

ARTIGO ORIGINAL

Análise de Desempenho de Algoritmos de Roteamento com base em Topologia para V2V por Meio de Simulações no NS-3

Performance Analysis of Routing Algorithms based on V2V Topology using NS-3 Simulations

Carlos P. Alves¹, Natália C. Fernandes¹, Tadeu N. Ferreira ¹

¹Universidade Federal Fluminense (UFF)

*{cpinto, nataliacf, tadeu_ferreira}@id.uff.br

Recebido: 11/10/2024. Revisado: 20/07/2025. Aceito: 31/07/2025.

Resumo

Redes Veicular Ad-Hoc Network têm grande potencial para fornecer aplicações de segurança e de entretenimento para Intelligent Transport System e para melhorar a segurança do tráfego nas estradas. Comunicação do tipo Vehicle-to-Vehicle é importante para o processo de automatização veicular e é utilizada em locais em que não há uma estrutura de Road Side Units implementada, e também para complementar a comunicação veicular, pois ajuda a reduzir a carga de comunicação com alta densidade de veículos. Este trabalho propõe o protocolo de roteamento Multi-Table Ad-Hoc On-Demand Distance Vector (MT-AODV) em redes veiculares para superar o obstáculo recorrente de degradação da comunicação em redes com alta densidade de veículos e falhas na comunicação. Os resultados mostram um desempenho superior do algoritmo proposto para roteamento em relação ao atraso end-to-end e vazão nos casos de falhas em nós.

Palavras-Chave: MT-AODV, protocolos de roteamento, VANET, V2V.

Abstract

Veicular Ad-Hoc Networks have a great potential to provide security and entertainment applications for Intelligent Transport System, and to improve road traffic safety. Vehicle-to-Vehicle communication is essential for the vehicular automation process and is used in places where there is no Road Side Unit structure implemented, and also to complement vehicular communication, as it helps to reduce the load traffic with high density of vehicles. This work proposes the Multi-Table Ad-Hoc On-Demand Distance Vector (MT-AODV) routing protocol on vehicular networks to overcome the recurring obstacle of communication degradation in networks with high vehicle density and communication failures. The results show the superior performance of the proposed routing for end-to-end delay and throughput in the case of node failures.

Keywords: MT-AODV, routing protocol, VANET, V2V.

1 Introdução

Congestionamentos de veículos são um problema constante em grandes cidades. A mobilidade inteligente é uma abordagem promissora para solucionar esse problema

(Loo et al., 2011). Ações de mobilidade inteligente já estão em desenvolvimento, como semáforos inteligentes e VANETs (*Veicular Ad-Hoc Networks*). Essas redes melhoram o fluxo de tráfego e reduzem acidentes de carro, fornecendo informações adequadas ao motorista ou ao veículo.

VANETs surgiram no início dos anos 2000 e têm evoluído a partir de redes ad-hoc sem fio (Weber et al., 2021). Muitos estudos têm sido realizados em protocolos de acesso ao meio, roteamento e cenários de aplicativos VANET. Atualmente, muitas montadoras de automóveis trabalham com V2V (*Vehicle-to-Vehicle communication*), incluindo General Motors (TOYOTA, 2022) e Volvo (CAR 2 CAR, 2022).

Pesquisas estão sendo realizadas para tornar as redes sem fio mais eficientes e robustas, com otimizações em hardware e software. Isso resulta em uma maior portabilidade no acesso a dados e serviços em diversos locais, motivando o desenvolvimento de novas tecnologias como redes mesh que integram várias redes. Wireless Mesh Network (WMN) (Akyildiz et al., 2005) é um tipo de rede dinâmico, autoconfigurável e autoorganizável que busca fornecer serviços já oferecidos pelas redes wireless atuais, mas com maior qualidade e eficiência. Os nós da rede criam e mantêm automaticamente a conectividade, roteando pacotes de forma eficiente por meio de algoritmos de roteamento.

Neste artigo, é proposto o uso do MT-AODV, que foi originalmente proposto em Firmino et al. (2021), para ser usado em um ambiente de V2V, com o objetivo de preencher a lacuna de resiliência na comunicação em ambientes congestionados e com falhas na comunicação. As vantagens de um roteamento de múltiplas tabelas é mostrado em Macedo et al. (2014). Até onde conhecemos, esta é uma das primeiras propostas de algoritmos de roteamento de múltiplas tabelas para VANETs com dados e cenários genéricos. Em More and Naik (2021), é apresentado um algoritmo com múltiplas tabelas apenas para codificadores de vídeo HEVC. O artigo Moridi and Barati (2017) descreve o algoritmo de roteamento de múltiplas tabelas RMRPTS, mas com testes realizados em apenas um ambiente de rua comum em V2V.

2 Trabalhos Relacionados

São descritos brevemente alguns dos trabalhos e pesquisas encontradas quanto a ITS (Intelligent Transport System), sobre segurança no trânsito, trabalhos sobre simulações e protocolos e trabalhos relacionados a roteamento para VANET.

Na literatura sobre V2V, é possível encontrar trabalhos que apontam ITSs como soluções para reduzir acidentes de trânsito. ITSs estão diretamente relacionados a uma ampla variedade de tecnologias eletrônicas e de informação baseadas em comunicação, cabeada ou sem fio (de Camargo, 2000). De uma maneira geral, os ITSs provêm uma ligação inteligente entre os usuários dos sistemas de transportes, os veículos e a infraestrutura.

Segundo Marè et al. (2016), os ITSs podem ser categorizados como: Sistema Avançado de Gerenciamento de Tráfego, Sistema Avançado de Informação ao Viajante, Sistema de Precificação de Transporte Habilitado para ITS, Sistema Avançado de Transporte Público e Operação de Veículos Comerciais.

Um dos objetivos das redes veiculares é promover a segurança no trânsito. As aplicações relacionadas à segurança como, por exemplo, alertas de possível colisão, exigem que as mensagens sejam transmitidas em até 100 ms,

que é considerado o limite de atraso tolerável para a maioria das comunicações de eventos de emergência (Xu et al., 2004).

