

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

Rian T. D. Moreira, Dianne S. V. Medeiros

¹MídiaCom/TET/PPGEET/UFF
Universidade Federal Fluminense (UFF)
Niterói, RJ – Brasil

{riandias, diannescherly}@id.uff.br

Abstract. *The Flying Ad-hoc Networks (FANETs) enhance the coverage capacity in cellular networks by forwarding data in multiple hops using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). The link quality, however, depends on several features, including the three-dimensional space, not considered by classic routing protocols in ad-hoc networks, even when they take into account node's location. This paper proposes the GWPRP (Greedy Weighted Perimeter Routing Protocol), a position-based cross-layer greedy routing protocol. GWPRP makes forwarding decisions by considering information about the three-dimensional space, the link layer, and adjacent link stability. The protocol is evaluated in a simulated environment, comparing its performance with GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) and EE HELLO AODV (Energy Efficient Hello Ad-hoc On-Demand Distance Vector), a variant of AODV for FANETs. The results show that, on average, GWPRP achieves a 2.58% higher packet delivery ratio over AODV and 4.22% over GPSR with lower average end-to-end delay and jitter.*

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). A qualidade do enlace, no entanto, depende de diversas características, incluindo o espaço tridimensional, não considerado pelos protocolos de roteamento clássicos de redes ad-hoc, mesmo quando consideram o posicionamento dos nós. Este artigo propõe o GWPRP (Greedy Weighted Perimeter Routing Protocol), um protocolo de roteamento guloso de camada cruzada baseado em posição. O GWPRP toma decisões de encaminhamento considerando informações sobre o espaço tridimensional, a camada de enlace e a estabilidade do enlace adjacente. O protocolo é avaliado em ambiente simulado comparando o desempenho com o GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) 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 média 2,58% maior que o ADOV e 4,22% maior que o GPSR com menor atraso e jitter médios fim-a-fim.*

1. Introdução

Embora o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles* - UAVs) em aplicações militares já aconteça há décadas, apenas recentemente seu uso em aplicações

civis vem se popularizando [Mahmud and Cho 2019]. Algumas das aplicações civis atuais são as operações de busca e resgate, o monitoramento de regiões com câmeras de segurança, sensoriamento de temperatura, umidade e níveis de poluição em uma área, cobertura de sinal em uma região e roteamento de dados. A implantação da rede móvel sem fio para a 5ª Geração (5G) também potencializa a utilização dos UAVs. A ideia principal é ampliar temporariamente a área de cobertura da rede, permitindo que a FANET ilumine uma região de sombra, transferindo a informação em múltiplos saltos até uma estação base [Khan et al. 2021].

As FANETs diferem das Redes Móveis *Ad-hoc* tradicionais (*Mobile Ad-Hoc Networks* - MANETs) e veiculares (*Vehicle Ad-Hoc Networks* - VANETs) por possuírem uma topologia mais dinâmica com velocidades maiores e com padrões de mobilidade menos previsíveis, visto que os UAVs se movem no espaço tridimensional. Assim, a qualidade dos enlaces passa a depender também da movimentação no espaço tridimensional. Ademais, há restrições de capacidade computacional e bateria que trazem desafios para manutenção da FANET em operação durante longo tempo [Ashish and Jay 2021]. Portanto, os padrões e protocolos para FANETs devem considerar a dinâmica tridimensional dos elementos de rede e as restrições de capacidade dos UAVs [A. Chrikiac and Kamoun 2019].

