

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO PEDRO OLIVEIRA SOUZA

P_AID: UM PROTOCOLO DE ROTEAMENTO PARA REDES VEICULARES

CURITIBA

2023

JOÃO PEDRO OLIVEIRA SOUZA

P_AID: UM PROTOCOLO DE ROTEAMENTO PARA REDES VEICULARES

P_AID: a Routing Protocol for Vehicular Networks

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação do Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Ana Cristina Barreiras Kochem Vendramin

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Fernando Pigatto

CURITIBA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JOÃO PEDRO OLIVEIRA SOUZA

P_AID: UM PROTOCOLO DE ROTEAMENTO PARA REDES VEICULARES

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Sistemas de Informação
do Curso de Bacharelado em Sistemas de
Informação da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Data de aprovação: 14/06/2023

Ana Cristina Barreiras Kochem Vendramin
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Anelise Munaretto Fonseca
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Juliana De Santi
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA
2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de aproveitar este momento para expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a realização desse trabalho e para o meu percurso acadêmico. Sem o apoio e orientação dessas pessoas especiais, essa conquista não teria sido possível.

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha orientadora, Profa. Dra. Ana Cristina Barreiras Kochem Vendramin. Sua dedicação, conhecimento e paciência foram fundamentais para o desenvolvimento e a conclusão bem-sucedida deste trabalho. Sou profundamente grato por toda a sua orientação e apoio.

Também sou grato ao Prof. Dr. Daniel Fernando Pigatto, meu coorientador. Sua experiência na área foram essenciais para o aprofundamento do tema e a definição dos melhores caminhos a serem seguidos. Seus conselhos e sugestões foram inestimáveis e contribuíram diretamente para o sucesso do meu trabalho.

Gostaria de expressar minha gratidão aos meus pais, Noroaldo e Claudia. Seu amor, incentivo e apoio constante foram fontes de força e motivação durante todo o meu percurso. Agradeço por sempre acreditarem em mim, por me incentivarem a perseguir meus sonhos e por estarem ao meu lado em todas as etapas dessa jornada. Aos meus irmãos, Maria Thereza e José Victor, por todo o apoio e incentivo que me proporcionaram ao longo desta jornada de realização desse trabalho.

Não poderia deixar de agradecer à minha companheira, Pietra, pelo seu amor, apoio e compreensão. Sua presença constante e incentivo foram essenciais para minha motivação e equilíbrio emocional. Seu apoio incondicional e encorajamento me fortaleceram em momentos difíceis e me inspiraram a alcançar o meu melhor.

Por fim, agradeço aos meus padrinhos Wilson e Elmari que me acolheram com muito amor e carinho em sua casa no momento em que decidi realizar a graduação.

A todos vocês, expresso minha profunda gratidão. Seu apoio, amor e orientação foram fundamentais para a minha conquista. Sou grato por ter vocês em minha vida e por todo o suporte que me deram.

RESUMO

Redes Veiculares são redes de comunicação sem fio compostas por veículos que se comunicam cooperativamente entre si e com a infraestrutura de rede, de modo a trocar informações e compor um Sistema de Transporte Inteligente. Nesse sistema, busca-se a prestação de serviços inovadores e confiáveis relacionados ao tráfego em vias, como monitoramento, notificações de incidentes, alertas meteorológicos, entre outros. A comunicação de dados em uma rede veicular pode ocorrer principalmente de duas formas: veículo-para-veículo, na qual as mensagens são enviadas diretamente entre veículos, e veículo-para-infraestrutura, na qual a comunicação é estabelecida entre veículos e a infraestrutura de rede. Em situações em que é necessário se comunicar com veículos fora da área de cobertura, é utilizada a comunicação de múltiplos saltos, onde mensagens são transmitidas através de nós intermediários até alcançarem seu destino final. Para viabilizar essa comunicação, é necessário um protocolo de roteamento eficiente, capaz de proporcionar a entrega de mensagens com um baixo atraso e sem sobrecarregar a rede com cópias desnecessárias de mensagens. Este trabalho propõe um novo protocolo de roteamento para redes veiculares, chamado P_AID (do inglês *Position-based Adaptive Approach for Information Dissemination*), o qual é uma modificação do protocolo AID (do inglês *Adaptive Approach for Information Dissemination*). São realizadas simulações para avaliar o desempenho desses protocolos em relação à taxa de entrega, atraso médio na entrega e razão de redundância de mensagens, variando o número de veículos na rede e o tamanho do *buffer* desses veículos. Em todos os cenários e para todas as métricas avaliadas, o P_AID obtém um desempenho melhor que o AID.

