

Autoconfiguração de rotas em redes ad-hoc de VANTs*

Luis H. C. Reis¹, Daniel F. Macedo¹, José Marcos S. Nogueira¹

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha – Belo Horizonte – MG – Brazil

{luiscantelli, damacedo, jmarcos}@dcc.ufmg.br

Resumo. As redes FANETs (*Flying Ad-Hoc Networks*) possuem características que as diferem das demais MANETs (*Mobile Ad Hoc Networks*), quais sejam, a velocidade, a movimentação 3D e as rápidas mudanças de topologia. A literatura indica que os protocolos de roteamento disponíveis para as FANETs não estão preparados para os desafios de autoconfiguração apresentados por essas características. Este trabalho confirma que a indicação da literatura através da realização de simulações em um cenário proposto utilizando os protocolos B.A.T.M.A.N. (*Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking*) e OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*). Essa confirmação dá-se através da análise das métricas vazão média, latência média e tempo médio de duração de comutação de rota. Além dessa análise, é proposta uma solução inicial dos problemas encontrados durante a análise dos protocolos analisados.

Abstract. The UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) ad hoc networks have characteristics that differ from other MANETs, such as speed, 3D movement, and fast changes in the network topology. The literature indicates that the routing protocols available for VANTs (*Veículo Aéreo Não Tripulados*) ad hoc networks do not correspond to the autoconfiguration challenges presented by these characteristics. This work will confirm the literature indication by performing simulations in a proposed scenario using the protocols B.A.T.M.A.N. and OLSR. We use three metrics, average throughput, average latency, and average time of route switching duration. In addition, we propose a solution to solve the problems encountered during the analysis of the analyzed protocols.

1. Introdução

Nos últimos anos a tecnologia de veículos aéreos não tripulados evoluiu, possibilitando sua utilização em uma variedade crescente de aplicações civis. Em algumas dessas aplicações há cooperação entre os veículos, intensa troca de dados, mobilidade dos dispositivos e estritos requisitos de desempenho e até mesmo funcionais [Kim and Lee 2018] [Wei et al. 2017]. Tais características levam à necessidade de abordagens adequadas de gerenciamento de configuração (auto-configuração muitas vezes), de desempenho e funcionamento. Um impacto imediato desses requisitos é sobre os protocolos de roteamento que devem ser projetados ou adaptados para operarem adequadamente.

As redes ad-hoc de VANTs, conhecidas como FANETs (*Flying Ad Hoc Network*), assim como as VANETs (*Vehicular Ad-Hoc Networks*), constituem uma classe de redes móveis ad-hoc (*Mobile Ad Hoc Network* (MANET)) na qual os nós são VANTs e

*Os autores agradecem o apoio das seguintes agências brasileiras de fomento: FAPEMIG, CAPES, CNPq e FAPESP.

há uma ou mais estações em terra [Mohammed et al. 2016] [Kim and Lee 2018]. Os VANTs movimentam-se em três dimensões, alcançam velocidades altas, com médias atingindo centenas de km/h [Gupta et al. 2016] [Fan et al. 2018]. Eles têm mais liberdade de movimento do que os veículos nas VANETs, uma vez que não estão restritos a estradas de rodagem. Isso se traduz em mudanças mais rápidas de topologia e imprevisibilidade de trajetórias, exigindo da rede uma autoconfiguração de rotas mais rápida para poder manter a conectividade e a comunicação. As FANETs e seus desafios estão no centro do estudo aqui relatado. As características típicas de mobilidade, relacionando as velocidades e movimentação dessas três classes de rede, são apresentadas na Tabela 1 [Gupta et al. 2016][Hayat et al. 2016]. São claras as diferenças entre as velocidades típicas e suas características de movimentação.

Tabela 1. Características de mobilidade das MANETs, VANETs e FANETs

Mobilidade	MANET	VANET	FANET
Velocidades típicas	2 m/s	20-30 m/s	100 m/s
Movimentação	2 dimensões	2 dimensões	3 dimensões

A literatura indica que os protocolos das redes ad-hoc disponíveis não estão preparados para os desafios de comunicação apresentados por uma FANET, com destaque para os protocolos de roteamento [Jiang and Han 2018] [Shumeye Lakew et al. 2020] [De Silva 2018] [Neelavathy Pari and Gangadaran 2018]. Segundo os diversos autores, os protocolos disponíveis hoje para as redes ad-hoc não permitiriam a essas redes dar resposta à vazão, latência e confiabilidade requeridas.

Na comunicação de VANTs entre si e entre VANT e estações em terra, alguns requisitos de desempenho já são encontrados na literatura, sendo um caso notável as especificações de casos de uso propostas pelo 3GPP [3GPP 2021] para comunicação em redes 5G entre dispositivos aéreos não tripulados. A Tabela 2 apresenta requisitos de três desses serviços.

Esse trabalho apresenta um estudo da comunicação entre VANTS considerando alguns requisitos de desempenho e focalizando nas respostas de protocolos de roteamento. Para isso, foi definido um cenário característico de comunicação entre VANTS que possibilita exercitar diversos aspectos de interesse na comunicação e estudar o comportamento de alguns protocolos de roteamento disponíveis para as FANETs, em particular a autoconfiguração de rotas. Esse cenário foi implementado no simulador Omnet++ [Heidemann and Isi 2002] com os protocolos B.A.T.M.A.N. e OLSR [Dearlove and Clausen 2014] [Force) 2021]. Os resultados das simulações mostram que esses protocolos não conseguem adaptar-se às mudanças de topologia como demandado pelas FANETs. Além da análise dos resultados das simulações, é também discutida uma solução para os problemas encontrados.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados; a Seção 3 apresenta o referencial teórico base para a pesquisa realizada; a Seção 4 apresenta o estudo propriamente dito, incluindo modelo de rede, requisitos de comunicação, cenário de teste e simulações; a Seção 5 apresenta os resultados e as análises; a Seção 6 discute uma proposta para a solução ou mitigação dos problemas encontrados e a Seção 7 conclui o texto.

