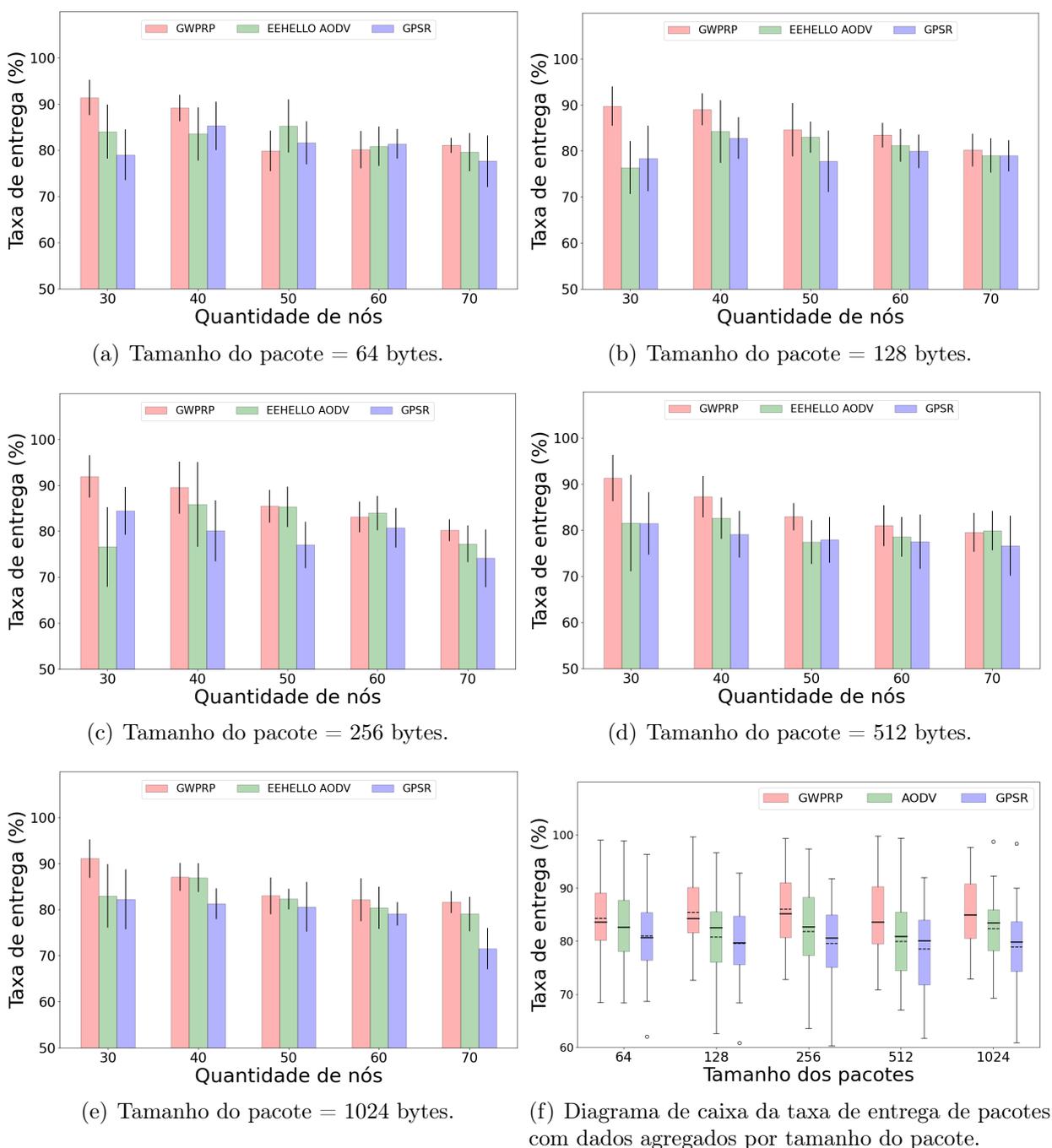


Figura 4.1: Influência da variação da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes sobre a taxa de entrega de pacotes no Cenário 1.

mitido aumenta. É esperado que um maior número de nós na rede e a transmissão de pacotes maiores resultem em maior atraso. Contudo, o GWPRP sofre menor impacto dessas variáveis comparado aos demais protocolos, com crescimento mais suave do atraso. O GWPRP apresenta desempenho superior sobre os demais protocolos com um atraso médio fim-a-fim em média 47,54% menor do que o EEHELLO AODV e 36,11% menor que o GPSR considerando todos os resultados obtidos variando o tamanho do pacote e a quan-

tidade de nós. A Figura 4.2(f) mostra que o GWPRP tende a apresentar menor variação no atraso médio fim a fim quando o tamanho dos pacotes varia, mesmo considerando todos os resultados obtidos para as diferentes quantidades de nós. O atraso médio fim a fim para o GWPRP fica em torno de 14 milissegundos considerando todas as variações de tamanho de pacote e quantidade de nós, enquanto GPSR apresenta média em torno de 22 milissegundos e o AODV tem o pior resultado, com média em torno de 27 milissegundos. O primeiro quartil, para o GPSR está sempre abaixo de 7 milissegundos para o GWPRP e GPSR, enquanto para o AODV esse valor é de 14 milissegundos.

O GWPRP também apresenta desempenho superior em comparação ao EE HELLO AODV e ao GPSR ao analisar o *jitter* médio fim-a-fim, como mostra a Figura 4.3. O EE HELLO AODV apresenta os maiores valores de *jitter* médio para pacotes menores ou iguais a 512 B independentemente do número de nós na rede. Já para pacotes com tamanho igual a 1024 B, o GPSR passa a apresentar valores que crescem rapidamente quando o número de nós aumenta. Já o GWPRP apresenta menor *jitter* médio fim-a-fim e é menos impactado pelo crescimento da rede e pelo tamanho do pacote. A Figura 4.3(f) mostra que o GWPRP tende a apresentar a maior consistência nos resultados em termos de *jitter* quando o tamanho dos pacotes varia, considerando todos os resultados obtidos para as diferentes quantidades de nós. A média do *jitter* percebido para o GWPRP fica em torno de 9 milissegundos considerando todas as variações de tamanho de pacote e quantidade de nós, enquanto GPSR e o AODV apresentam médias muito próximas, em torno de 22 milissegundos. O primeiro quartil, para o GPSR está sempre abaixo de 4,6 milissegundos para o GWPRP e o GPSR, enquanto para o AODV esse valor é de 12 milissegundos. Os resultados das Figuras 4.2 e 4.3 indicam que o GWPRP é mais escalável do que os demais protocolos, visto que é menos impactado pelo aumento da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes. A Figura 4.1 complementa esse indicativo, mostrando que a taxa de entrega de pacotes se mantém elevada e maior do que a dos outros protocolos.