Em Shaban et al. (2020), Shaban comparou o desempenho dos protocolos de roteamento AODV, Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) e DSDV no cenário VANET, usando, a cada segundo, 10 mensagens básicas de segurança para a transmissão de informações cruciais entre os veículos, embora não se especifiquem quais veículos foram selecionados e a distância entre eles. OLSR oferece um melhor desempenho do que AODV. O AODV mostra que o PDR do Basic Safety Message (BSM) é mais promissor que o DSDV e OLSR, mas a densidade da simulação quando está com 205 veículos, mostra o OLSR melhor do que AODV e DSDV.

Em Toghi et al. (2019), comenta-se que um dos principais obstáculos à frente da adoção em massa das tecnologias de comunicação V2X são os desafios de desempenho sob tráfego de alta densidade, por conta de perdas na comunicação pelo excesso de dispositivos.

Cenários veiculares altamente congestionados (Yoon and Kim, 2020), em que a rede experimenta altas cargas de dados, causam impacto nos parâmetros de latência e confiabilidade o que afeta aplicativos de mobilidade. A investigação de solução para ambientes com alto congestionamento é vital para manter o desempenho da rede e garantir a segurança em aplicações de mobilidade V2V.

No protocolo AODV (Yin et al., 2014), dois desafios críticos afetam seu desempenho: terminais ocultos e roteamento em ambientes dinâmicos. O problema dos terminais ocultos surge quando um nó não consegue detectar transmissões de outro nó fora de seu alcance, mas que interfere na comunicação com um terceiro, resultando em colisões de pacotes. Isso gera perda de dados, reestabelecimento frequente de rotas, aumento da latência e overhead de controle, especialmente em redes densas. Em ambientes dinâmicos (Yin et al., 2014), como redes veiculares (VANETs), a topologia muda rapidamente, tornando as rotas estabelecidas obsoletas. Essa volatilidade exige constantes descobertas de novas rotas, aumentando ainda mais a latência e o overhead. Esses problemas mostram a necessidade de protocolos mais robustos e adaptáveis para lidar com colisões e mudanças rápidas em redes sem fio de alta mobilidade.

Segundo Marinov (2024), o protocolo AODV enfrenta várias dificuldades em ambientes com alta mobilidade, como a necessidade de reconstruir rotas quando um nó ou veículo muda de direção inesperadamente, o que pode causar atrasos na transmissão de mensagens. Além de não manter informações sobre todo o caminho da mensagem, o que gera ineficiências, o AODV também introduz atrasos adicionais devido à comunicação entre veículos intermediários. Em cenários urbanos dinâmicos, onde a mobilidade é elevada, essas limitações podem comprometer a eficácia e a rapidez na transmissão de dados, afetando aplicações críticas, como sistemas de segurança rodoviária.

Em Sangaiyah et al. (2023) é apresentado um panorama geral de algoritmos de roteamento para VANETs.

3 Redes Veiculares

Uma rede *ad-hoc* sem fio compreende uma coleção de nós sem fio que podem se auto organizar dinamicamente em uma topologia arbitrária e temporária para formar uma rede sem necessariamente usar qualquer infraestrutura pré-existente.

VANETs procuram conectar dispositivos contidos em veículos para criar serviços que são particularmente relevantes para um ambiente veicular (Weber et al., 2021). A comunicação V2V permite que os veículos troquem informações sem fio sobre sua velocidade, localização e direção. A tecnologia por trás da comunicação V2V permite que os veículos transmitam e recebam mensagens de forma omnidirecional, criando uma consciência de 360 graus de outros veículos nas proximidades (NHTSA - National Highway Traffic Safety Administration, 2022).

A comunicação numa rede VANET pode utilizar diversos protocolos de comunicação. Como objeto desse estudo utilizamos a arquitetura WAVE. Diferentes tecnologias podem ser usadas, como Sistema celular (Lu et al., 2014) para longo alcance, e Bluetooth (Nampally and Sharma, 2018) para curto alcance.

Os padrões mais utilizados das redes Wi Fi são o IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n que diferem entre si na frequência e na capacidade de transmissão, que pode variar de 11 Mbit/s até 300 Mbit/s. O padrão IEEE 802.11p foi finalizado em 2010 como intuito de normatizar as características básicas da comunicação wireless em ambientes veiculares, como em Fuxjäger et al. (2010).

Esses padrões incluem especificações da Physical Layer (PHY) e da subcamada Medium Access Control Layer (MAC). IEEE 802.11p herda várias características como simplicidade e mecanismo de controle de acesso ao meio distribuído. Unidades de bordo de veículos (OBU) e unidades de beira de estrada (RSU) fixadas com infraestrutura de transporte, como sinais de trânsito, utilizam esse padrão.

3.1 Protocolos de roteamento para VANETs

Protocolo de roteamento é um conjunto de regras que define como os pacotes de dados são encaminhados entre os nós de uma rede, como em de Castro et al. (2016), e podem ser baseados em:

- Topologia: Sendo com roteamento proativo, onde cada nó mantém uma tabela de roteamento representando a topologia, com cada registro na tabela representando o próximo nó de retransmissão em direção ao destino, ou com roteamento reativo, onde também denominado como protocolo de roteamento on demand, estabelece o caminho somente após o nó desejar se comunicar (Devangavi and Gupta, 2017).
- Posição: Identificado como roteamento geográfico, é o mais promissor dentre todos os algoritmos VANET, pois suporta informações de posição geográfica de cada veículo para oferecer roteamento (Devangavi and Gupta, 2017).
- Broadcast: O roteamento baseado em broadcast é frequentemente empregado em VANETs para informar situações de emergência entre veículos. Essa técnica

é usada quando a mensagem deve ser propagada para veículos muito distantes do alcance da transmissão (Devangavi and Gupta, 2017).

- Modelo geográfico: Com base na região de destino, esta classe de protocolos é dividida em dois tipos. O primeiro tipo é composto por protocolos que trabalham com a suposição de que a área de destino está próxima à da origem, enquanto o segundo tipo abrange protocolos desenvolvidos para roteamento para regiões de destino distantes, utilizando inundação e unicast (Devangavi and Gupta, 2017).
- Cluster: Dependem da localização e do escopo dos clusters, a construção do cluster é baseada em métricas de mobilidade para manter a estabilidade do cluster (Devangavi and Gupta, 2017).

Aplicações de segurança podem desempenhar um papel importante para evitar acidentes ou minimizar o impacto dos acidentes. Essas aplicações exigem limites estritos de atraso de tempo (Rasheed et al., 2017).