Tabela 2. Casos de uso e requisitos de serviço de acordo com o 3GPP

Casos de Uso (Serviços)	Taxa de dados requerida		Latência fim a fim
Transmissão ao vivo de vídeo com definição de 4K, rotas pré-agendadas sujeitas a ajustes eventuais	Serviço	25Mbps origem:VANT	200 ms
	Controle	600Kbps destino:VANT	20 ms
Patrulhamento com envio de imagens 8K e controle realizado por serviço de controle que utiliza algoritmos de inteligência artificial (IA)	Serviço	120Mbps origem:VANT (Nota 1)	20 ms
	Controle	300Kbps destino:VANT	20 ms
Controle remoto realizado por controlador humano utilizando vídeo em HD transmitido pelo VANT	Serviço	≥ 25 Mbps origem:VANT	100 ms
	Controle	300Kbps destino: VANT (Nota 2)	20ms

Nota 1: A velocidade média é de $60km/h$.
Nota 2: A velocidade absoluta de voo desses casos pode ser superior a $160km/h$.

2. Trabalhos relacionados

A hipótese de que as FANETs atuais não são capazes de atender a esses requisitos devido aos protocolos disponíveis é baseada em vários trabalhos da literatura [Mukherjee et al. 2018] [Gupta et al. 2016] [Shumeye Lakew et al. 2020] [Jiang and Han 2018]. Contudo, esta mesma literatura falha em determinar de forma satisfatória quais os aspectos desses protocolos são causadores dessa incapacidade. Em [Singh and Verma 2015] os autores realizam simulações do protocolo OLSR em FANET com diferentes modelos de movimentação e mobilidade e concluem que o protocolo precisa ser melhorado para atender a essas redes, entretanto sem apontar os pontos-chaves de melhora. Pesquisas com o propósito de melhorar as FANETs estão disponíveis em trabalhos como em [Chen et al. 2019], [Sliwa et al. 2019], [Singh and Verma 2015] e [Gao et al. 2018]. Contudo, o foco desses trabalhos é na melhoria de aspectos específicos dos protocolos como redução de *overhead* na disseminação de pacotes de controle e redução de latência e não em analisar por quê esses protocolos de roteamento não atendem às demandas das FANETs.

Diferentemente dos trabalhos referenciados, este trabalho objetiva evidenciar a incapacidade de autoconfiguração dos protocolos de roteamento disponíveis por meio da análise dos protocolos OLSR e B.A.T.M.A.N., observando aspectos em comum em vez de especificidades desses protocolos.

3. Referencial teórico

Nesta seção são apresentados brevemente os conceitos e definições relacionados às classes de protocolos de roteamento para MANETs. Além desses conceitos serão descritos os protocolos B.A.T.M.A.N. e OLSR.

Existem três classes de protocolos de roteamento para MANETs: (1) protocolos proativos ou direcionados a tabelas, que estabelecem e atualizam constantemente uma tabela de rotas para todos os nós destino da rede; (2) protocolos de rota reativos ou sob-demanda, que estabelecem as rotas quando uma comunicação na rede faz-se necessária; e (3) protocolos híbridos que misturam protocolos proativos e reativos. Os protocolos híbridos buscam balancear a aplicação dos protocolos proativos e reativos, separando o roteamento em camadas ou zonas, e os executando onde forem mais eficientes.

3.1. Os protocolos OLSR e B.A.T.M.A.N.

Nesta sessão são apresentados brevemente os protocolos de roteamento OLSR e B.A.T.M.A.N. concebidos para MANETs utilizados neste estudo. A escolha desses protocolos deu-se por serem eles protocolos proativos e que, segundo [Russoniello and Gamess 2018], é a classe de protocolos com melhores resultados em MANETs com altas velocidades, como é o caso das FANETs. Outro motivo de escolha desses protocolos foi por serem diferentes na escolha da melhor rota. O protocolo OLSR procura rotas com o menor número de saltos entre a origem e o destino da comunicação, enquanto o protocolo B.A.T.M.A.N. avalia as rotas com os melhores *links* entre a origem e o destino da comunicação, mesmo que essa rota possua um número maior de saltos. Essa diferença leva a uma diversidade de abordagens na seleção das melhores rotas, como será evidenciado a seguir.

O protocolo *Optimized Link State Routing Protocol* (OLSR) [Dearlove and Clausen 2014] [Force) 2021] é um protocolo proativo que mantém em cada nó uma tabela com informações sobre as melhores rotas para todos os outros nós da rede. Ele consiste de três processos básicos: descoberta de vizinhos, disseminação de informações pelo MPR (*Multipoint Relay*) e anúncio do estado dos *links*. O processo de descoberta de vizinhos é o processo pelo qual cada nó descobre com quais nós possui comunicação direta (sem saltos) e bidirecional (pode enviar e receber dados). Nesse processo cada nó dissemina uma mensagem nomeada HELLO ao mesmo tempo que recebe mensagens HELLO de outros nós. Um nó *A* que recebe uma mensagem HELLO de um vizinho *B* indicando que recebeu previamente um HELLO de *A* deve considerar o *link A-B* bidirecional. Como a mensagem HELLO de *B* identifica todos os seus vizinhos, o nó *A* obtém a informação de quais são os vizinhos de *B* nesse processo. As mensagens HELLO são enviadas periodicamente, mas podem ser enviadas não periodicamente em casos específicos.

O protocolo OLSR dissemina informações para toda a rede conforme o conceito *relays* multi-ponto (MPR - Multi-Point Relays). Cada nó elege entre os seus vizinhos com comunicação bidirecional um subconjunto de nós (conjunto MPR) tal que uma mensagem originada nesse nó é retransmitida pelo conjunto MPR para todos os nós a dois ou mais saltos de distância. Entre os nós candidatos a MPR, aqueles com maior número de nós adjacentes são eleitos para o conjunto.