4.3 Cenário 2

A Figura 4.4 apresenta a taxa de entrega de pacotes ao variar a quantidade de nós e o tamanho do pacote para o cenário com maior alcance de transmissão, no qual os nós têm um raio de cobertura de 500 metros. Os desempenhos dos protocolos são muito semelhantes e apresentam uma variabilidade na taxa de entrega muito próximas. Na média, o GWPRP e o EE HELLO AODV apresentam menor queda de desempenho à medida que o número de nós aumenta. Contudo, o GWPRP tende a ser menos afetado

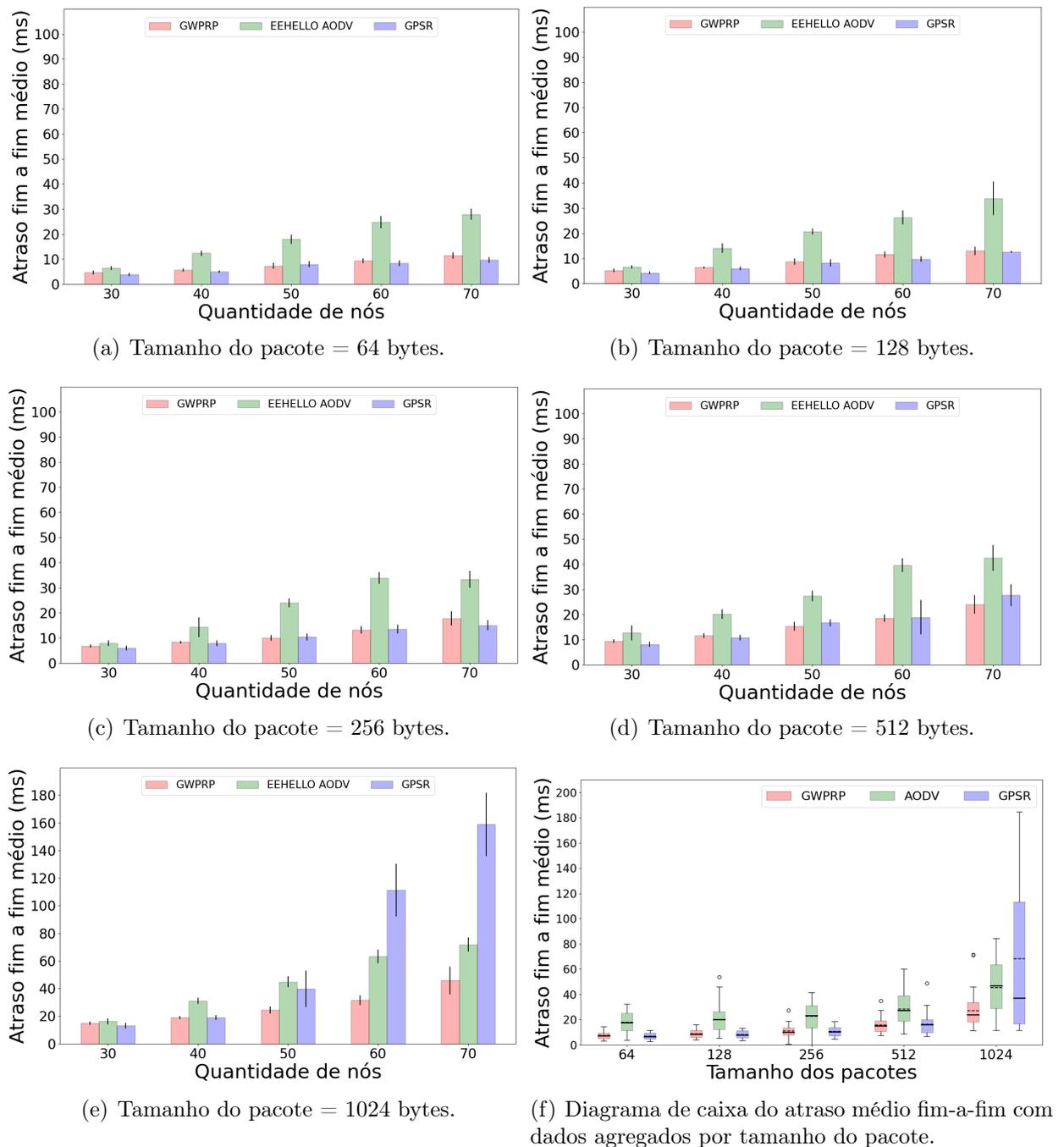


Figura 4.2: Influência da variação da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes sobre o atraso médio fim-a-fim sofrido pelos pacotes entregues no cenário 1

pelo aumento no tamanho do pacote comparado aos demais, principalmente quando há mais nós na rede. Ademais, mantendo-se o mesmo número de pacotes porém aumentando o tamanho do pacote tende a reduzir levemente a taxa de entrega para todos os protocolos. A Figura 4.4(f) mostra que o GWPRP tende a apresentar menor variabilidade na taxa de entrega e a ser menos afetado quando o tamanho dos pacotes varia considerando todos os resultados obtidos para as diferentes quantidades de nós. As Figuras 4.4(a) a

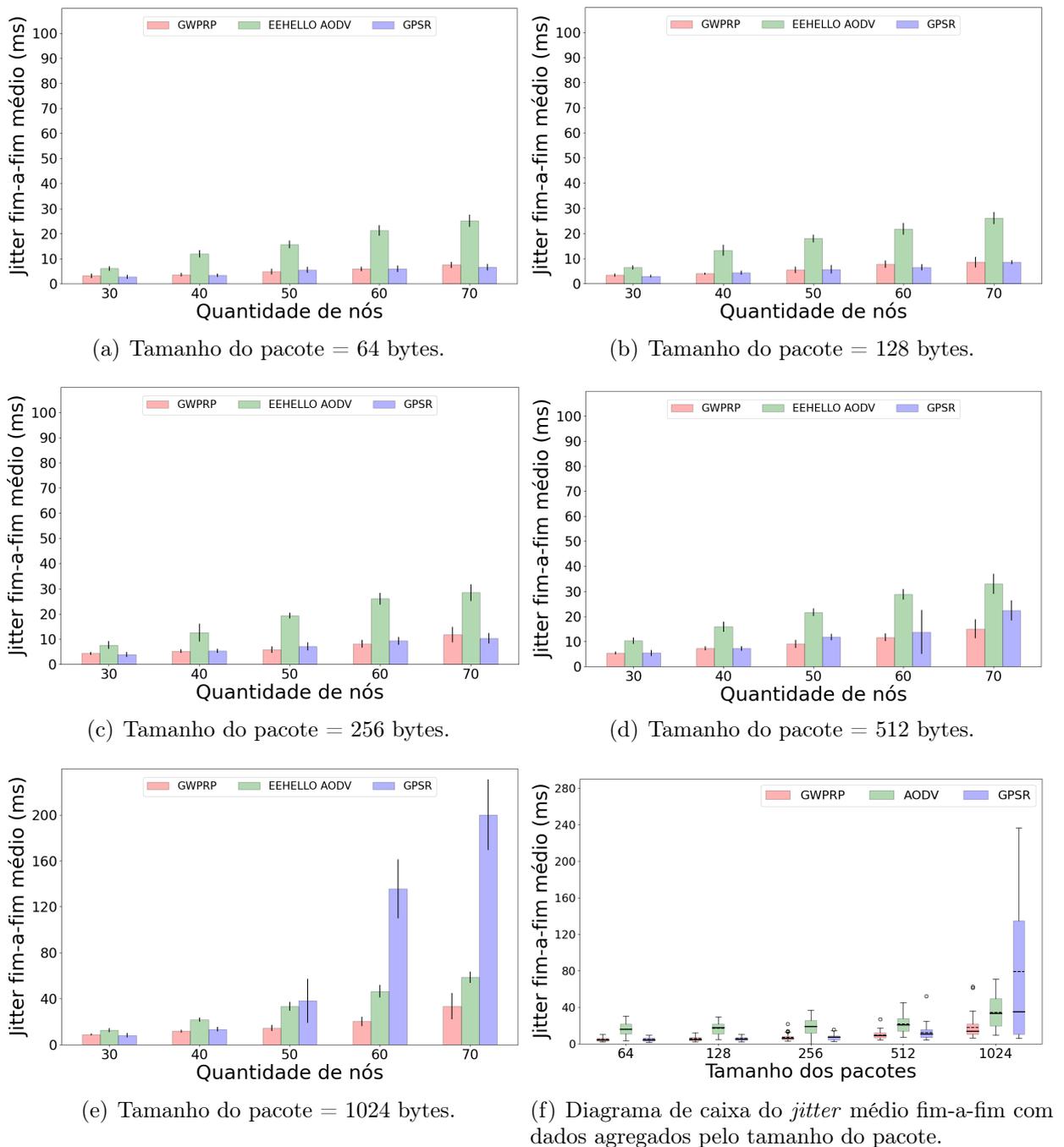


Figura 4.3: Influência da variação da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes sobre o *jitter* sofrido pelos pacotes entregues no cenário 1