Este artigo propõe o GWPRP (*Greedy Weighted Perimeter Routing Protocol*), um novo protocolo de roteamento de camada cruzada para FANETs que aplica uma estratégia de encaminhamento gulosa baseada na posição geográfica dos UAVs e em características da camada de enlace, para decidir o melhor vizinho em direção ao destino. Para tanto, inclui-se no processo de decisão métricas relacionadas à taxa de erro de quadros dos vizinhos e à quantidade de pacotes na fila de transmissão dos nós vizinhos. Ademais, o GWPRP atribui um grau de estabilidade para vizinhos imediatos, de acordo com a quantidade de mensagens de controle consecutivas recebidas do vizinho. Essa informação também é utilizada na tomada de decisão de encaminhamento. O GWPRP é avaliado através de simulações realizadas com o simulador *Network Simulator 3* (NS-3), versão 3.29. O cenário avaliado considera UAVs dispostos aleatoriamente em uma região delimitada na forma de um cubo e os UAVs se movem aleatoriamente com velocidade aleatória constante nessa região. O GWPRP é comparado ao EE HELLO AODV (Energy Efficient Hello *Ad-hoc On-Demand Distance Vector*) [Mahmud and Cho 2019], um protocolo baseado no AODV criado para FANETs, e ao GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) [Karp and Kung 2000], um dos protocolos baseados em posição mais conhecidos na literatura. Os resultados mostram que o GWPRP alcança a melhor taxa de entrega de pacotes, com menor atraso fim-a-fim, *jitter* e sobrecarga de controle.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 discute o desafio do roteamento nas FANETs. A Seção 3 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 4 apresenta o GWPRP. Na Seção 5, os resultados da avaliação de desempenho comparativa são apresentados. Por fim, a Seção 6 conclui este artigo e apresenta direções de trabalhos futuros.

2. Desafio do Roteamento em FANETs

O uso de UAVs como elementos de rede 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. Os UAVs se movem com velocidades intermediárias a altas, entre 30 e 460 km/h [Shumeye Lakew et al. 2020], sendo mais rápidos do que os nós das MANETs e das VANETs [Oubbati et al. 2017]. Além disso, 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 [Costa et al. 2021], mesmo quando a movimentação dos UAVs é predeterminada [Shumeye Lakew et al. 2020]. A topologia pode mudar com frequência devido à falha de UAVs, à entrada de novos UAVs na rede, à interferência atmosférica no enlace, dentre outros motivos, obrigando os UAVs a se reorganizarem e, no processo, se movimentarem em qualquer direção para ocupar a nova posição, o que dificulta a previsibilidade do movimento [Shumeye Lakew et al. 2020]. Dessa forma, as quebras de enlace podem se tornar ainda mais frequentes, dificultando a convergência de rotas. Devido a essas características, os protocolos de roteamento propostos para MANETs e VANETs não são adequados para FANETs [Khan et al. 2017]. O padrão de mobilidade dos nós nas FANETs impõem um desafio complexo para a proposta de soluções de roteamento nessas redes.

Os protocolos de roteamento para FANETs podem ser divididos da seguinte forma: baseados em topologia, baseados em localização, híbridos e bio-inspirados. 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. Já os **baseados em localização** encaminham os dados com base na posição geográfica dos UAVs, tentando deixar os dados cada vez mais próximos do destino. Protocolos **híbridos** utilizam mecanismos baseados em topologia e localização. Por fim, os **bio-inspirados** utilizam modelos baseados em fenômenos naturais para encontrar as melhores rotas [Shumeye Lakew et al. 2020]. Os protocolos baseados em localização são mais adequados para as FANETs [Khan et al. 2017] por se adaptarem rapidamente às mudanças na topologia, apesar de serem altamente dependentes da obtenção de informação acurada sobre a posição dos nós. Assim, este artigo foca em protocolos baseados em localização.

Os protocolos de roteamento podem seguir estratégias baseadas em predição, tolerância a atraso, algoritmo guloso, aprendizado de máquina, utilização de *beacons*, dentre outras [Oubbati et al. 2017]. As estratégias **baseadas em predição** consideram a posição geográfica, direção e velocidade dos nós para prever a posição futura e, portanto, são fortemente impactadas quando os nós podem se mover em qualquer direção no espaço tridimensional [Oubbati et al. 2017], tornando os protocolos mais complexos e menos assertivos. Consequentemente, 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. 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 [Oubbati et al. 2017]. 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 [Oubbati et al. 2019]. Em consequência, aumenta-se o con-

sumo 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, consequentemente aumentando a sobrecarga de controle e o atraso total [Kim et al. 2020]. Neste artigo, considera-se prejudicial aumentar o atraso na comunicação e o consumo de energia e de recursos computacionais. Dessa forma, as abordagens sem uso de *beacon* e baseadas em aprendizado de máquina, predição e tolerância ao atraso são consideradas não adequadas. Atentando para a existência de soluções simples que evitam o problema do ótimo local ao utilizar algoritmos gulosos, este artigo foca nesse tipo de abordagem.