O anúncio do estado dos *links* é o processo pelo qual os nós determinam quais

informações dos estados dos *links* devem ser disseminadas. Cada nó deve anunciar os *links* entre ele e seu conjunto de MPR, a fim de permitir que todos os demais nós possam calcular as rotas mais curtas (com menor número de saltos) entre eles e os demais nós da rede. Esses anúncios de estado do *link* são transportados em mensagens TC (*Topology Control*), que são transmitidas pela rede por disseminação de informações através do MPR. Como um nó seleciona MPRs apenas entre vizinhos com comunicação bidirecional, os *links* anunciados através das TCs são bidirecionais. As mensagens TC são enviadas periodicamente; no entanto, certos eventos podem desencadear TCs não periódicos. Para o protocolo OLSR, a melhor rota para um outro nó é aquela que passa pelo menor número de nós intermediários.

O protocolo *Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking* (B.A.T.M.A.N.) [Website 2021] segue uma abordagem de roteamento descentralizada. Os nós não possuem conhecimento total da topologia da rede e somente informações sobre o próximo nó da rota são armazenadas. As rotas completas para os outros nós da rede permanecem desconhecidas. Cada nó da rede envia periodicamente uma mensagem nomeada OGM (*Originator Messages*) aos seus nós vizinhos, a qual contém o endereço do nó origem da mensagem, o endereço do nó transmissor e um número único sequencial.

Quando um nó recebe uma OGM, ele sobrepõe o endereço do nó transmissor com o seu próprio endereço e a retransmite para os seus vizinhos. Ao receber sua própria mensagem, o nó origem pode verificar que o *link* pelo qual a OGM foi recebida pode ser utilizado em ambas as direções. Ao receber OGMs dos outros nós da rede é possível verificar para quais nós existem rotas. Receber mensagens OGMs redundantes de um nó indica que existem mais de uma rota para esse nó. Se essas mensagens forem recebidas de nós vizinhos diferentes, o nó vizinho com o melhor *link* será escolhido como próximo passo da rota para aquele nó. Quando um nó envia uma mensagem OGM para os seus vizinhos, ele recebe essa mesma OGM quando da sua retransmissão por esses mesmos vizinhos. Das mensagens OGM recebidas obtém-se métricas do estado dos *links* que são utilizadas para classificá-los.

4. Estudo da Comunicação entre VANTS

Nesta seção é apresentado o estudo realizado, incluindo o modelo de rede considerado, os requisitos de comunicação, um cenário de teste, as simulações realizadas e os resultados gerados.

4.1. O modelo de rede de VANTS

Uma rede ad hoc de VANTs ou FANET é definida como a instância de uma MANET em que os nós são VANTs ou estações de comunicação baseadas em terra, também conhecidas como ERB (Estação Rádio Base). Seus nós são capazes de comunicar entre si diretamente ou indiretamente, bem como repassar dados vindos de outros nós. Quando não há ligação direta entre dois nós da rede que desejam se comunicar, essa comunicação pode ser realizada através de um ou mais nós intermediários, os quais repassam os dados para nós vizinhos, até que eles cheguem ao destino, caracterizando uma comunicação multi salto. As redes de VANTs têm suas topologias modificadas dinamicamente de acordo com a movimentação dos seus nós. A Figura 1 ilustra uma rede ad-hoc de VANTs.

O modelo de referência aqui utilizado consiste dos seguintes componentes:

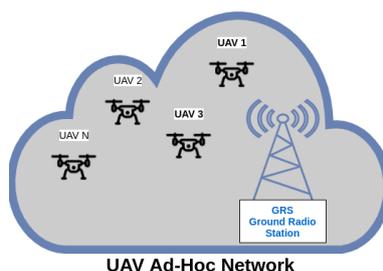


Figura 1. Rede ad-hoc de VANTs ou FANET

- **Um conjunto de VANTs** que se comunicam entre si e com a estação rádio base, caracterizando uma FANET. Cada VANT deste conjunto contém sensores para captação de vídeo e tem capacidade de comunicação, armazenamento e processamento;
- **Uma estação rádio base** para comunicação com os VANTs e eventualmente com o mundo exterior, que contém servidores de processamento e armazenamento, bem como capacidade de execução de aplicações ou serviços relacionados aos VANTs.
- **Aplicações** em execução em cada VANT e na ERB. As aplicações em execução nos VANT são capazes de capturar vídeos dos sensores e transmiti-los para a ERB.

É premissa deste trabalho que os equipamentos que executam aplicações têm capacidade de armazenamento e processamento necessários para as suas execuções. Os VANTs possuem capacidade de voo e de executar trajetórias autonomamente, sem necessidade de intervenções. Não são considerados aspectos de consumo de energia.

4.2. Requisitos de comunicação

O caso de uso foi elaborado baseado nos requisitos propostos pelo 3GPP. Ele consiste na operação de VANTs para captura e transmissão ao vivo de imagens em definição HD (*High Definition*). A Tabela 3 apresenta os requisitos do caso escolhido, como uma taxa de $25Mbps$ e uma latência fim a fim de $200ms$ (do VANT de origem à ERB de destino onde se encontram os servidores responsáveis pela retransmissão da imagem recebida).

Tabela 3. Caso de uso e requisitos de comunicação

Caso de uso	Taxa de dados requerida		Latência fim a fim
Transmissão ao vivo de vídeo com definição HD e rotas pre-agendadas	Serviço	25Mbps origem:VANT	200 ms

4.3. Refinamento do caso de uso e cenário de teste

Para execução dos estudos, o caso de uso foi especificado com bastante detalhes em termos do seu funcionamento, bem como um cenário definido de acordo. O cenário, que serviu para execução de testes, é composto por uma ERB e dois VANTs, como ilustrado na Figura 2.