4.4(e) mostram que o GWPRP também é menos afetado quando o tamanho dos pacotes aumenta, principalmente quando há mais nós na rede. A média da taxa de entrega para o GWPRP fica em torno de 84% considerando todas as variações de tamanho de pacote e quantidade de nós, Já para o AODV fica em torno de 82%. O GPSR apresenta a pior média, em torno de 79%. O primeiro quartil, que representa 25% dos registros, para o GPSR está sempre abaixo de 73% de taxa de entrega, enquanto para o AODV esse valor

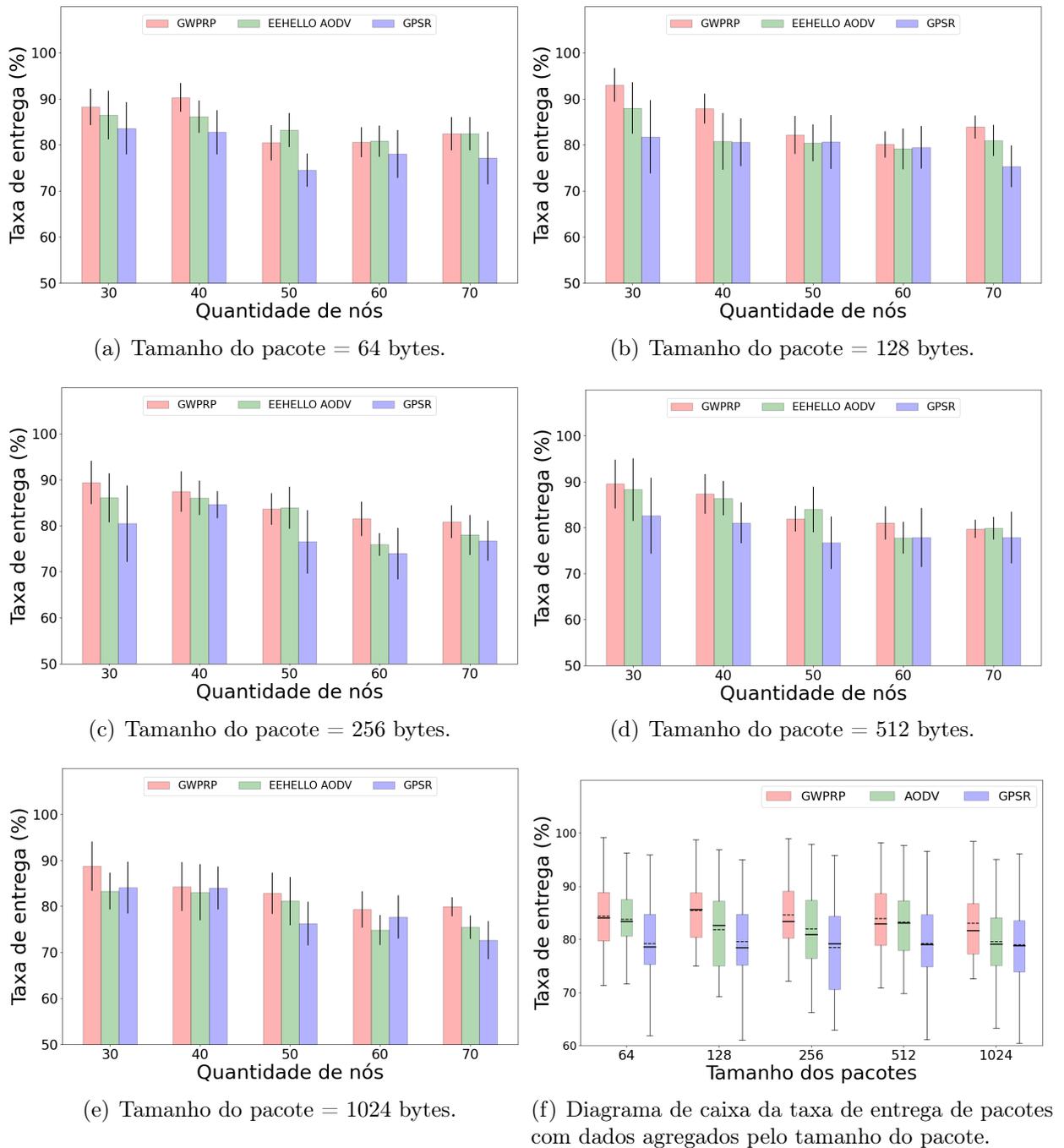


Figura 4.4: Influência da variação da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes sobre a taxa de entrega de pacotes no Cenário 2.

é de 76% e para o GWPRP é de 79%.

A Figura 4.5 apresenta o resultado para o atraso médio fim-a-fim ao variar a quantidade de nós e o tamanho do pacote para o cenário em que os nós alcançam 500 m de raio de cobertura. Os resultados obtidos são muito semelhantes aos do cenário com menor raio de cobertura. O GWPRP apresenta desempenho superior ao EE HELLO AODV em todos os cenários e desempenho semelhante ao do GPSR quando os pacotes são menores

do que 512 B. Quando o tamanho do pacote passa para 1024 B o atraso fim-a-fim médio para o GPSR cresce de forma exponencial com o tamanho da rede. A Figura 4.5(f) mostra que o GWPRP tende a apresentar menor variação no atraso médio fim a fim quando o tamanho dos pacotes varia, mesmo considerando todos os resultados obtidos para as diferentes quantidades de nós. O atraso médio fim a fim para o GWPRP fica em torno de 19 milissegundos considerando todas as variações de tamanho de pacote e quantidade de nós, enquanto o AODV apresenta média em torno de 41 milissegundos e o GPSR tem o pior resultado, com média em torno de 44 milissegundos. O primeiro quartil, para o GPSR está sempre abaixo de 7,3 milissegundos para o GWPRP e GPSR, enquanto para o AODV esse valor é de 15 milissegundos.