3. Trabalhos Relacionados

Mahmud et al. introduzem variantes do AODV e do OLSR para FANETs, a fim de adaptá-los às características específicas das FANETs [Mahmud and Cho 2019]. Os autores propõem ajustar dinamicamente o intervalo entre mensagens de controle e o temporizador de tempo limite de acordo com a velocidade dos UAVs e a quantidade de UAVs na rede. 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 LEPR (*Link stability Estimation-based Preemptive Routing*) baseado no AODV, no qual o cálculo de uma rota considera atributos relacionados à localização e à mobilidade para inferir a qualidade, estabilidade e segurança de um enlace [Li and Yan 2017]. 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 RARP (*Robust and Reliable Routing Protocol*) [Gankhuyag et al. 2017], também é baseado no AODV. As mensagens de controle RREQ (*Route Request*) são enviadas em difusão somente para os nós da rede que estão na direção do nó destino ao utilizar antenas direcionais. As rotas então são computadas com base no posicionamento tridimensional e na trajetória percorrida para estimar o posicionamento futuro dos nós. 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. Já Li e Huang propõem o protocolo ABPP (*Adaptive Beacon Scheme for Geographic Routing*), baseado em localização. O protocolo usa uma abordagem preditiva, aplicando o método de regressão linear para prever a posição dos nós. As mensagens de controle são geradas em um intervalo dinâmico configurado por lógica difusa [Li and Huang 2017].

Yang et al. propõem o protocolo GBR (*Greedy-based Backup Routing*) como uma solução para todas as redes *ad-hoc*, usando o GPSR como método de descoberta de rota [Yang et al. 2011]. 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.

Diferentemente dos protocolos baseados em posição discutidos, o GWPRP 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.

4. GWPRP: Greedy Weighted Perimeter Routing Protocol

Este artigo propõe o GWPRP, 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. 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 1, em que cada etapa é executada a cada salto. Sempre que a camada de rede do transmissor 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**. O pacote é encaminhado para o vizinho de maior Potencial, que fica responsável por seguir com o encaminhamento. 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 o problema do 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. Caso não exista vizinho nessa condição, assume-se que existe linha de visada entre os nós e então é escolhido o vizinho com o menor desvio angular em relação à trajetória do nó destino, ignorando a possibilidade de obstáculos como prédios no ambiente. Se também

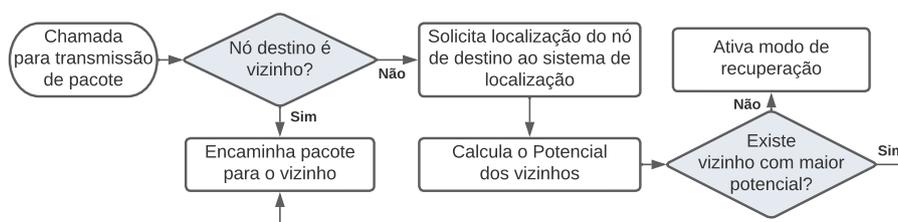


Figura 1. Funcionamento do GWPRP, executado a cada salto. Sempre que existe um pacote para transmitir, busca-se a localização do destino e calcula-se o Potencial dos vizinhos. O pacote é encaminhado para o vizinho com maior Potencial, que tende a ser aquele mais próximo do destino. Caso recaia em um ótimo local, o modo de Recuperação é iniciado.

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 1 segundo. Esses pacotes contêm a posição, a taxa de erro de quadros e a quantidade de pacotes que o nó transmissor possui em fila na camada de rede 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 2 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. Assim, 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; (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.

O cálculo do Potencial é feito conforme a Equação 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.

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

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 [Darko et al. 2019]. O modelo 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:

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

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 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 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, a Equação 2 mostra como as variáveis H e Q são escalonadas.

$$H = \begin{cases} 0,5, & \text{se } h = 2, \\ 0,25 & \text{se } h > 2, \\ 1 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2) \quad Q = \begin{cases} 0,8, & \text{se } q \leq 0,9 \cdot c, \\ 1,1 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3)$$

Os valores de escalonamento desses atributos são obtidos empiricamente. Um maior Potencial é obtido quando o denominador da Equação 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 .