Alguns exemplos de aplicações de segurança são: alerta de violação de sinal de trânsito, alerta de mudança de direção/faixa, alerta de ponto cego, alerta de aproximação de veículos de emergência, solicitação de serviços de ajuda, alerta de região e alerta de velocidade apropriada (Rasheed et al., 2017).

Algumas aplicações não são relacionadas com segurança, essas aplicações estão voltadas a proporcionar ao condutor e a demais passageiros maior conforto e interatividade, assim como permitir que a infraestrutura da via esteja a coletar informações para melhor gestão do trânsito, como por exemplo: controle e gerenciamento de trânsito, conforto e entretenimento, notificação de pontos de interesse e informações de navegação (Rasheed et al., 2017).

4 MT-AODV para VANET

O desenvolvimento de MT-AODV foi proposto em Firmino et al. (2021) no âmbito de MANETs (*Mobile Ad-Hoc Networks*) para permitir a disponibilidade de rotas em situações críticas de falhas. Foi também proposto em Firmino et al. (2021) o uso de MT-AODV em redes inter-WBANs (*Wireless Body Area Network*). O ambiente de VANETs também está sujeito a situações críticas de falhas repentinas dada a alta mobilidade de veículos e os obstáculos urbanos. Com isso, este artigo propõe e avalia o uso do protocolo MT-AODV em ambiente de VANET.

O protocolo MT-AODV apresenta várias vantagens em relação ao AODV tradicional ao implementar múltiplas tabelas de roteamento, o que permite armazenar informações de múltiplas rotas. Com isso, MT-AODV consegue selecionar de forma inteligente a melhor rota com base em critérios como latência, perda de pacotes e largura de banda (Firmino et al., 2022). A proposta de usar MT-AODV em um ambiente VANET visa reduzir a latência ao acessar rapidamente a melhor rota disponível, otimizando a comunicação. Além disso, o uso de várias tabelas minimiza o overhead ao diminuir a necessidade de requisições frequentes de descoberta de rotas. O MT-AODV também é altamente adaptável, ajustando rotas eficientemente em ambientes dinâmicos, garantindo maior estabilidade na

comunicação mesmo em redes com topologia variável e balanceando de uma maneira melhor as cargas em enlaces de uma VANET.

5 Avaliação dos Algoritmos

A avaliação dos resultados será feita com base nas simulações que foram realizadas, utilizando métricas específicas citadas na seção de métricas de avaliações e com apoio de simulador.

O Network Simulator 3 (NS-3) é uma ferramenta amplamente utilizada para modelar e analisar o desempenho de redes de computadores, destacando-se pela sua flexibilidade e capacidade de extensão. O NS-3 permite simulações diversas, abrangendo desde redes locais até redes de sensores sem fio e data centers, sendo amplamente valorizado pela precisão e detalhamento que oferece na modelagem de redes e protocolos (nsnam, 2022).

É eficaz na simulação de redes veiculares (VANETs), permitindo a análise detalhada de comunicações em cenários de trânsito. Sua capacidade de simular uma vasta gama de redes faz dele uma escolha popular na pesquisa científica, sendo uma ferramenta poderosa para explorar novos protocolos e arquiteturas de redes em diferentes contextos (Campanile et al., 2020).

As aplicações são executadas nos nós para uma determinada simulação pela classe Application. Um nó é conectado a um objeto que representa um canal de comunicação pela classe channel. Dispositivos de Rede através de drivers de dispositivo de rede pela classe NetDevice, que fornece métodos para gerenciar conexões para objetos Node e Channel. Assistentes de Topologia simulador NS-3, teremos nós conectados com dispositivos de rede pela classe topology helpers (nsnam.org, 2022).

5.1 Métricas de avaliação

Estas são as métricas que serão usadas nas simulações, com o objetivo de avaliar a performance de cada um dos protocolos.

- Packet Delivery Ratio (PDR): A importância do PDR destaca-se em três aspectos principais. Primeiro, ele é crucial para avaliar o desempenho de redes, especialmente em ambientes com interferências, como redes móveis e veiculares. Também é valioso na análise de protocolos, ajudando a identificar quais configurações de rede garantem melhor eficiência na entrega de pacotes. Por fim, em ambientes dinâmicos, como redes veiculares, o PDR pode variar, sendo um indicador relevante da resiliência da rede em cenários desafiadores (Ma et al., 2013).
- Throughput: Mede a taxa de transmissão de dados em redes de comunicação, indicando a quantidade de dados transmitidos com sucesso em um intervalo de tempo. Ele é influenciado pela largura de banda disponível, que determina a capacidade máxima de transferência. Latência alta pode reduzir o Throughput, já que aumenta o tempo de entrega dos pacotes. A perda de pacotes, que exige retransmissões, também reduz a eficiência. Além disso, o congestionamento da rede, com muitos usu-

ários ou dispositivos compartilhando recursos, pode diminuir a taxa de transmissão efetiva (Thorne, 2006).

- Lost Packet: É um pacote de dados que não chega ao destino em uma rede de comunicação, geralmente devido a falhas na transmissão, congestionamento ou interferências. Isso pode resultar na necessidade de retransmissões, impactando o desempenho da rede e métricas como Throughput e Packet Delivery Ratio (PDR). Em aplicações sensíveis, como segurança do trânsito, aumenta o risco de acidentes e reduz a eficácia das intervenções de segurança e monitoramento (Gurewitz et al., 2000).
- HopCount: Mede o número de saltos entre dois nós em uma rede, sendo crucial para avaliar a eficiência de redes como ad-hoc e multicast. Fórmulas mostram que a soma dos hopcounts se relaciona à centralidade dos nós. Em redes ad-hoc, o hopcount varia com as condições de propagação, e protocolos baseados nessa métrica podem reduzir a sobrecarga de roteamento. Modificações em esquemas de multicast podem diminuir o hopcount, mas a falta de conhecimento da topologia pode impactar a eficiência. Portanto, o hopcount é essencial para otimizar redes complexas (Guo et al., 2019).