Em relação ao *jitter* fim-a-fim médio, os desempenhos também se comportam de forma semelhante ao cenário com menor raio de cobertura. A Figura 4.6 mostra o resultado. O EE HELLO AODV apresenta o pior desempenho entre os protocolos para pacotes com tamanho menor ou igual a 512 B. Já para pacotes com tamanho igual a 1024 B, o GPSR apresenta uma tendência de crescimento exponencial com o aumento na quantidade de nós na rede. Isso pode indicar problema de escalabilidade para esse protocolo. A Figura 4.6(f) mostra que o GWPRP tende a apresentar a maior consistência nos resultados em termos de *jitter* quando o tamanho dos pacotes varia, considerando todos os resultados obtidos para as diferentes quantidades de nós. A média do *jitter* percebido para o GWPRP fica em torno de 9 milissegundos considerando todas as variações de tamanho de pacote e quantidade de nós, enquanto GPSR e o AODV apresentam médias muito próximas, em torno de 22 milissegundos. O primeiro quartil, para o GPSR está sempre abaixo de 4,5 milissegundos para o GWPRP e GPSR, enquanto para o AODV esse valor é de 13 milissegundos.

4.4 Comparação entre os cenários

A Figura 4.7 é obtida a partir do cálculo da média de cada métrica para cada quantidade de nós, considerando todos os tamanhos de pacotes. A figura mostra os resultados para os Cenários 1 e 2. Os resultados obtidos são coerentes com o funcionamento dos protocolos. O GWPRP apresenta o melhor resultado de uma forma geral, sendo menos impactado pelo crescimento da rede. O melhor desempenho observado ao aumentar o número de nós na rede, indica que o GWPRP tende a ser mais escalável do que os demais protocolos. O desempenho do GWPRP é consideravelmente melhor em comparação ao GPSR, em especial em relação ao atraso, porque o GWPRP considera o Potencial dos nós

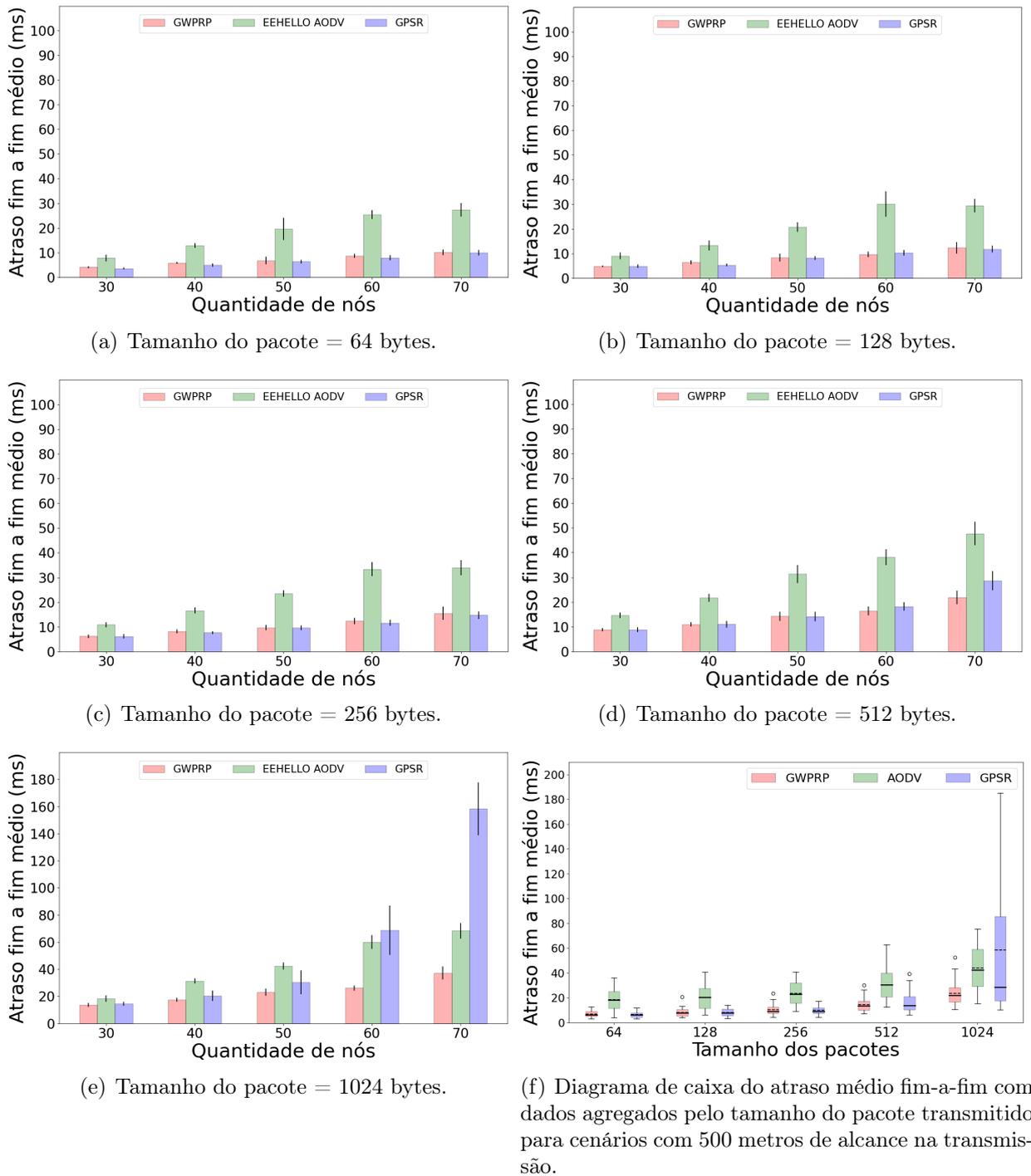


Figura 4.5: Influência da variação da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes sobre o atraso sofrido pelos pacotes entregues no Cenário 2.

vizinhos, o que inclui a quantidade de pacotes na fila de transmissão dos nós vizinhos, a taxa de erro de quadros e a quantidade de mensagens de controle trocadas. Além disso, o GWPRP considera a mobilidade tridimensional dos nós, enquanto o GPSR considera somente a mobilidade bidimensional para realizar o encaminhamento. Comparado ao EE HELLO AODV, os resultados tendem a ser melhores porque o EE HELLO AODV