Após calcular o Potencial dos vizinhos, o GWPRP utiliza uma heurística de encaminhamento gulosa semelhante à do GPSR. No caso do GWPRP, o pacote é encaminhado para o vizinho que possui o maior Potencial, isto é, aquele 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 quadros. Caso o algoritmo não identi-

fique nenhum vizinho com Potencial maior do que o nó transmissor, inicia-se o modo de Recuperação, no qual é calculada a distância de todos os vizinhos para o destino 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. 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 ← CALCULARPOTENCIAL(no_transmissor)
2: vizinho ← ∅
3: recuperacao ← true
4: recuperacao_angulo ← true
5:
6: para i ← 0 até tamanho_lista_vizinhos faça
7:   aux ← CALCULARPOTENCIAL(lista_vizinhos[i])
8:   se aux > maior_potencial então
9:     maior_potencial ← aux
10:    recuperacao ← false
11:    vizinho ← lista_vizinhos[i]
12: se recuperacao então
13:   menor_distancia ← CALCULARDISTANCIADestino(no_transmissor)
14:   para i ← 0 até tamanho_lista_vizinhos faça
15:     aux ← CALCULARDISTANCIADestino(lista_vizinhos[i])
16:     se aux < menor_distancia então
17:       menor_distancia ← aux
18:       recuperacao_angulo ← false
19:       vizinho ← lista_vizinhos[i]
20:   se recuperacao_angulo então
21:     menor_angulo ← 360
22:     para i ← 0 até tamanho_lista_vizinhos faça
23:       aux ← CALCULARANGULODESTINO(lista_vizinhos[i])
24:       se aux < menor_angulo então
25:         menor_angulo ← aux
26:         vizinho ← lista_vizinhos[i]
27: se vizinho ≠ ∅ então
28:   ENVIARPACOTE(vizinho)
29: senão
30:   DESCARTARPACOTE()

```

A Figura 2 mostra um exemplo de encaminhamento com 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 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.

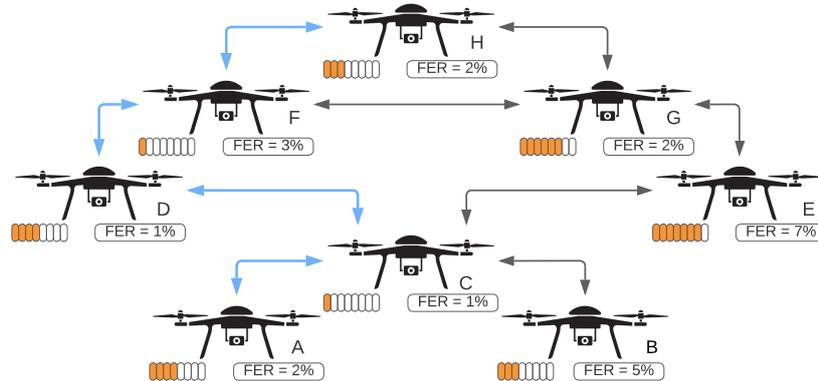


Figura 2. Exemplo de encaminhamento em uma FANET usando o GWPRP, entre a origem \mathcal{A} e o destino \mathcal{H} . A cada salto o Potencial é calculado para cada vizinho e o pacote é encaminhado para o vizinho de maior Potencial.

5. Resultados e Discussão

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 [Lelio et al. 2020]. A comparação é feita com os protocolos EE HELLO AODV, baseado no AODV e criado para FANETs [Mahmud and Cho 2019], e o GPSR. O cenário consiste em uma rede com 40% dos nós agindo como origem, 40% como destino, e 20% dos nós agindo apenas como relés e todos possuem capacidade de roteamento e um nó origem é par de um único nó destino. Os nós implementam o padrão IEEE 802.11p com raio de transmissão de 500 m [Mariyappan et al. 2021], possuem trajetória aleatória com velocidade constante, mas escolhida aleatoriamente entre 18 km/h e 144 km/h [Mahmud and Cho 2019]. A simulação é feita em uma área de 125.000km³ onde a propagação é modelada utilizando o modelo de Friis. As aplicações instaladas nos pares de nós são agrupadas em grupos de 4 pares e 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 5 pacotes/s [Tawfiq et al. 2019]. Varia-se a quantidade de nós no conjunto {30, 40, 50, 60, 70}, mantendo a proporção de nós origem/destino. O tamanho dos pacotes varia no conjunto {256 B, 512 B, 1024 B}. As simulações são executadas 10 vezes para cada 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. 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.