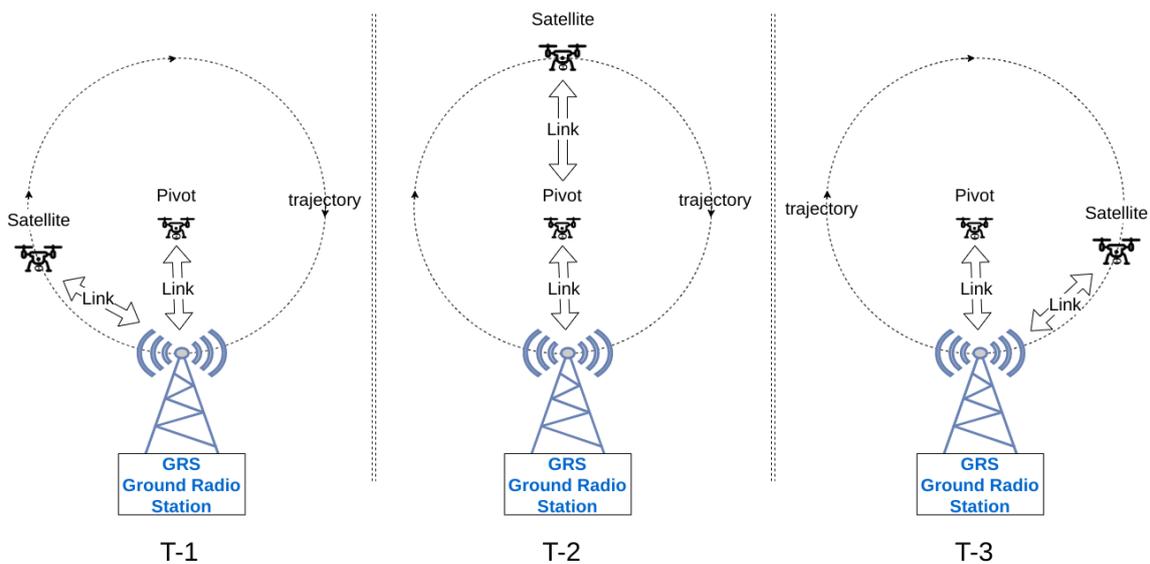


Figura 2. Cenário de testes - Rede com três nós com *link* de um e dois saltos

A estação de rádio base e um VANT, chamado de Pivot, têm posições fixas nos limites de suas faixas de alcance de rádio. A ERB fica ao nível do chão e o Pivot a 20 metros de altura. O segundo VANT, chamado Satellite, segue uma trajetória circular com o centro na posição do Pivot. O Satellite sempre está no alcance de rádio do Pivot, mas fica no alcance da estação de rádio base apenas quando está na parte inferior da circunferência. Enquanto executa sua trajetória, o Satellite transmite dados de vídeo para a estação de rádio base, gerando tráfego de dados no sentido VANT - ERB.

A referida figura mostra três situações nos instantes de tempo T-1, T-2 e T-3, respectivamente. Em cada situação podemos ver uma topologia diferente da rede, causada pelo movimento do VANT Satellite relativamente à estação de rádio base e ao nó Pivot. As setas identificam os *links* ativos, que têm capacidade de transmissão de dados no momento. Nas situações T-1 e T-3 o cenário apresenta uma rota direta (um salto) entre a estação de rádio base e o VANT Satellite, momentos em que estão próximos um do outro. Na situação T-2, na qual o Satellite saiu do alcance da estação, a única rota possível é a que passa pelo VANT Pivot (rota com dois saltos). Como o Pivot e a estação de rádio base estão sempre ao alcance de rádio um do outro, o mesmo acontecendo com o Pivot e o Satellite, a rota de dois saltos está sempre disponível. O movimento circular do VANT Satellite faz com que a melhor rota de rede oscile entre uma rota de um salto e uma rota de dois saltos. Isso acontece por que o Satellite afasta-se da ERB saindo de seu alcance de rádio. Como a rota é uma circunferência, o Satellite chega perto da ERB após algum tempo e fica dentro da faixa de rádio novamente. Nesse ponto, a rota direta torna-se a melhor rota de rede novamente.

O comportamento esperado nesse cenário é a rápida troca de rota quando o Satellite sai do alcance de estação rádio base para rota de dois saltos e o rápido retorno para a rota de um salto quando o VANT Satellite volta para o alcance de rádio da estação rádio base. No momento da troca de rotas, é admitida uma pequena interrupção na comunicação, já que os pacotes precisam chegar ao destino pela nova rota. Um componente importante a considerar é a velocidade do nó Satellite. Aumentar a sua veloci-

dade reduz o tempo necessário para concluir um ciclo circular, que por sua vez reduz o tempo disponível para o protocolo de roteamento detectar a mudança e se adaptar à nova topologia.

4.3.1. Métricas para o estudo

Neste estudo serão consideradas as métricas Vazão média, Latência média e Tempo médio para comutação de rota. *Vazão média* ou *média de vazão* neste estudo é definida como o total dos dados enviados pelo nó origem que chegaram ao nó destino dividido pelo tempo total de transmissão, dada em *bits/s*. *Latência média* neste estudo é definida como a soma das latências dos pacotes utilizados para transmitir um dado dividido pelo total de pacotes utilizados nessa transmissão. Deste modo, interrupções de transmissão não são contabilizadas na latência média. O *tempo médio de duração de comutação de rota* é o tempo necessário para que o protocolo de roteamento em análise detecte que uma rota não é mais capaz de transmitir dados devido a queda de *links* e adapte essa rota de modo que ela volte a transmitir. Essa métrica é obtida medindo o intervalo de interrupção da comunicação causado pela queda de *link* da rota dividido pelo número total de interrupções durante a transmissão. O intervalo de interrupção começa quando a transmissão dos dados é interrompida e termina quando a transmissão dos dados é retomada.

4.4. Estudo dos protocolos por simulação

Como mencionado anteriormente, o estudo do comportamento dos protocolos com relação às suas capacidades de comutação de rotas para adaptação às mudança de topologia, em consequência do movimento dos VANTs, foi feito por simulação. Um estudo experimental, embora desejável, por questões de custo e dificuldades operacionais não foi possível até o momento da escrita deste documento.