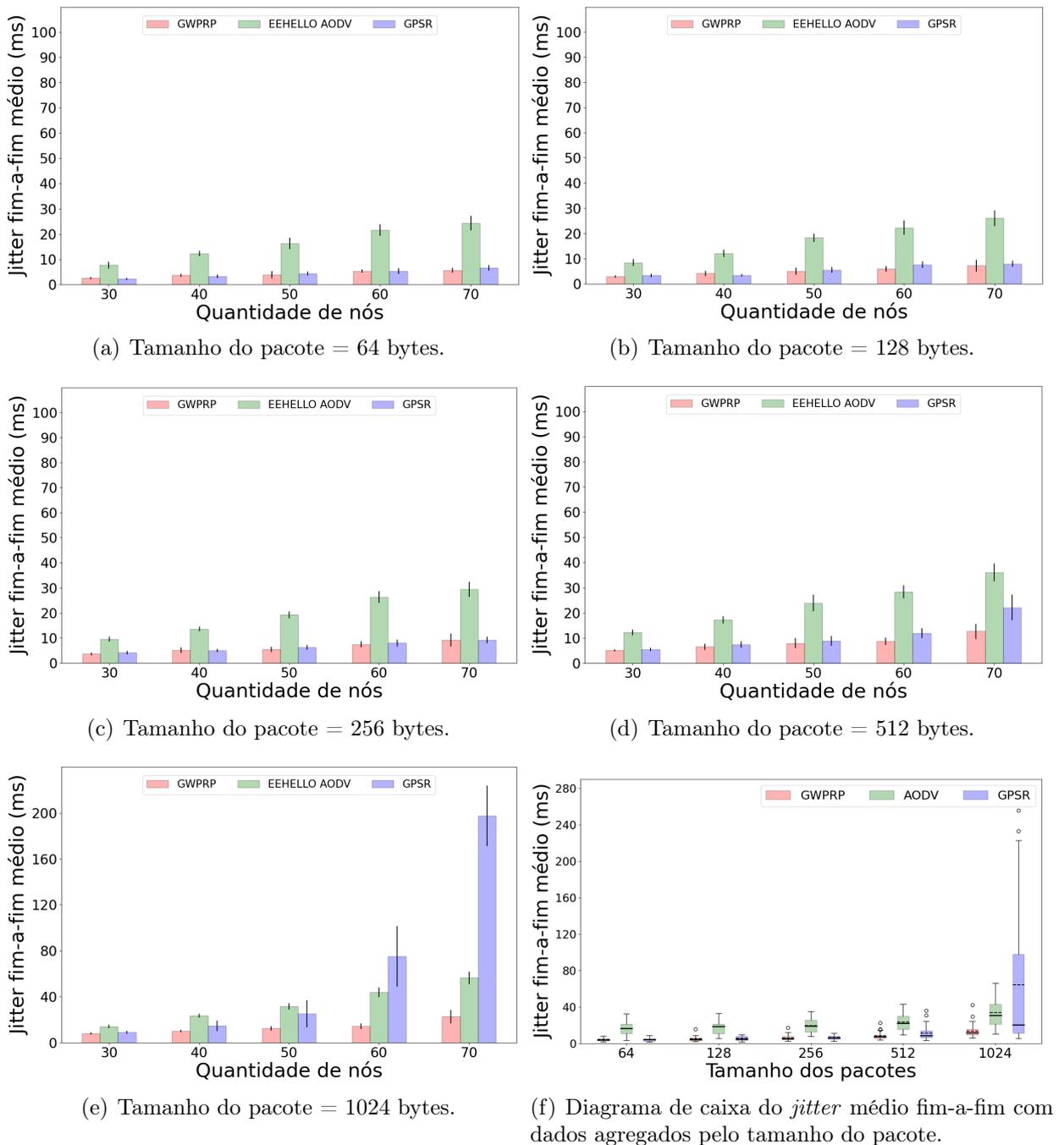
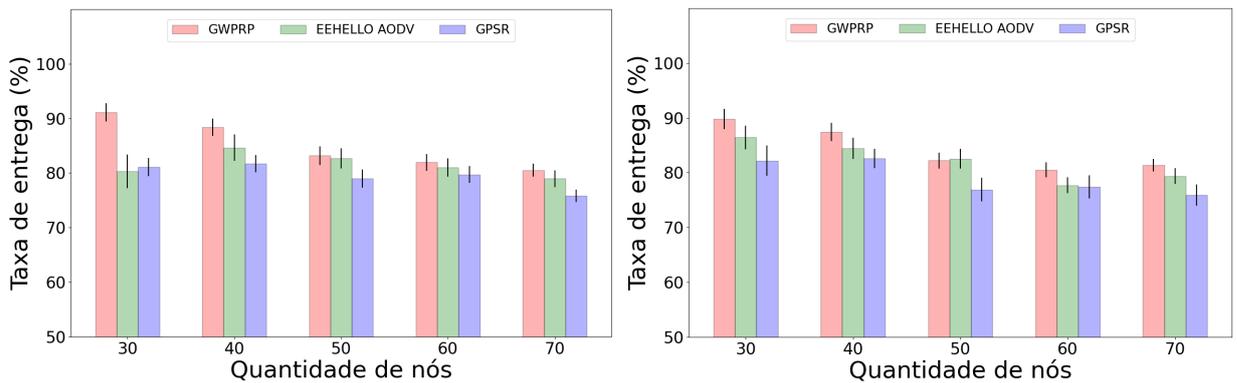
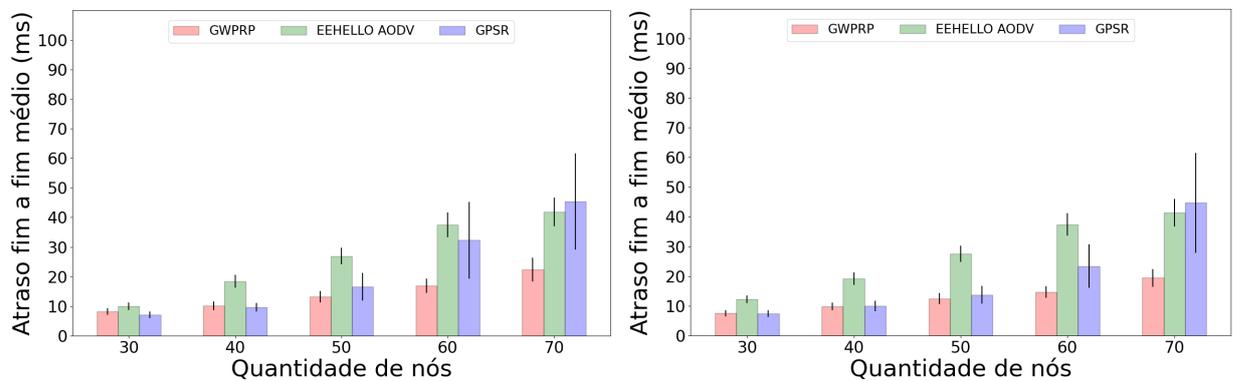


Figura 4.6: Influência da variação da quantidade de nós e do tamanho dos pacotes sobre o *jitter* sofrido pelos pacotes entregues no Cenário 2.

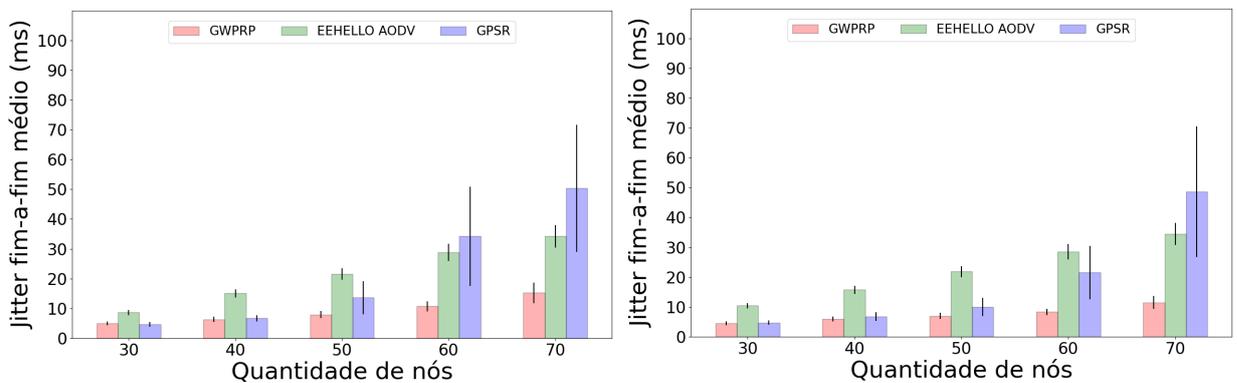
insere uma componente de atraso significativa devido ao processo de descoberta de rotas utilizando as mensagens RREQ (*Route Request*) e RREP (*Route Reply*). Adicionalmente, a elevada velocidade dos nós implica em mudança frequente da topologia da rede, aumentando a quantidade de vezes que o processo de descoberta de rota deve ser executado, o que resulta no maior maior atraso e *jitter* médios fim-a-fim observados nas simulações.