5.2 Objetivos dos Experimentos

O objetivo das simulações é o de reproduzir um sistema real ou hipotético em um ambiente controlado e seguro, com o propósito de testar e avaliar diferentes cenários e estratégias. Para manter o maior nível de controle para o experimento, é implementada uma simulação que traga possibilidades de realizar diferentes variações no ambiente proposto, sempre mantendo uma referência em comum para análise e avaliação. Assim, torna-se viável utilizar a estratégia de gerar nós em pontos específicos em um plano cartesiano definindo velocidades constantes ou variáveis para eles, de forma a comparar os protocolos de roteamento neste ambiente, como também a diferença de performance em variadas métricas. Embora tenha sido bastante usada, essa estratégia torna-se difícil quando se pretende fazer o ambiente parecer real, uma vez que os veículos fazem movimentos aleatórios que são bem difíceis de se representar manualmente.

5.3 Recursos Computacionais

O simulador NS-3, interpreta arquivos de mobilidade do tipo Tcl que são usados para descrever ambiente a ser simulado. A escolha deste simulador foi por conta da ter bastante aceitação com a comunidade acadêmica e por se tratar de um simulador de código aberto e livre para utilização sem a necessidade de adquirir uma licença de uso. Para visualização dos modelos de mobilidades, será utilizado a aplicação NetAnim (Benedikt, 2021), que é uma ferramenta de animação de rede usada em conjunto com o simulador NS3. Permite a visualização gráfica das simulações de rede, facilitando a análise e interpretação dos resultados. Utiliza como base o arquivo gerado pelo script do NS-3 com extensão xml. Como também o visualizador PyViz, que se destaca como uma ferramenta flexível para a visualização de dados, oferecendo interatividade em

tempo real (Thomas and Crandall, 2011). Se integra bem com outras tecnologias e fontes de dados, tornando-se uma escolha para projetos de visualização e simulação.

6 Experimento

O objetivo é avaliar como os protocolos de roteamento veicular, AODV, MT-AODV e DSDV, se comportam e quais são as principais diferenças entre eles, quando comparamos algumas métricas. Por exemplo, o throughput do par de nós escolhido, para avaliar a quantidade de dados transmitida de um nó transmissor para um nó receptor, avaliando neste caso se o resultado é influenciado pela variação do teste inicial. Dessa forma, para apresentar melhor o resultado esperado pelos protocolos, as análises foram separadas em diferentes experimentos. Os parâmetros gerais estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros gerais de configuração para os experimentos.

Descrição	Parâmetros utilizados
Ambiente simulado	Rodovia
Distância percorrida	1.000 m
Tempo de simulação	100 s
Área de simulação	45.000 m ²
Protocolo de transporte	UDP
Protocolos de roteamento	AODV, DSDV e MT-AODV
Tipo de aplicação	CBR
Tamanho do pacote	256 Bytes
Taxa de transmissão	5 kbit/s
Falha por desconexão	Aleatória
Modelo de propagação	Espaço livre
Repetições	40
Confiabilidade	95%

6.1 Experimento 1: Demonstração do setup

Para o experimento 1, será feita a configuração da mobilidade e do script no NS-3 seguindo os parâmetros descritos na Tabela 2 e, a seguir, os algoritmos são avaliados com base nas métricas citadas anteriormente.

Tabela 2: Parâmetros de configuração para o experimento 1.

Descrição	Parâmetros utilizados
Velocidade dos nós	9 a 11 m/s
Quantidade de nós	20
Quant. de Tabelas de Roteamento	2

Observa-se na Figura Fig. 1 que os nós, no tempo inicial 0 s, estão completamente alinhados e com o passar do tempo, a sua configuração inicial vai sendo desfeita, porém, sempre se mantém a proporcionalidade de distância entre eles de forma que não se perca a possibilidade de criar uma rota entre o nó de origem e o nó destino. Essa variação de velocidade vai se refletir apenas no eixo X, que é o eixo que representa o deslocamento do veículo na pista,

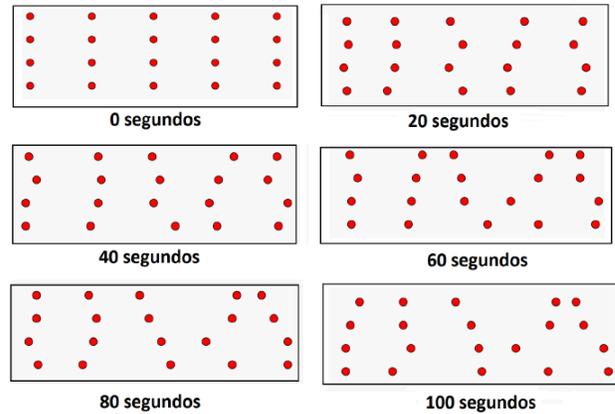


Figura 1: Posição dos nós com o passar do tempo da simulação do experimento 1.

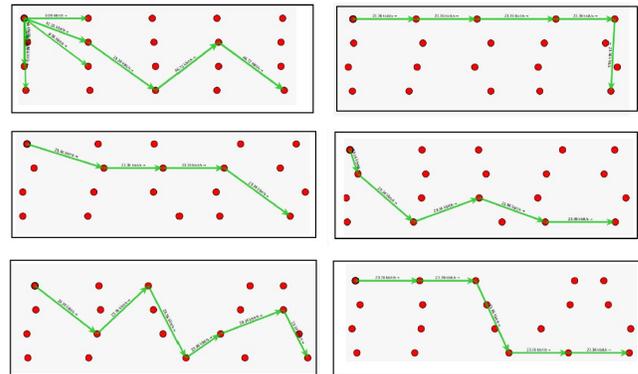


Figura 2: Variação de algumas rotas criadas durante a simulação do experimento 1.

não havendo movimentação no eixo Y. Por esse motivo, a configuração do ambiente no final do experimento será bem diferente de seu início.

Percebe-se que, na Fig. 2, durante o período de simulação, diferentes tipos de rotas foram criadas pelo protocolo de roteamento MT-AODV para que o pacote pudesse ser transmitido do nó 0 para o nó 19. Em alguns casos, sendo necessário realizar 4 saltos e em outros casos até 6 saltos foram identificados. Outras rotas foram testadas, mas essas apresentadas são algumas que foram utilizadas em momentos específicos.