Para a simulação dos cenários foi utilizado o simulador OMNET++[Heidemann and Isi 2002] devido à sua implementação robusta, disponibilidade de modelos e elementos de rede e facilidade de uso da sua interface. Os valores resultantes apresentados são a média de três execuções com sementes para geração de números aleatórios diferentes. Os parâmetros utilizados nas simulação são apresentados na Tabela 4. O tempo de simulação foi de 1600 segundos para cada velocidade e protocolo. Para a camada MAC (*Media Acces Control*) foi utilizado o padrão IEEE802.11g [IEEE 2016], com uma taxa de bits de $54Mbps$. A sensibilidade de recepção foi de $-85dBm$ e ruído de $-90dBm$. A frequência de transmissão utilizada foi de $2.4GHz$ e foi gerado tráfego de $10Mbps$ no sentido VANT para ERB.

5. Resultados e análises

Nesta seção são apresentados, por meio de gráficos, os resultados da execução das simulações e as análises desses resultados. Cada subseção a seguir apresenta os resultados das simulações para os protocolos B.A.T.M.A.N. e OLSR, para o parâmetro velocidade do VANT originador dos dados. Foram realizadas medições com o nó Sattelite nas velocidades de de $1\text{ m/s}(3\text{ km/h})$ a $32,0\text{ m/s}(120\text{ km/h})$. As métricas apresentadas nos gráficos são vazão média, latência média e duração média da comutação de rota.

Tabela 4. Parâmetros das simulações

Descrição	Valores
Tempo de simulação	1600 segundos
Aplicação	Transmissão de vídeo
Protocolos de roteamento	B.A.T.M.A.N e OLSR
MAC	IEEE 802.11g
Taxa de bits camada MAC	54Mbps
Sensibilidade de recepção	-85dBm
Ruído	-90dBm
Frequência de transmissão	2.4Ghz
Taxa de <i>download</i> da aplicação	24 Mbps
Velocidades do VANT	de 1 m/s(3 km/h) a 32,0 m/s(120 km/h)

5.1. Resultados e análise da métrica vazão média

A Figura 3 apresenta a variação da média de vazão de transmissão utilizando os protocolos B.A.T.M.A.N. e OLSR. O gráfico mostra que, mesmo em velocidades baixas, a média da vazão fica abaixo dos 25Mbps transmitidos pelo nó origem. A média abaixo de 25Mbps ocorre por dois fatores. O primeiro é a queda na vazão quando a comunicação dá-se por uma rota com dois saltos. Quando isso ocorre, o nó intermediário (nó Pivot) precisa receber pacotes do nó origem (nó Satellite) e retransmitir esses pacotes para o nó destino (ERB). Essa retransmissão implica em disputas pelo meio e colisões que reduzem a vazão.

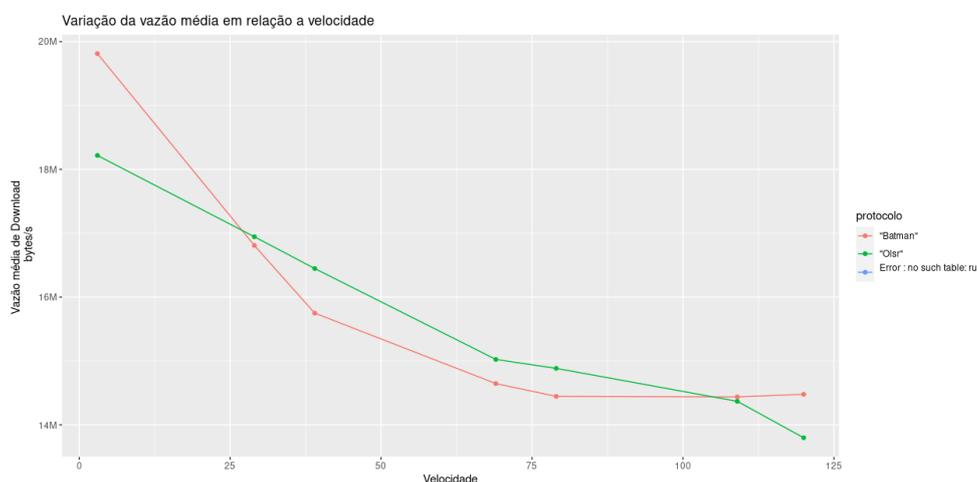


Figura 3. Vazão média em função da velocidade do VANT

A Figura 4 apresenta as variações de vazão em função da distância entre o nó origem e o nó destino e o número de saltos, onde são apresentados três gráficos intitulados Graph A, Graph B e Graph C, os quais mostram diferentes informações em relação ao tempo. O Graph A mostra a variação da distância entre os nós origem e destino. O Graph B mostra a vazão e o Graph C o número de saltos da rota utilizada para a comunicação. Como pode ser visto no Graph B, quando a rota é direta, a vazão atinge os 25Mbps gerados pela aplicação do nó origem. Contudo, quando essa comunicação dá-se pela rota com dois saltos, a vazão cai. Isso acontece em razão da disputa pelo meio