(a) Taxa de entrega de pacotes para 300 metros de transmissão. (b) Taxa de entrega de pacotes para 500 metros de transmissão.



(c) Atraso médio fim-a-fim de pacotes para 300 metros de transmissão. (d) Atraso médio fim-a-fim de pacotes para 500 metros de transmissão.



(e) Jitter médio fim-a-fim de pacotes para 300 metros de transmissão. (f) Jitter médio fim-a-fim de pacotes para 500 metros de transmissão.

Figura 4.7: Influência média da variação da quantidade de nós nas métricas de (a), (b) taxa de entrega de pacotes, (c), (d) atraso médio fim-a-fim e (e), (f) *jitter* médio fim-a-fim, considerando que os nós possuem um raio de cobertura de 300 ou 500 m. A média de cada métrica é calculada considerando-se tamanhos de pacotes distintos, variando entre 64 e 1024 Bytes. O GWPRP supera o GPSR e o EE HELLO AODV, mantendo a média da taxa de entrega de pacotes ligeiramente melhor, enquanto reduz as médias de *jitter* e atraso médios fim-a-fim.

Capítulo 5

Conclusão

As FANETs são formadas por um grupo de UAVs que se comunicam e se coordenam para realizar uma tarefa designada, sem qualquer interferência humana. As tarefas são diversas, abrangendo missões de busca e destruição, monitoramento de fronteiras, monitoramento de tráfego, controle remoto e vigilância. O uso de vários UAVs simplifica a execução da tarefa e melhora a resiliência da rede, mas insere a complexidade de comunicação em uma rede com topologia dinâmica. Assim, as FANETs podem ser classificadas como um subgrupo de rede *ad-hoc*, na qual os nós são UAVs que se comunicam de forma autônoma. Um dos principais desafios nessas redes é o roteamento dos dados devido a alta dinamicidade dos UAVs [83].

Esta dissertação propôs o GWPRP, um protocolo de camada cruzada baseado em localização que utiliza uma estratégia de roteamento gulosa para escolher o próximo salto no caminho até o destino. O GWPRP evolui o GPSR, um protocolo tradicional baseado em localização que também utiliza uma estratégia gulosa. Diferentemente do GPSR, o GWPRP considera a taxa de erro de quadros na camada de enlace e a ocupação da fila de transmissão na camada de rede dos nós vizinhos para determinar a qualidade do enlace, e a quantidade de mensagens de controle trocadas com o vizinho para determinar a estabilidade do enlace. Com base nessas informações, calcula-se o Potencial de cada vizinho, indicando qual vizinho tem enlaces com maior qualidade e estabilidade, e está próximo ao destino. Dessa forma, o GWPRP tende a encaminhar os pacotes em direção ao destino utilizando caminhos mais estáveis e de melhor qualidade.

O protocolo proposto foi implementado como um módulo para o NS-3, permitindo sua comparação com outros protocolos de roteamento utilizados em redes *ad-hoc*. A proposta foi avaliada através de simulações com mobilidade tridimensional, variando-se o número de nós e o tamanho dos pacotes. Os nós seguem trajetórias aleatórias e com velo-

idades constantes escolhidas aleatoriamente em um intervalo que varia de baixas a altas velocidades. A avaliação foi feita através de uma análise comparativa com os protocolos EE HELLO AODV e GPSR. Os resultados mostraram que o GWPRP alcançou taxa de entrega de pacotes estatisticamente igual aos outros protocolos, tendendo a ser superior. Ademais, o GWPRP apresenta menor atraso e *jitter* médios fim-a-fim. O impacto negativo do tamanho da rede no desempenho do protocolo também foi menos acentuado para o GWPRP, indicando que o protocolo proposto é mais escalável do que os demais.

Vislumbra-se como trabalhos futuros melhoramentos no GWPRP, como a determinação da estabilidade do enlace com base na predição do tempo de contato entre os nós e o uso de uma periodicidade dinâmica para envio das mensagens de controle com base na velocidade relativa entre os nós. Adicionalmente, deve-se investigar a influência de falhas de nós e de taxas de transmissão mais elevadas no desempenho geral do protocolo. Por fim, pretende-se avaliar o impacto energético do protocolo proposto.

Referências

- [1] SANG, Q.; WU, H.; XING, L.; XIE, P. Review and comparison of emerging routing protocols in flying ad hoc networks. *Symmetry*, v. 12, p. 971, 06 2020.
- [2] MAHMUD, I.; CHO, Y.-Z. Adaptive hello interval in FANET routing protocols for green UAVs. *IEEE Access*, v. 7, p. 63004–63015, 2019.
- [3] HASSAN, A. N. A.; ALGHAMDI, T.; YAWAR, a.; MEHMOOD, A.; SIDDIQUI, M. S. A review and classification of flying ad-hoc network (fanet) routing strategies. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, v. 8, 03 2018.
- [4] MUNSHI, A.; SHARMA, S.; KANG, S. S. A review on routing protocols for flying ad-hoc networks. In: . Coimbatore, India: IEEE, 2018. (2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)), p. 1270–1274.
- [5] CHRIKI, A.; TOUATI, H.; SNOUSSI, H.; KAMOUN, F. Fanet: Communication, mobility models and security issues. *Computer Networks*, v. 163, p. 106877, 08 2019.
- [6] COSTA, L.; FREITAS, E. Pignaton de; KUNST, R. Q-fanet: Improved q-learning based routing protocol for fanets. *Computer Networks*, v. 198, 08 2021.
- [7] LAKEW, D.; SA'AD, U.; DAO, N.-N.; NA, W.; CHO, S. Routing in flying ad hoc networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, PP, p. 1–1, 03 2020.
- [8] YANMAZ, E.; KUSCHNIG, R.; BETTSTETTER, C. Channel measurements over 802.11a-based uav-to-ground links. In: . Houston, TX, USA: IEEE, 2011. (2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)), p. 5.
- [9] WANG, J.; JIANG, C.; HAN, Z.; REN, Y.; MAUNDER, R.; HANZO, L. Taking drones to the next level: Cooperative distributed unmanned-aerial-vehicular networks for small and mini drones. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 12, p. 73–82, 07 2017.
- [10] ELTAHIR, I. The impact of different radio propagation models for mobile ad hoc networks (MANET) in urban area environment. In: . [S.l.: s.n.], 2007. p. 30–30. ISBN 978-0-7695-2846-5.
- [11] KHAN, F.; YAU, K.-L.; NOOR, R. M.; IMRAN, M. Routing schemes in fanets: A survey. *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 20, 12 2019.
- [12] HAN, Z.; SWINDLEHURST, A.; LIU, K. Optimization of manet connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, v. 58, p. 3533 – 3546, 10 2009.