Palavras-chave: redes veiculares; sistema de transporte inteligente; protocolo de roteamento.

ABSTRACT

Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) are wireless communication networks composed of vehicles that communicate cooperatively with each other and with the network infrastructure, in order to exchange information and compose an Intelligent Transportation System (ITS). In an ITS, the aim is to provide innovative and reliable services related to traffic in roads, such as monitoring, incident notifications, weather alerts, among others. Data communication in a VANET can occur mainly in two ways: vehicle-to-vehicle, in which messages are sent directly between vehicles, and vehicle-to-infrastructure, in which communication is established between vehicles and the network infrastructure. In situations where it is necessary to communicate with vehicles outside the coverage area, multi-hop communication is used, where a message is transmitted through intermediate nodes until they reach their final destination. To enable this communication, an efficient routing protocol is needed, capable of delivering messages with a low delay and without overloading the network with unnecessary copies of messages. This work proposes a new routing protocol for VANETs, called Position-based Adaptive Approach for Information Dissemination (P_AID), which is a modification of the Adaptive Approach for Information Dissemination (AID) protocol. Simulations are performed to evaluate the performance of these protocols in terms of message delivery rate, average message delivery delay and message redundancy ratio, varying the number of vehicles in the network and the buffer size of these vehicles. In all scenarios and for all evaluated metrics, P_AID performs better than AID.

Keywords: vehicular networks; intelligent transportation system; routing protocol.

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Protocolo AID	20
Algoritmo 2 – Protocolo P_AID	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comunicação V2V e V2I para VANETs.	15
Figura 2 – Representação do protocolo P_AID.	27
Figura 3 – Simulação de uma rede veicular na cidade de Curitiba-PR usando o simulador Veins.	29
Figura 4 – Percentual de mensagens entregues para 50 veículos.	32
Figura 5 – Percentual de mensagens entregues para 100 veículos.	32
Figura 6 – Percentual de mensagens entregues para 150 veículos.	33
Figura 7 – Percentual de mensagens entregues para 200 veículos.	33
Figura 8 – Atraso médio para 50 veículos.	34
Figura 9 – Atraso médio para 100 veículos.	34
Figura 10 – Atraso médio para 150 veículos.	35
Figura 11 – Atraso médio para 200 veículos.	35
Figura 12 – Razão de redundância para 50 veículos.	36
Figura 13 – Razão de redundância para 100 veículos.	36
Figura 14 – Razão de redundância para 150 veículos.	37
Figura 15 – Razão de redundância para 200 veículos.	37
Figura 16 – Número de mensagens retransmitidas versus número de veículos.	38
Figura 17 – Percentual de mensagens entregues com tamanhos menores de <i>buffer</i>	39
Figura 18 – Atraso médio com tamanhos menores de <i>buffer</i>	39
Figura 19 – Razão de redundância com tamanhos menores de <i>buffer</i>	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros da simulação.	30
--	-----------

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

Siglas

AID	<i>Adaptive Approach for Information Dissemination</i>
CBDRP	<i>A Cluster-Based Directional Routing Protocol in VANET</i>
CTODD	<i>Centralized Traffic-Oriented Data Dissemination</i>
DREAM	<i>Distance Routing Effect Algorithm for Mobility</i>
DRG	<i>The Distributed Robust Geocast</i>
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPSR	<i>Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks</i>
I2I	<i>Infrastructure-to-Infrastructure</i>
IoV	<i>Internet of Vehicles</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
Mobicast	<i>Mobile Just-in-time Multicasting</i>
MPR	<i>MultiPoint Relays</i>
OLSR	<i>Optimized Link State Routing Protocol for Ad Hoc Networks</i>
OMNeT++	<i>Objective Modular Network Testbed in C++</i>
P_AID	<i>Position-based Adaptive Approach for Information Dissemination</i>
RODOGE	<i>Rules to prevent Over-Dissemination Of messaGEs</i>
RSUs	<i>Road Side Units</i>
SB	<i>Smart Broadcast</i>
SUMO	<i>Simulation of Urban MObility</i>
TODD	<i>Traffic-Oriented Data Dissemination</i>
TTL	<i>Time To Live</i>