Quando se avaliam os protocolos AODV, DSDV e MT-AODV, na Fig. 3, MT-AODV apresentou melhor performance em média do que o AODV e do que o DSDV nos casos onde houve falhas no 1^o, 2^o, 3^o saltos e quando ocorreram falhas no 1^o, 2^o e 3^o saltos juntos. Considerando-se a incerteza na medição, os resultados são estatisticamente similares, com exceção do resultado onde houve falhas combinadas, no qual o MT-AODV foi melhor. O protocolo AODV tem o melhor resultado no ambiente sem falha, porém em outros testes onde as falhas foram incrementadas, houve uma perda significativa na capacidade de comuni-

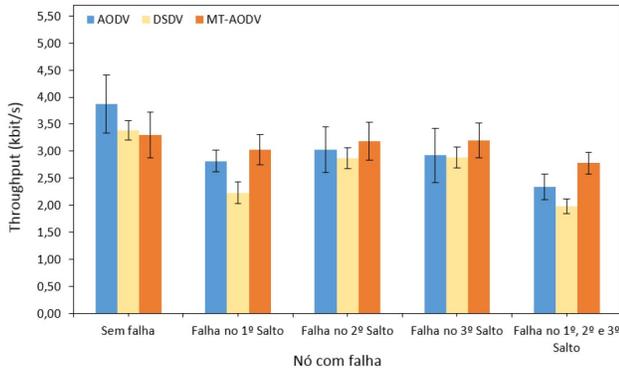


Figura 3: Resultados da métrica throughput para a simulação do experimento 1.

cação.

O MT-AODV conseguiu manter a estabilidade em praticamente todos os testes, sendo eles com ou sem falhas. Ele foi mais resiliente, pois seu mecanismo de múltiplas rotas manteve várias opções de caminhos para um mesmo destino, armazenando-as em diferentes tabelas de roteamento. Isso aumentou a disponibilidade de rotas e permitiu que o protocolo escolhesse rotas disponíveis no momento de falhas, reduzindo a latência e melhorando a entrega de pacotes. Também pelo fato de trabalhar a distribuição de tráfego, ao utilizar múltiplas rotas, o MT-AODV consegue distribuir melhor a carga de dados na rede. Isso diminui a probabilidade de permanecer, por mais tempo, sem comunicação enquanto calcula uma nova rota, como faz o AODV, que utiliza uma única rota por vez.

6.2 Experimento 2: Múltiplas Tabelas

Para o experimento 2, foram seguidas as configurações do experimento 1, mantendo as falhas aleatórias em alguns nós dentro do conjunto. Porém, neste caso, haverá uma alteração na quantidade de tabelas de roteamento que o protocolo MT-AODV pode configurar, variando de 2 tabelas até 8 tabelas com o objetivo de tornar explícito o comportamento nessas condições. A Tabela 3 apresenta os parâmetros configurados no simulador.

Tabela 3: Parâmetros de configuração para o experimento 2.

Descrição	Parâmetros utilizados
Velocidade dos nós	10 m/s
Quantidade de nós	20
Quant. de Tabelas de Roteamento	2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8

Na Fig. 4, a perda de pacotes observada no MT-AODV, quando configurado com 7 e 8 tabelas de roteamento, pode ser explicada por diversas características e dinâmicas do protocolo, que, embora tragam benefícios, também introduzem desafios que afetam o desempenho.

Com o aumento do número de tabelas de roteamento, a gestão dessas tabelas torna-se mais complexa. Isso pode

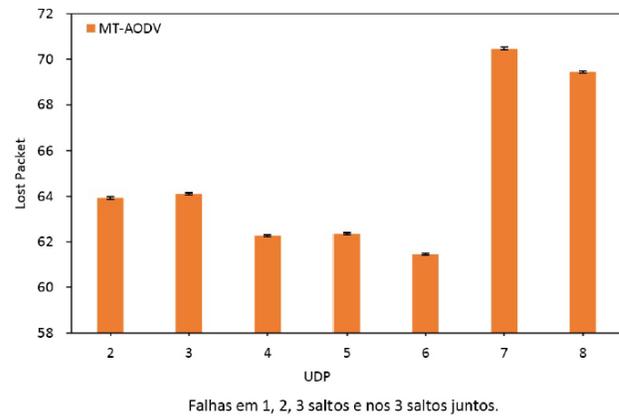


Figura 4: Resultado de LostPacket para o experimento 2.

resultar em um maior tempo de processamento necessário para analisar e selecionar a melhor rota, o que aumenta a latência e pode ocasionar perda de pacotes se as decisões de roteamento não forem tomadas de maneira ágil.

Além disso, a necessidade de mais verificações e análises para determinar a rota ideal aumenta à medida que o número de tabelas cresce. Esse processo pode causar maior latência na entrega dos pacotes, especialmente em redes veiculares, onde as condições da rede mudam rapidamente. Se a latência se tornar muito alta, o risco de perda de pacotes aumenta, sobretudo quando a entrega dos pacotes não é realizada a tempo.

Ao se complementar o experimento anterior com os resultados apresentados na Fig. 5, que analisa a quantidade de saltos na comunicação em relação ao número de tabelas de roteamento no MT-AODV, mostra que, conforme o número de tabelas de roteamento aumenta, a quantidade de saltos que os pacotes percorrem também cresce.

Isso pode ser explicado por algumas características do MT-AODV, como a capacidade de utilizar várias tabelas de roteamento, e escolher entre diferentes rotas para o mesmo destino. Essa flexibilidade pode levar o protocolo a selecionar rotas que não são necessariamente as mais curtas. Embora estejam disponíveis, não são as mais eficientes em termos de número de saltos, o que resulta em um aumento no total de saltos percorridos.

Isso é particularmente comum em cenários onde as condições da rede mudam rapidamente, fazendo com que o MT-AODV teste diferentes rotas para garantir a entrega dos pacotes, mesmo que essas rotas exijam mais saltos.

A gestão de várias tabelas de roteamento pode aumentar a complexidade do processo de roteamento. O MT-AODV pode escolher rotas que, apesar de estarem disponíveis, não são as mais diretas ou eficientes, o que aumenta o número de saltos necessários para alcançar o destino.

Esses fatores indicam que, embora o MT-AODV tenha sido projetado para melhorar a eficiência do roteamento em redes veiculares, um número elevado de tabelas pode resultar em rotas menos eficientes, aumentando a quantidade de saltos e possivelmente degradando o desempenho geral da rede. Por isso, otimizar o número de tabelas e priorizar rotas mais diretas são estratégias essenciais para maximizar a eficiência do protocolo.