- [13] KIM, D.-Y.; LEE, J.-W. Joint mission assignment and topology management in the mission-critical fanet. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 7, p. 2368–2385, 03 2020.
- [14] YASSEIN, M. B.; DAMER, N. A. Flying ad-hoc networks: Routing protocols, mobility models, issues. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, v. 7, p. 162–168, 07 2016.
- [15] SRIVASTAVA, A.; PRAKASH, J. Future fanet with application and enabling techniques: Anatomization and sustainability issues. *Computer Science Review*, v. 39, p. 100359, 02 2021.
- [16] RUIYANG, D.; WANG, J.; JIANG, C.; REN, Y.; HANZO, L. The transmit-energy vs computation-delay trade-off in gateway-selection for heterogenous cloud aided multi-uav systems. *IEEE Transactions on Communications*, PP, p. 1–1, 12 2018.
- [17] OUBBATI, O.; LAKAS, A.; ZHOU, F.; GÜNES, M.; YAGOUBI, M. A survey on position-based routing protocols for flying ad hoc networks (fanets). *Vehicular Communications*, v. 10, 11 2017.
- [18] BEKMEZCI, I.; SAHINGOZ, O.; TEMEL, İ. Flying ad-hoc networks (fanets): a survey. *Ad Hoc Networks*, v. 11, p. 1254–1270, 05 2013.
- [19] B.MAHALAKSHMI, D. A. N. Survey on routing protocols on fanet. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, v. 7, 02 2018.
- [20] ERDEM KILİÇ, M. Y. B. A software defined networking-based routing algorithm for flying ad hoc networks. *SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF COMPUTER AND INFORMATION SCIENCES*, v. 5, 05 2022.
- [21] YANG, Z.; LIU, H.; CHEN, Y.; ZHU, X.; NING, Y.; ZHU, W. Uee-rpl: A uav-based energy efficient routing for internet of things. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, v. 5, n. 3, p. 1333–1344, 2021.
- [22] MUKHERJEE, A.; MISRA, S.; CHANDRA, V. S. P.; RAGHUWANSHI, N. S. Ecor: Energy-aware collaborative routing for task offload in sustainable uav swarms. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, v. 5, n. 4, p. 514–525, 2020.
- [23] MAMECHAOU, S.; DIDI, F.; PUJOLLE, G. A survey on energy efficiency for wireless mesh network. *International journal of Computer Networks & Communications*, Academy and Industry Research Collaboration Center (AIRCC), v. 5, n. 2, p. 105–124, 03 2013.
- [24] LI, X.; ZHANG, T.; LI, J. A particle swarm mobility model for flying ad hoc networks. In: . [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.
- [25] HADIWARDYO, S.; DRICOT, J.-M.; CALAFATE, C.; CANO, J.-C.; HERNANDEZ-ORALLO, E.; MANZONI, P. Uav mobility model for dynamic uav-to-car communications. In: . [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6. ISBN 978-1-4503-6908-4.
- [26] KAUR, P.; SINGH, A.; GILL, S. S. Rgim: An integrated approach to improve qos in aodv, dsr and dsdv routing protocols for fanets using the chain mobility model. *The Computer Journal*, v. 63, 04 2020.

- [27] NAYAK, P.; VATHASAVAI, B. Impact of random mobility models for reactive routing protocols over manet. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*, v. 17, p. 13.1–13.9, 01 2016.
- [28] LIN, N.; GAO, F.; ZHAO, L.; AL-DUBAI, A.; TAN, Z. A 3d smooth random walk mobility model for fanets. In: . [S.l.: s.n.], 2019.
- [29] BAI, F.; SADAGOPAN, N.; HELMY, A. The important framework for analyzing the impact of mobility on performance of routing protocols for adhoc networks. *Ad Hoc Networks*, v. 1, p. 383–403, 11 2003.
- [30] ALKHATIEB, A.; FELEMBAN, E.; NASEER, A. Performance evaluation of ad-hoc routing protocols in (fanets). In: . [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- [31] NAYYAR, A. Flying adhoc network (fanets): Simulation based performance comparison of routing protocols: Aodv, dsdv, dsr, olsr, aomdv and hwmp. In: . [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–9.
- [32] THOUNHOM, S.; ANUSAS-AMORNKUL, T. The study of routing protocols for uavs using paparazzi mobility model with different altitudes. In: . [S.l.: s.n.], 2016. p. 106–111.
- [33] YASSEIN, M. B.; DAMER, N. A. Flying ad-hoc networks: Routing protocols, mobility models, issues. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, v. 7, p. 162–168, 07 2016.
- [34] SHUMEYE, D.; SA'AD, U.; DAO, N.; NA, W.; S.C.H.YANG; Z.LIU; LI, Z.; XU, Y. Routing in flying ad hoc networks: A comprehensive survey. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS AND TUTORIALS*, v. 22, p. 1071–1120, 2020.
- [35] KHAN, M.; QURESHI, I.; SAFI, A.; KHAN, I. Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols. *2017 First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT)*, 2017.
- [36] KHAN, I. U.; QURESHI, I. M.; AZIZ, M. A.; CHEEMA, T. A.; SHAH, S. B. H. Smart IoT control-based nature inspired energy efficient routing protocol for flying ad hoc network (FANET). *IEEE Access*, v. 8, p. 56371–56378, 2020.
- [37] YOUNIS, Z.; ABDULAZEEZ, A. M.; ZEEBAREE, S.; ZEBARI, R.; ZEEBAREE, Q. Mobile ad hoc network in disaster area network scenario a review on routing protocols. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, v. 17, p. 49–75, 03 2021.
- [38] SHANTAF, A. M.; KURNAZ, S.; MOHAMMED, A. H. Performance evaluation of three mobile ad-hoc network routing protocols in different environments. In: *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. Ankara, Turkey: IEEE, 2020. p. 1–6.
- [39] ARNOUS, R.; EL-KENAWY, E.-S.; SABER, M. A proposed routing protocol for mobile ad hoc networks. *International Journal of Computer Applications*, v. 178, p. 26–30, 08 2019.

- [40] RAMPHULL, D.; MUNGUR, A.; ARMOOGUM, S.; PUDARUTH, S. A review of mobile ad hoc network (manet) protocols and their applications. In: . [S.l.: s.n.], 2021. p. 204–211.
- [41] GUILLEN-PEREZ, A.; MONTOYA, A.-M.; SANCHEZ-AARNOUTSE, J.; CANO, M.-D. A comparative performance evaluation of routing protocols for flying ad-hoc networks in real conditions. *Applied Sciences*, v. 11, p. 4363, 05 2021.
- [42] BISWAS, A.; DASGUPTA, M. AODV-DSR hybrid reactive routing protocol and its generalization for mobile ad-hoc networks. In: . [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5.
- [43] LIU, J.; WANG, Q.; HE, C.; JAFFRES-RUNSER, K.; XU, Y.; LI, Z.; XU, Y.-J. Qmr:q-learning based multi-objective optimization routing protocol for flying ad hoc networks. *Computer Communications*, v. 150, 11 2019.
- [44] NAYYAR, A.; NHU, N. Introduction to swarm intelligence. In: _____. [S.l.: s.n.], 2018. p. 53–78. ISBN 9780429445927.
- [45] GARG, A.; GILL, P.; RATHI, P.; GARG, D. An insight into swarm intelligence. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, v. 2, 01 2009.
- [46] LI, X.; KEEGAN, B.; MTENZI, F. Energy efficient hybrid routing protocol based on the artificial fish swarm algorithm and ant colony optimisation for WSNs. *Sensors*, v. 18, p. 3351, 10 2018.
- [47] LEONOV, A. V. Application of bee colony algorithm for fanet routing. In: *2016 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. Erlagol, Russia: IEEE, 2016. p. 124–132.
- [48] LIU, K.; ZHANG, J.; ZHANG, T. The clustering algorithm of UAV networking in near-space. In: *2008 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*. Kunming, China: IEEE, 2008. p. 1550–1553.
- [49] LU, Y.; WEN, W.; IGOREVICH, K.; REN, P.; ZHANG, H.; DUAN, Y.; ZHU, H.; ZHANG, P. Uav ad hoc network routing algorithms in space–air–ground integrated networks: Challenges and directions. *Drones*, v. 7, p. 448, 07 2023.
- [50] ZANG, C.; ZANG, S. Mobility prediction clustering algorithm for uav networking. *2011 IEEE GLOBECOM Workshops, GC Wkshps 2011*, 12 2011.
- [51] KHAN, A.; AFTAB, F.; ZHANG, Z. Bicsf: Bio-inspired clustering scheme for FANETs. *IEEE Access*, PP, p. 1–1, 01 2019.
- [52] BAEK, J.; HAN, S. I.; HAN, Y. Energy-efficient uav routing for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 69, n. 2, p. 1741–1750, 2020.
- [53] SHARMA, V.; KUMAR, R.; KUMAR, N. Dptr: Distributed priority tree-based routing protocol for fanets. *Computer Communications*, v. 122, p. 129–151, 2018. ISSN 0140-3664.
- [54] OUBBATI, O.; LAKAS, A.; ZHOU f.; GüNEŞ, M. A survey on position-based routing protocols for flying ad hoc networks (FANETs). *Vehicular Communications*, v. 10, p. 29–56, 2017.