A Figura 3(a) apresenta a taxa de entrega de pacotes ao variar a quantidade de nós e o tamanho do pacote. Os desempenhos dos protocolos são muito semelhantes, porém o GWPRP tende a apresentar menor variabilidade na taxa de entrega. 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 pelo aumento no tamanho do pacote comparado aos demais, principalmente quando há mais nós na rede.

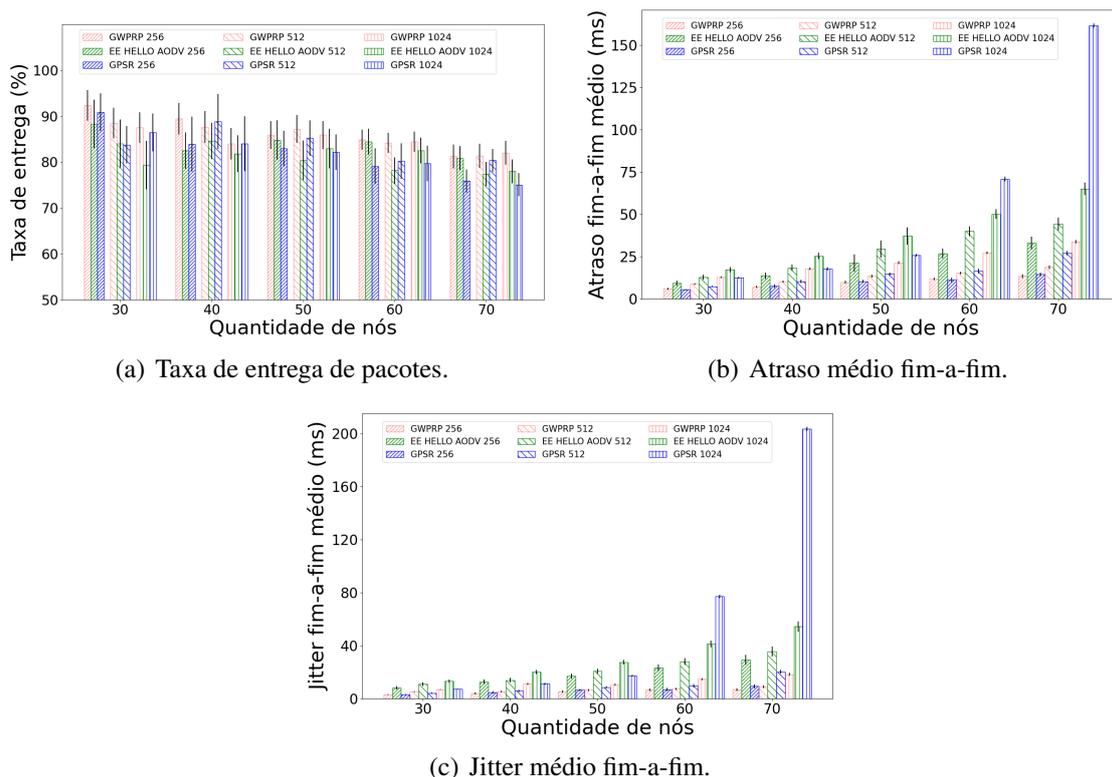


Figura 3. Influência da variação da quantidade de nós no cenário e do tamanho dos pacotes. O GWPRP supera o GPSR e o EE HELLO AODV, mantendo a (a) taxa de entrega de pacotes estatisticamente igual, enquanto reduz o (b) jitter e (c) atraso médios fim-a-fim.

A Figura 3(b) apresenta o resultado para o atraso médio fim-a-fim. O GWPRP apresenta desempenho superior ao EE HELLO AODV em todos os cenários. O melhor desempenho em relação ao atraso se torna mais evidente à medida em que a quantidade de nós na rede aumenta. 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 transmitido 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. 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 3(c). O EE HELLO AODV apresenta os maiores *jitters* médios para pacotes menores independentemente do número de nós na rede. Já para pacotes maiores, o GPSR passa a apresentar valores que crescem rapidamente quando o número de nós aumenta. O GWPRP apresenta menor *jitter* médio fim-a-fim e é menos impactado pelo crescimento da rede e pelo tamanho do pacote.

Os resultados obtidos são coerentes com o funcionamento dos protocolos. O GWPRP apresenta o melhor resultado e é menos impactado pelo crescimento da rede e pelo aumento no tamanho dos pacotes. 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 e ao *jitter* médios fim-a-fim, porque o GWPRP considera a quantidade de pacotes na fila de transmissão dos nós vizinhos, além de considerar 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 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 em maior atraso e *jitter* médios fim-a-fim para todos os cenários.

6. Conclusão

Este artigo propôs o GWPRP, um protocolo de camada cruzada baseado em localização, baseado na estratégia de roteamento gulosa para escolher o próximo salto no caminho até o destino. O GWPRP considera a taxa de erro de quadros na camada de enlace e a ocupação da fila de transmissão na camada de rede para determinar a qualidade do enlace, e a quantidade de mensagens de controle trocadas com o vizinho para determinar a estabilidade do enlace. A proposta foi avaliada através de simulações com mobilidade tridimensional, variando-se o número de nós e o tamanho dos pacotes. Os nós se movimentam em trajetórias aleatórias e com velocidades 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, mas com menor atraso e *jitter* médios fim-a-fim. O impacto do tamanho da rede no desempenho do protocolo também foi menos acentuado para o GWPRP, indicando que a proposta deste artigo é escalável. 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 da taxa de transmissão no desempenho geral do protocolo.

Referências