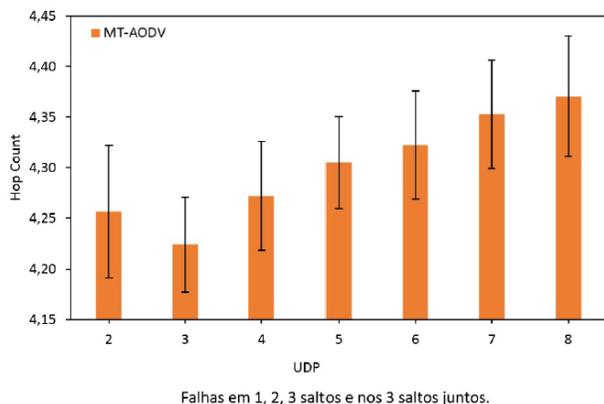


Figura 5: Resultado de Hop Count para o experimento 2.

6.3 Experimento 3: Arquiteturas mais Densas

Para o último experimento, foram seguidas as configurações que constam na Tabela 4, onde os nós estão a uma distância de 20 metros entre si, com velocidade média dos veículos de 15 m/s. Agora, haverá o incremento na quantidade de nós do experimento, passando para 30 nós. Existem falhas aleatórias em alguns nós, com o objetivo de forçar a comunicação seguir por outro caminho, para avaliar a performance do protocolo MT-AODV quando submetido a um ambiente veicular com falhas na comunicação. O objetivo principal deste experimento é o de variar as quantidades de tabelas de roteamento que o protocolo MT-AODV pode configurar para verificar o desempenho nessas configurações. Foi testado o uso de até 8 tabelas para o MT-AODV, porém apresentamos apenas o número de tabelas onde houve mais diferenças nos resultados.

Tabela 4: Parâmetros de configuração para o experimento 3.

Descrição	Parâmetros utilizados
Velocidade dos nós	15 m/s
Quantidade de nós	30
Quant. de Tabelas de roteamento	2, 3 e 4

As falhas aleatórias ocorrem durante toda a simulação, que tem a duração de 100 s. Essas falhas ocorrem por um período de 10 segundos e depois a comunicação retorna ao normal. As falhas nos nós, que estão localizados em saltos diferentes, podem ocorrer simultaneamente, e nem todos eles apresentam falhas.

Observa-se na Fig. 6 que a posição dos nós, com o passar do tempo, vai perdendo sua configuração inicial, porém sempre se mantém a proporcionalidade de distância entre os nós de forma que não se perca a possibilidade de criar uma rota entre o nó transmissor e o nó receptor. Essa variação de velocidade vai refletir apenas no eixo X, que é o eixo que representa o deslocamento do veículo na pista, não havendo movimentação no eixo Y.

Como a variação da velocidade dos nós é aleatória, a configuração dos nós ao longo da simulação terá formas

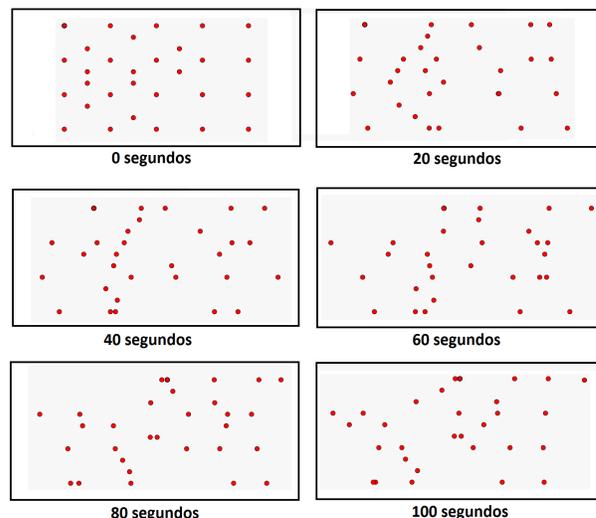


Figura 6: Posição dos nós com o passar do tempo da simulação do experimento 3.

diferentes durante o experimento. Percebe-se na Fig. 7 que diferentes tipos de rotas foram criadas, pelo MT-AODV, para que o pacote pudesse ser transmitido do nó transmissor para o nó receptor.

Quando se avalia a Fig. 8, observa-se que AODV e DSDV tiveram um desempenho pior quando são comparados os testes em um ambiente sem falha e com falha. O protocolo MT-AODV se mantém estável quando há a variação de ambiente com e sem falhas. Consequentemente, os testes realizados pelo MT-AODV no ambiente, com falhas aleatórias, apresentam melhores resultados de throughput quando comparados ao protocolo AODV, porém não é superior ao do teste com o DSDV e se considerando a margem de incerteza, são considerados similares.

Os três protocolos AODV, MT-AODV e DSDV são testados com uma taxa de 5 kbit/s. Os motivos pelos quais os valores finais dos testes ficaram abaixo de 3,5 kbit/s são solicitações de descoberta de rota, que levam a um aumento na sobrecarga da rede, o que resulta em congestionamento e atrasos na transmissão de dados. Outro fator é a distância entre os nós, pois, com o aumento da velocidade média, há um distanciamento maior entre os nós durante a simulação.

Neste experimento, o protocolo DSDV tem desempenho próximo ao MT-AODV, pois atua de forma pró-ativa, e não perdeu tantos pacotes quanto os demais protocolos, visto que atualizou antecipadamente sua tabela de roteamento com o caminho adequado para o destino. Consequentemente, terá um maior atraso que será verificado no próximo experimento.

O protocolo AODV não tem uma boa performance em comparação com o MT-AODV, pois, num ambiente com muitas interação e com grande quantidade de veículos próximos, quando o protocolo precisa recalculer um novo caminho, acaba perdendo mais pacotes que o MT-AODV, e, consequentemente, apresenta um menor throughput médio.