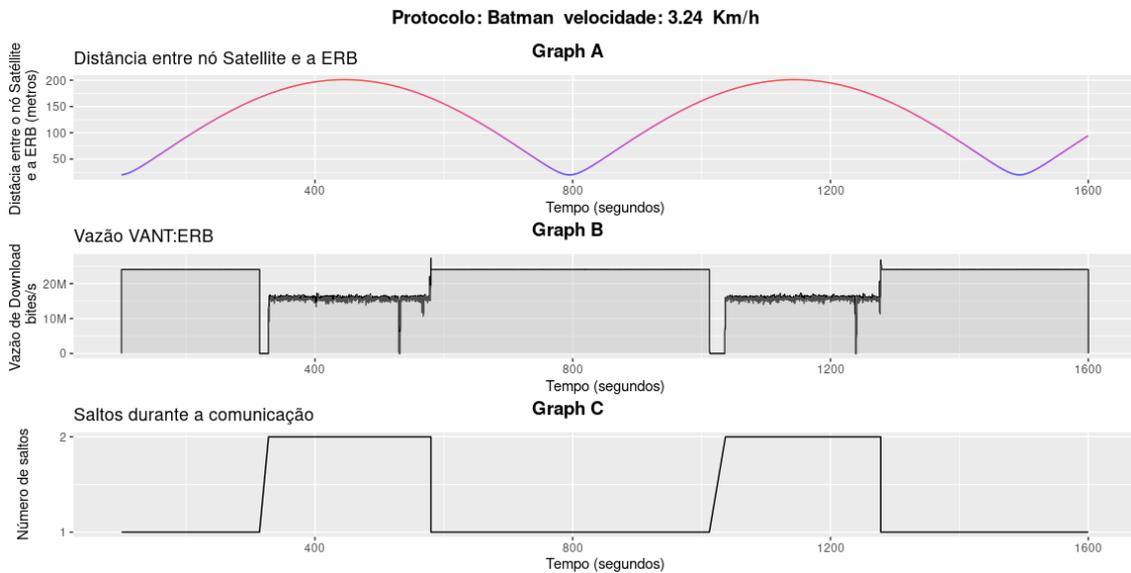


Figura 4. Vazão a $3Km/h$ para o protocolo B.A.T.M.A.N.

O segundo fator responsável pela queda da vazão média é o tempo de comutação de rota quando ocorre uma queda de *link* na rota utilizada para a transmissão dos dados. Quando esta queda ocorre, o protocolo de roteamento precisa detectá-la e escolher uma nova rota válida para que a transmissão continue. Neste caso, a queda do *link* causa a interrupção da transmissão de dados, que só é retomada quando uma nova rota válida é selecionada ou quando o *link* interrompido volta a funcionar.

Em velocidades mais baixas, o primeiro fator tende a ser mais relevante na queda da vazão média, uma vez que as interrupções causadas pela comutação de rota devido a perda de *link* são menos frequentes. Essa queda pode ser mitigada pela aplicação efetuando retransmissões dos dados perdidos. Quando a velocidade do nó Satellite aumenta, as interrupções causadas pela comutação de rota também aumentam, transformando-se no principal fator de queda da vazão da rede. Isso pode ser visto na Figura 5, que mostra os mesmos gráficos da Figura 4 a uma velocidade de aproximadamente $40km/h$. Nela é possível observar que a frequência com que o nó Satellite entra e sai do alcance do ERB é maior, o que aumenta as interrupções causadas pela comutação de rota.

5.2. Resultados e análise da métrica latência média

A Figura 6 apresenta a variação da média de latência dos quadros transmitidos utilizando os protocolos B.A.T.M.A.N. e OLSR. O gráfico mostra que somente a $3km/h$ a rede consegue atender ao requisito de latência. Nessa velocidade, o protocolo B.A.T.M.A.N. apresentou uma latência média de $159.01ms$ e o protocolo OLSR uma latência de $159.11ms$. Em todas as demais velocidades, a latência ficou muito acima dos $200ms$ requerida nas transmissões ficando na ordem de segundos com mostra o gráfico. O aumento da latência é causado pelo aumento na frequência do tempo de comutação de rota quando há queda de *link*. O tempo de comutação de rota ocorre na ordem de segundos, afetando diretamente a média de latência da rede.

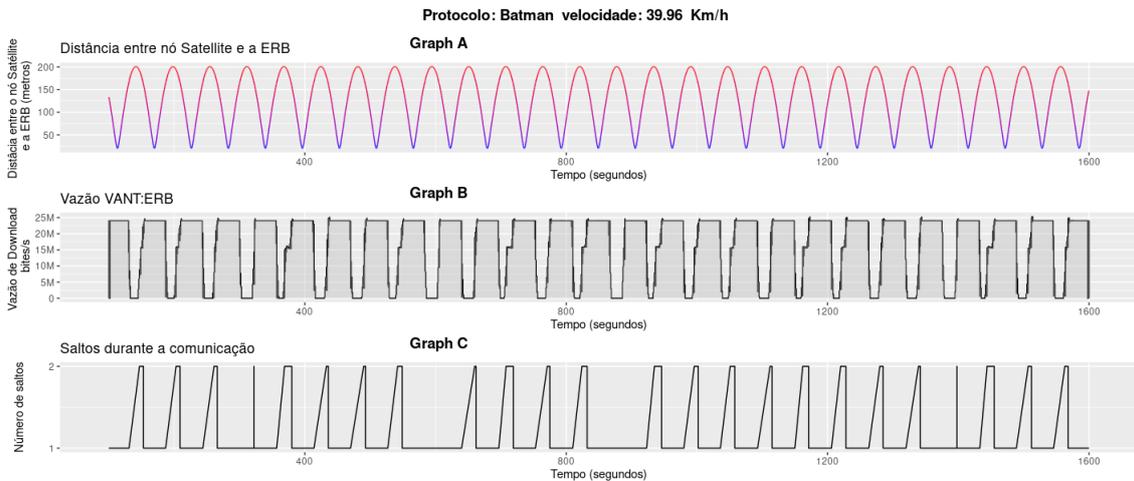


Figura 5. Vazão a 40Km/h para o protocolo B.A.T.M.A.N.