- A. Chrikiac, H. Touatia, H. S. and Kamoun, F. (2019). FANET: Communication, mobility models and security issues. *Computer Networks*, 163.
- Ashish, S. and Jay, P. (2021). Future FANET with application and enabling techniques: Anatomization and sustainability issues. *Computer Science Review*, 39.
- Costa, L., Kunst, R., and de Freitas, E. (2021). Q-FANET: Improved Q-learning based routing protocol for FANETs. *Computer Networks*, 198.
- Darko, A., Chan, A., E.E. Ameyaw, E. O., Pärn, E., and Edwards, D. (2019). Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. *International Journal of Construction Management*.
- Gankhuyag, G., Shrestha, A., and Yoo, S.-J. (2017). Robust and reliable predictive routing strategy for flying ad-hoc networks. *IEEE Access*, 5:643–654.

- Karp, B. and Kung, H. (2000). GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks. *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*.
- Khan, M., Qureshi, I., Safi, A., and Khan, I. (2017). 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)*.
- Khan, S. K., Naseem, U., Siraj, H., Razzak, I., and Imran, M. (2021). The role of unmanned aerial vehicles and mmWave in 5G: Recent advances and challenges. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32(7):e4241.
- Kim, B.-S., Ullah, S., Kim, K. H., Roh, B., Ham, J.-H., and Kim, K.-I. (2020). An enhanced geographical routing protocol based on multi-criteria decision making method in mobile ad-hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 103:102157.
- Lelio, C., Marco, G., Mauro, I., Fiammetta, M., and Michele, M. (2020). Computer network simulation with ns-3: A systematic literature review. *Electronics*.
- Li, X. and Huang, J. (2017). Abpp: An adaptive beacon scheme for geographic routing in FANET. *18th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies*.
- Li, X. and Yan, J. (2017). Lepr: Link stability estimation-based preemptive routing protocol for flying ad hoc networks. *IEEE Symposium on Computers and Communications*.
- Mahmud, I. and Cho, Y.-Z. (2019). Adaptive hello interval in FANET routing protocols for green UAVs. *IEEE Access*, 7:63004–63015.
- Mariyappan, K., Christo, M. S., and Khilar, R. (2021). Implementation of fanet energy efficient aodv routing protocols for flying ad hoc networks [feeaodv]. *Materials Today: Proceedings*.
- Oubbati, O., Lakas, A., Zhou, f., and Güneş, M. (2017). A survey on position-based routing protocols for flying ad hoc networks (FANETs). *Vehicular Communications*, 10:29–56.
- Oubbati, O. S., Atiquzzaman, M., Lorenz, P., Tareque, M. H., and Hossain, M. S. (2019). Routing in flying ad hoc networks: Survey, constraints, and future challenge perspectives. *IEEE Access*, 7:81057–81105.
- Shumeye Lakew, D., Sa'ad, U., Dao, N.-N., Na, W., and Cho, S. (2020). Routing in flying ad hoc networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(2):1071–1120.
- Tawfiq, N., Lehsaini, M., and Fouchal, H. (2019). Partial backwards routing protocol for vanets. *Vehicular Communications*, 18:100162.
- Yang, W., Yang, X., Yang, S., and Yang, D. (2011). A greedy-based stable multi-path routing protocol in mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 9:662–674.