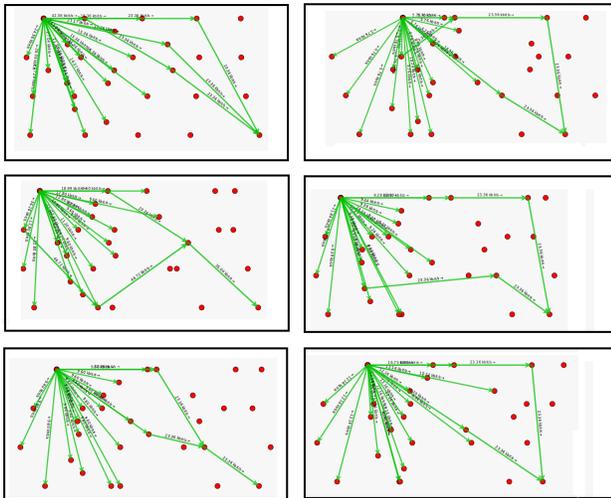


Figura 7: Diferentes rotas criadas durante a simulação do experimento 3.

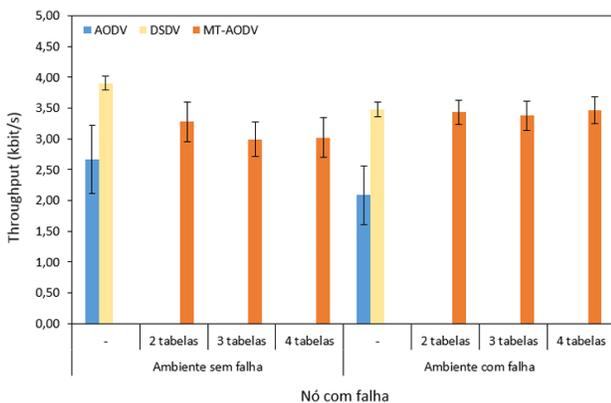


Figura 8: Resultados do throughput para a simulação do experimento 2.

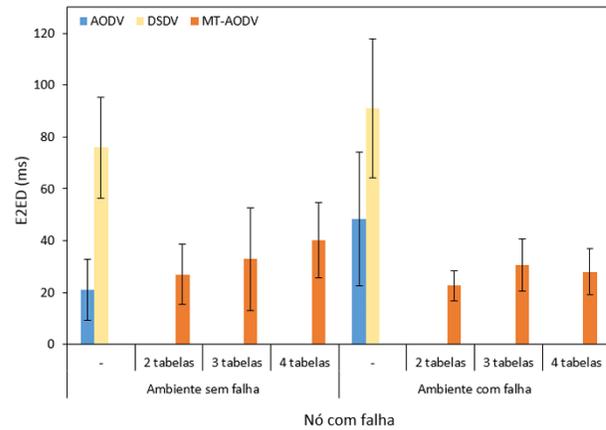


Figura 9: Resultados do E2ED para a simulação do experimento 2.

Avaliando-se a métrica E2ED (*end-to-end delay*), a partir da Fig. 9, pode-se perceber que o protocolo MT-AODV apresentou melhores resultados, quando comparado ao AODV no ambiente onde ocorrem falhas. O DSDV em ambos os testes, com e sem falhas, apresenta um resultado pior que os outros dois protocolos.

Observa-se também que o protocolo MT-AODV se mantém estável quando se realiza a simulação com e sem falhas, e se mostra resiliente nesse cenário, pois seus valores não variaram muito. O aumento da quantidade de falhas no ambiente faz com que o AODV realize mais solicitações de roteamento para descobrir caminhos alternativos em torno das falhas. Essas solicitações levam a um aumento no E2ED, já que a descoberta de rotas alternativas pode levar mais tempo. Falhas na rede ocasionam retransmissões de pacotes, o que aumenta ainda mais o E2ED.

Por ser um protocolo pró-ativo, DSDV pode não funcionar bem em redes grandes e dinâmicas, pois as tabelas de roteamento crescem com o tamanho e a densidade da rede. A sobrecarga de anúncios de rotas de inundação para manter a convergência causa atrasos na comunicação e, por conta disso, seus valores foram bem mais elevados que os valores dos protocolos AODV e MT-AODV.

Foram feitas simulações também para 5 a 8 tabelas de roteamento para o MT-AODV, porém não houve mudanças significativas em relação ao uso de 4 tabelas de roteamento.

7 Conclusões

O uso de múltiplas tabelas apresenta uma série de vantagens no roteamento em ambientes com grande mobilidade (Macedo et al., 2014).

Neste artigo, é proposto o uso do MT-AODV para cenários de redes V2V. Esta proposta é uma das primeiras propostas de uso de roteamento com múltiplas tabelas para VANETs, sendo a primeira para dados genéricos sendo analisado em diversos cenários.

O MT-AODV foi proposto para ter um bom desempenho com falhas de comunicação e congestionamento, oferecendo uma solução mais robusta do que protocolos tradi-

cionais, como AODV e DSDV. O roteamento proposto por MT-AODV apresentou desempenho superior em métricas críticas como perda de pacotes, E2ED e *throughput* na transmissão de dados em cenários com falhas nos nós.

Como trabalho futuro, é possível se propor um método para definição dinâmica do número de tabelas do roteamento em V2V a partir do uso das métricas de desempenho.