- [55] USMAN, Q.; CHUGHTAI, O.; NAWAZ, N.; KALEEM, Z.; KHALIQ, K. A.; NGUYEN, L. D. Lifetime improvement through suitable next hop nodes using forwarding angle in fanet. In: *2020 4th International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications Computing (SigTelCom)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 50–55.
- [56] OUBBATI, O. S.; ATIQUZZAMAN, M.; LORENZ, P.; TAREQUE, M. H.; HOS-SAIN, M. S. Routing in flying ad hoc networks: Survey, constraints, and future challenge perspectives. *IEEE Access*, v. 7, p. 81057–81105, 2019.
- [57] KIM, B.-S.; ULLAH, S.; KIM, K. H.; ROH, B.; HAM, J.-H.; KIM, K.-I. An enhanced geographical routing protocol based on multi-criteria decision making method in mobile ad-hoc networks. *Ad Hoc Networks*, v. 103, p. 102157, 2020. ISSN 1570-8705.
- [58] KAKAMOUKAS, G. A.; SARIGIANNIDIS, P. G.; ECONOMIDES, A. A. Fanets in agriculture - a routing protocol survey. *Internet of Things*, v. 18, p. 100183, 2022. ISSN 2542-6605.
- [59] PERKINS, C.; BHAGWAT, P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 24, 05 1999.
- [60] SAHA, D.; WARARKAR, P.; PATIL, S. Comprehensive study and overview of vehicular ad-hoc networks (vanets) in current scenario with respect to realistic vehicular environment. *International Journal of Computer Applications*, v. 178, p. 26–40, 05 2019.
- [61] JOHNSON, D.; MALTZ, D. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. *Mobile Comput.*, v. 353, 05 1999.
- [62] JOHNSON, D.; MALTZ, D.; BROCH, J. Dsr: The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks. *Ad Hoc Networking*, v. 5, 01 2002.
- [63] ALNUAMI, H. M. T. Comparison between the efficient of routing protocol in flying ad-hoc networks (fanet). In: . [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54909731>>.
- [64] PERKINS, C.; BELDING, E.; SR, D. Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. *IETF*, v. 3561, 01 2002.
- [65] PERKINS, C.; BELDING, E. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In: . [S.l.: s.n.], 1999. v. 25, p. 90–100.
- [66] DAS, S.; PERKINS, C.; BELDING, E. Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks. In: . [S.l.: s.n.], 2000. v. 8, p. 3–12.
- [67] CLAUSEN, T. H.; JACQUET, P.; ADJIH, C.; LAOUITI, A.; MINET, P.; MUELHALER, P.; QAYYUM, A.; VIENNOT, L. Optimized link state routing protocol (olsr). 01 2003.
- [68] WHEEB, A.; AL-JAMALI, N. Performance analysis of olsr protocol in mobile ad hoc networks. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*, v. 16, 01 2022.

- [69] LIMA, J.; RODRIGUES, T.; MELO, R.; CORREIA, G.; KELNER, J.; FEITOSA, E. On the tuning of wireless heterogeneous routing. In: . [S.l.: s.n.], 2013. p. 3391–3396.
- [70] LI, X.; YAN, J. Lepr: Link stability estimation-based preemptive routing protocol for flying ad hoc networks. *IEEE Symposium on Computers and Communications*, 2017.
- [71] GANKHUYAG, G.; SHRESTHA, A.; YOO, S.-J. Robust and reliable predictive routing strategy for flying ad-hoc networks. *IEEE Access*, v. 5, p. 643–654, 2017.
- [72] LI, X.; HUANG, J. Abpp: An adaptive beacon scheme for geographic routing in FANET. *18th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies*, 2017.
- [73] YANG, W.; YANG, X.; YANG, S.; YANG, D. A greedy-based stable multi-path routing protocol in mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, v. 9, p. 662–674, 2011.
- [74] LEONOV, A. V.; LITVINOV, G. A. About applying AODV and OLSR routing protocols to relaying network scenario in fanet with mini-UAVs. In: *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 220–228.
- [75] DARKO, A.; CHAN, A.; AMEYAW, E. O. E.; PÄRN, E.; EDWARDS, D. Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. *International Journal of Construction Management*, 2019.
- [76] LELIO, C.; MARCO, G.; MAURO, I.; FIAMMETTA, M.; MICHELE, M. Computer network simulation with ns-3: A systematic literature review. *Electronics*, 2020.
- [77] RILEY, G. F.; HENDERSON, T. R. The ns-3 network simulator. In: _____. *Modeling and Tools for Network Simulation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 15–34. ISBN 978-3-642-12331-3.
- [78] TAWFIQ, N.; LEHSAINI, M.; FOUCHAL, H. Partial backwards routing protocol for VANETs. *Vehicular Communications*, v. 18, p. 100162, 06 2019.
- [79] MALLIKARACHCHI, D.; WONG, K.; LIM, J. M.-Y. An authentication scheme for fanet packet payload using data hiding. *Journal of Information Security and Applications*, v. 77, p. 103559, 2023. ISSN 2214-2126.
- [80] ZHAO, L.; SAIF, M.; HAWBANI, A.; MIN, G.; LIN, N. A novel improved artificial bee colony and blockchain-based secure clustering routing scheme for fanet. *China Communications*, v. 18, p. 103–116, 07 2021.
- [81] TIWARI, V.; SHARMA, K.; CHAURASIA, B. Fanet based flights monitoring simulation system over cloud. *Springer Proceedings in Physics*, v. 166, p. 417–423, 06 2015.
- [82] MARIYAPPAN, K.; CHRISTO, M. S.; KHILAR, R. Implementation of fanet energy efficient aodv routing protocols for flying ad hoc networks [FEEAODV]. *Materials Today: Proceedings*, 03 2021.
- [83] MALHOTRA, A.; KAUR, S. A comprehensive review on recent advancements in routing protocols for flying ad hoc networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, v. 33, 03 2022.