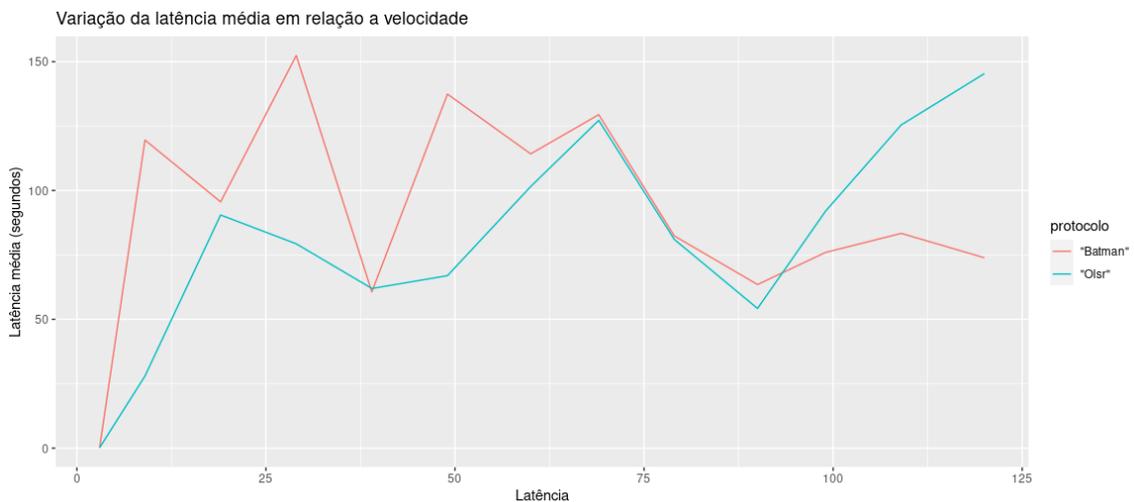


Figura 6. Variação da média da latência em relação à velocidade do VANT

5.3. Tempo médio de duração de comutação de rota

A Figura 7 mostra os tempos médios de comutação de rota. Na figura, é notável que o tempo médio necessário para a comutação de uma rota ocorre em intervalos na ordem de segundos, o que não é compatível com uma transmissão de dados online. Outro fato é a inconstância da média em relação à velocidade do nó Sattelite. Essa inconstância pode ser explicada pela incapacidade dos protocolos em detectar a perda da capacidade do *link* utilizado na rota. Essa incapacidade faz com que o protocolo permaneça em uma rota de um salto enquanto o nó Satellite se aproxima e se afasta várias vezes. Isso acontece por que quando os indicativos de de perda de *link* chegam perto de seus limites, o nó Satellite volta a se aproximar do nó ERB, reativando o *link*. Durante todo o intervalo a comunicação é interrompida e contabilizada como duração de comutação de rota. O contrário pode acontecer, mas é menos frequente, pois a opção por uma rota com menos saltos não causa interrupção

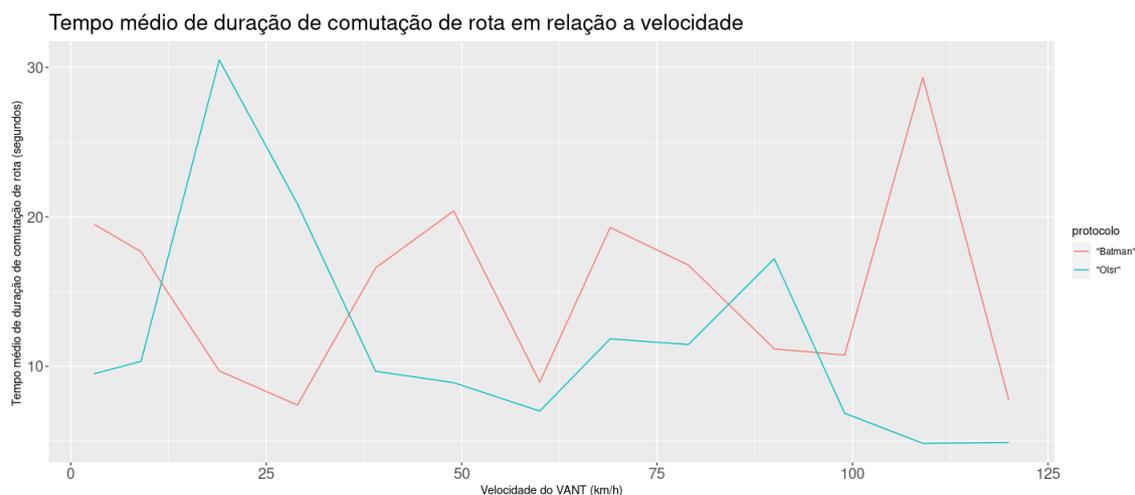


Figura 7. Tempo médio de comutação de rota em função da velocidade do VANT

6. Uma proposta para melhoria das respostas dos protocolos de roteamento analisados

Uma solução para essas dificuldades dos protocolos passa pela utilização de métricas coletadas não só nas mensagens de controle enviadas pelos próprios protocolos mas por todos os dados enviados pela camada de enlace. O padrão IEEE802.11 [IEEE 2016] determina várias métricas internas da camada de enlace. Dentre essas métricas destacamos a contagem de retransmissões de quadros (*frames*) [Committee 2007].

Um nó utilizando IEEE 802.11, configurado como uma estação com serviços QoS utilizando o sistema *Block Ack* e o protocolo RTS/CTS (*Request To Send / Clear To Send*), possui em sua camada MAC a métrica de contagem de tentativas de transmissão de quadros. Essa métrica é um número que é incrementado sempre que um nó não consegue transmitir um quadro. Quanto esse número atinge um limite especificado, usualmente 7, o quadro é descartado mesmo não sendo transmitido. O incremento da métrica acontece na ocorrência de um dos três eventos especificados abaixo:

- Ocorreu colisão na tentativa de transmissão do quadro;
- O quadro foi dado com transmitido, mas não houve a confirmação de transmissão de bloco relativo ao quadro transmitido - o destino não confirmou o recebimento;
- A requisição para o envio do quadro (RTS) requerida pelo protocolo RTS/CTS não foi respondida e portanto o quadro não foi transmitido nessa tentativa.