Referências

- Akyildiz, I. F., Wang, X. and Wang, W. (2005). Wireless mesh networks: a survey, *Computer networks* 47(4): 445–487. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2004.12.001>.
- Benedikt, J. (2021). Simulator of network communication with map interface for ns3, *Proceedings II of the 27st Conference EEICT* pp. 141–145. <https://doi.org/10.13164/eeict.2021.141>.
- Campanile, L., Gribaudo, M., Iacono, M., Marulli, F. and Mastroianni, M. (2020). Computer network simulation with ns-3: A systematic literature review, *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics9020272>.
- CAR 2 CAR (2022). Communication consortium, Disponível em: <https://www.car-2-car.org/>.
- de Camargo, R. F. (2000). *Sistemas inteligentes no transporte público coletivo por ônibus*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- de Castro et al., M. S. (2016). *Rede de sensores sem fio para aquisição de dados de malhas de aterramento submetidas a correntes impulsivas.*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Devangavi, A. D. and Gupta, R. (2017). Routing protocols in vanet — a survey, *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*, Bengaluru, India, pp. 163–167. <https://doi.org/10.1109/SmartTechCon.2017.8358362>.
- Firmino, R. M., Mattos, D. M. F., Medeiros, D. S. V. and Velloso, P. B. (2022). MT-AODV: resilient communication in military mobile ad-hoc networks through on-demand multiple routing tables, *2022 5th Conference on Cloud and Internet of Things (CIoT)* pp. 189–196. <https://doi.org/10.1109/ciot53061.2022.9766388>.
- Firmino, R., Mattos, D. M. F. and Medeiros, D. S. V. (2021). MT-AODV: provendo resiliência em redes ad-hoc móveis militares através de múltiplas tabelas de roteamento sob demanda, *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Fortaleza.
- Fuxjäger, P., Costantini, A., Valerio, D., Castiglione, P., Zacheo, G., Zemen, T. and Ricciato, F. (2010). IEEE 802.11p transmission using gnuradio, *6th Karlsruhe Workshop on Software Radios (WSR)*, Karlsruhe, Germany, pp. 1–4. Disponível em: <https://thomaszemen.org/papers/Fuxjaeger10-WSR-paper.pdf>.
- Guo, D., Yin, H., Li, C. and Zhang, X. (2019). Average hop-count of the shortest path in tree-like components with finite size, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSA.2018.12.034>.
- Gurewitz, O., Sidi, M. and Cidon, I. (2000). The ballot theorem strikes again: Packet loss process distribution, *IEEE Trans. Inf. Theory* 46: 2588–2595. <https://doi.org/10.1109/18.887866>.
- Loo, J., Lloret Mauri, J. and Hamilton Ortiz, J. (2011). *Mobile ad hoc networks: current status and future trends*, Taylor & Francis.
- Lu, N., Cheng, N., Zhang, N., Shen, X. and Mark, J. W. (2014). Connected vehicles: Solutions and challenges, *IEEE internet of things journal* 1(4): 289–299. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2327587>.
- Ma, X., Yin, X., Butron, G., Penney, C. and Trivedi, K. S. (2013). Packet delivery ratio in k-dimensional broadcast ad hoc networks, *IEEE Communications Letters* 17: 2252–2255. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2013.110413.131227>.
- Macedo, R., Melo, R., Santos, A. and Nogueira, M. (2014). Experimental performance comparison of single-path and multipath routing in VANETs, *Proc. IEEE Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, Montreal. <https://doi.org/10.1109/GIIS.2014.6934283>.
- Marè, R. M., Marte, C. L. and Cugnasca, C. E. (2016). Visible light communication applied to intelligent transport systems: an overview, *IEEE Latin America Transactions* 14(7): 3199–3207. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7587621>.
- Marinov, T. (2024). Performance comparison and analysis of aodv and mtp routing protocols in vanet for urban scenario, *2024 59th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICEST62335.2024.10639808>.
- More, S. and Naik, U. (2021). Optimal multipath routing for video transmission in VANETs, *Wireless Personal Communications* 116: 805–827. <https://doi.org/10.1109/GIIS.2014.6934283>.
- Moridi, E. and Barati, H. (2017). RMRPTS: a reliable multi-level routing protocol with tabu search in VANET, *Telecommunication Systems* 65: 127–137. <https://doi.org/10.1007/s11235-016-0219-6>.
- Nampally, V. and Sharma, D. M. R. (2018). Information sharing standards in communication for VANET, *International Journal of Scientific Research in Computer Science Applications and Management Studies (IJSRCSAMS)* 7(4): 2319–1953.
- NHTSA - National Highway Traffic Safety Administration (2022). Vehicle-to-vehicle communication - overview, Disponível em: <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/vehicle-vehicle-communication>.
- nsnam (2022). Network simulator, Disponível em: <https://www.nsnam.org>.

- nsnam.org (2022). Network simulator tutorial, Disponível em: <https://www.nsnam.org/docs/tutorial-pt-br/ns-3-tutorial.pdf>.
- Rasheed, A., Gillani, S., Ajmal, S. and Qayyum, A. (2017). Vehicular ad hoc network (VANET): A survey, challenges, and applications, *Vehicular Ad-Hoc Networks for Smart Cities* pp. 39–51. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3503-6_4.
- Sangaiah, A. K., Javadopur, A., Hsu, C. C., Haldorai, A. and Zeynivand, A. (2023). Investigating routing in the vanet network: Review and classification of approaches, *MDPI Algorithms* p. art. 381. <https://doi.org/10.3390/a16080381>.
- Shaban, A. M., Kurnaz, S. and Shantaf, A. M. (2020). Evaluation DSDV, AODV and OLSR routing protocols in real live by using sumo with ns3 simulation in vanet, *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, Ankara, Turkey, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/HORA49412.2020.9152903>.
- Thomas, B. L. and Crandall, A. S. (2011). A demonstration of pyviz, a flexible smart home visualization tool, *2011 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)* pp. 304–306. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2011.5766889>.
- Thorne, D. R. (2006). Throughput: A simple performance index with desirable characteristics, *Behavior Research Methods* **38**: 569–573. <https://doi.org/10.3758/BF03193886>.
- Toghi, B., Saifuddin, M., Fallah, Y. P. and Mughal, M. O. (2019). Analysis of distributed congestion control in cellular vehicle-to-everything networks, *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, IEEE, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2019.8891335>.
- TOYOTA (2022). Toyota to bring vehicle-infrastructure cooperative systems to new models in 2015, Disponível em: <https://global.toyota/en/detail/4228471>.
- Weber, J. S., Neves, M. and Ferreto, T. (2021). Vanet simulators: an updated review, *Journal of the Brazilian Computer Society* **27**(1): 1–31. <https://doi.org/10.1186/s13173-021-00113-x>.
- Xu, Q., Mak, T., Ko, J. and Sengupta, R. (2004). Vehicle-to-vehicle safety messaging in dsrc, *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, Philadelphia, pp. 19–28. <https://doi.org/10.1145/1023875.1023879>.
- Yin, X., Ma, X., Trivedi, K. S. and Vinel, A. (2014). Performance and reliability evaluation of bsm broadcasting in dsrc with multi-channel schemes, *IEEE Transactions on Computers* **63**: 3101–3113. <https://doi.org/10.1109/TC.2013.175>.
- Yoon, Y. and Kim, H. (2020). Balancing power and rate control for improved congestion control in cellular v2x communication environments, *IEEE Access* **8**: 105071–105081. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2999925>.