Dois dos eventos são diretamente afetados pela perda do *link*, o não recebimento do reconhecimento de bloco e o não atendimento da requisição para envio de quadros. Quando ocorre a perda do *link*, não é possível confirmar o recebimento do bloco ou responder a requisição para o envio do quadro. A ocorrência esporádica desses eventos não é suficiente para conclusão de perda do *link*, mas o descarte sucessivo de quadros devido a essas ocorrências é uma evidência de perda de capacidade de transmissão daquele *link*.

A proposta de melhoria das respostas dos protocolos de roteamento das redes ad-hoc deste trabalho é a utilização da informação contida nessa métrica para detectar de maneira mais rápida a perda dos *links* que compõem a rota. Isso tornaria esses protocolos mais responsivos sem tráfego adicional na rede. Com poucas modificações na

implementação da camada MAC do IEEE 802.11, é possível disponibilizar a contagem de quadros descartados pelas ocorrências de perda de confirmação e falta de resposta do RTS para outras camadas da rede. Essas informações permitiriam aos protocolos de roteamento utilizá-las nos algoritmos de decisão de alteração de rotas.

Com essa informação o protocolo OLSR poderia determinar esse *link* como um *link* ruim e disseminar essa informação para o seu conjunto MPR, permitindo aos demais nós da rede atualizarem o cálculo das melhores rotas dentro da rede. O protocolo B.A.T.M.A.N., detectando a queda da qualidade do *link* através da informação recebida da camada MAC, poderia alterar a rota para que ela utilize outro nó vizinho como próximo passo para envio dos dados. Em ambos os casos a detecção seria mais ágil do que a implementada atualmente no cenário proposto nesse estudo.

7. Conclusão

Neste trabalho mostramos que os protocolos das MANETs disponíveis para as FANETs não estão preparados para os desafios de autoconfiguração apresentados por uma FANET. Por meio de simulações, verificamos que os protocolos de roteamento não reagem adequadamente às rápidas mudanças de topologia características das FANETs. Uma análise das causas deste comportamento e uma proposta inicial de solução foram apresentadas. Em trabalhos futuros serão apresentados cenários adicionais e a implementação da solução proposta, além de resultados comparativos com o objetivo de verificar e validar a solução.

Referências

- 3GPP (2021). 3GPP - 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
- Chen, W., Liu, B., Huang, H., Guo, S., and Zheng, Z. (2019). When UAV Swarm Meets Edge-Cloud Computing: The QoS Perspective. *IEEE Network*, 33(2):36–43.
- Committee, L. A. N. M. A. N. (2007). *IEEE Std 802.11-2007: IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)*, volume 2020.
- De Silva, R. (2018). Next Hop Node Selection in Private UAV Networks. In *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, volume 2018-October, pages 248–252.
- Dearlove, C. and Clausen, T. (2014). RFC 7188 - Optimized Link State Routing Protocol Version 2 (OLSRv2) and MANET Neighborhood Discovery Protocol (NHDP) Extension TLVs.
- Fan, X., Cai, W., and Lin, J. (2018). A survey of routing protocols for highly dynamic mobile ad hoc networks. In *International Conference on Communication Technology Proceedings, ICCT*, volume 2017-October, pages 1412–1417.
- Force), I. I. E. T. (2021). rfc3626.
- Gao, A., Hu, Y., Li, L., and Li, X. (2018). BP network control for resource allocation and QoS ensurance in UAV cloud. *Journal of Sensors*, 2018.
- Gupta, L., Jain, R., and Vaszkun, G. (2016). Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 18(2):1123–1152.

- Hayat, S., Yanmaz, E., and Muzaffar, R. (2016). Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint.
- Heidemann, J. and Isi, U. S. C. (2002). OMNeT++ Discrete Event Simulator. *Audio*, (March):1–9.
- IEEE (2016). IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- Jiang, J. and Han, G. (2018). Routing Protocols for Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Communications Magazine*, 56(1):58–63.
- Kim, D. Y. and Lee, J. W. (2018). Joint Mission Assignment and Location Management for UAVs in Mission-critical Flying Ad Hoc Networks. In *9th International Conference on Information and Communication Technology Convergence: ICT Convergence Powered by Smart Intelligence, ICTC 2018*, pages 323–328.
- Mohammed, F., Jawhar, I., Mohamed, N., and Idries, A. (2016). Towards Trusted and Efficient UAV-Based Communication. In *Proceedings - 2nd IEEE International Conference on Big Data Security on Cloud, IEEE BigDataSecurity 2016, 2nd IEEE International Conference on High Performance and Smart Computing, IEEE HPSC 2016 and IEEE International Conference on Intelligent Data and S*, pages 388–393.
- Mukherjee, A., Keshary, V., Pandya, K., Dey, N., and Satapathy, S. C. (2018). Flying ad hoc networks: A comprehensive survey. In *Advances in Intelligent Systems and Computing*, volume 701, pages 569–580. Springer Verlag.
- Neelavathy Pari, S. and Gangadaran, D. (2018). A Reliable Prognostic Communication Routing for Flying Ad Hoc Networks. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics, ICOEI 2018*, pages 33–38.
- Russoniello, A. and Gamess, E. (2018). Evaluation of Different Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc Networks in Scenarios with High-Speed Mobility. *International Journal of Computer Network and Information Security*, 10(10):46–52.
- 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 and Tutorials*, 22(2):1071–1120.
- Singh, K. and Verma, A. K. (2015). Applying OLSR routing in FANETs. In *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Advanced Communication, Control and Computing Technologies, ICACCCT 2014*, pages 1212–1215.
- Sliwa, B., Falten, S., and Wietfeld, C. (2019). Performance evaluation and optimization of B.A.T.M.A.N. v routing for aerial and ground-based mobile ad-hoc networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference*, volume 2019-April, pages 1–7. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Website (2021). Visão geral - Open-Mesh - Open Mesh.
- Wei, Z., Wu, H., Huang, S., and Feng, Z. (2017). Scaling Laws of Unmanned Aerial Vehicle Network with Mobility Pattern Information. *IEEE Communications Letters*, 21(6):1389–1392.