UMB	<i>Urban Multi-Hop Broadcast Protocol</i>
V2B	<i>Vehicle-to-Broadband Cloud</i>
V2I	<i>Vehicle to Infrastructure</i>
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i>
VANET	<i>Veicular Ad Hoc Network</i>
Veins	<i>The open source vehicular network simulation framework</i>
ZOF	<i>Zone of Forwarding</i>
Zor _t	<i>Zone of Relevance</i>
ZRP	<i>Zone Routing Protocol</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo Geral e Objetivos Específicos	12
1.2	Estrutura do trabalho	12
2	REDES VEICULARES	14
2.1	Características	14
2.2	Tipos de Comunicação	14
2.3	Protocolos de Roteamento e Disseminação de Dados	16
2.3.1	Protocolos norteados pela topologia da rede	17
2.3.2	Protocolos norteados pela posição dos nós	18
2.3.3	Protocolos norteados pela densidade de nós	19
2.3.4	Protocolos voltados para regiões geográficas ou agrupamento de nós	22
2.4	Coleta e <i>offloading</i> de dados	22
3	PROTOCOLO P_AID	25
4	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	28
4.1	Simulador Veins	28
4.2	Parâmetros de simulação	29
4.3	Métricas de desempenho	30
5	RESULTADOS	32
6	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Veículos inteligentes são equipados com tecnologia avançada de conectividade e comunicação, permitindo que eles se comuniquem em tempo real com outros veículos, infraestrutura de transporte e usuários (MOITE, 1992). Essa tecnologia avançada é capaz de coletar e processar dados do ambiente em torno do veículo, como condições climáticas, tráfego e obstáculos. Com esses dados, pode-se tomar decisões inteligentes sobre a direção dos veículos.

Os veículos inteligentes já são uma realidade há algum tempo, especialmente nos países mais desenvolvidos. De acordo com a empresa Statista (2021), até 2024 haverá 54 milhões de carros autônomos em operação em todo o mundo. Com esses veículos autônomos, as vias poderão se tornar mais fluidas e seguras, devido à diminuição de acidentes causados por erros humanos (HUSSAIN; ZEDADALLY, 2018).

A conexão desses veículos forma uma rede veicular que é chamada de *Veicular Ad Hoc Network* (VANET) (HARTENSTEIN; LABERTEAUX, 2008). As VANETs são altamente dependentes de trocas de dados para disseminação de informações, por isso têm sido cada vez mais utilizadas em aplicações com o objetivo de manter um sistema de transporte seguro, tais como (HARTENSTEIN; LABERTEAUX, 2008) (ULLAH *et al.*, 2020) (GILLANI *et al.*, 2022): segurança de trânsito, assistência ao motorista, condução autônoma, comunicações de emergência, monitoramento de tráfego, notificação de acidentes, alertas meteorológicos e aplicação automática de regras de trânsito.

Segundo Gillani *et al.* (2022), estamos vivendo na era dos Sistemas de Transporte Inteligente, do inglês, *Intelligent Transportation Systems* (ITS), os quais são uma extensão das VANETs. Em um ITS, as VANETs provêm a comunicação cooperativa sem fio entre veículos e entre esses e estações fixas para trocar e coletar informações, promovendo uma melhor coordenação entre os veículos e a prestação de serviços de transporte inovadores e confiáveis (SOARES, 2014) (ULLAH *et al.*, 2020) (GILLANI *et al.*, 2022).

Segundo Ullah *et al.* (2020), com o apoio de um ITS, as VANETs aprimoram a troca de informações por meio de uma comunicação veículo para veículo, do inglês *Vehicle to Vehicle* (V2V), para informar condições incertas do tráfego, como acidentes e engarrafamentos. Essa troca de informações pode gerar uma sobrecarga de comunicação ao transmitir dados para veículos ou servidores distantes. Para resolver este problema, estações fixas conhecidas como Unidades de Acostamento, do inglês *Road Side Units* (RSUs), são implantadas ao longo da estrada para coletar e transmitir informações para o ITS (ULLAH *et al.*, 2020).

As Unidades de Acostamento (RSUs) formam a infraestrutura de uma rede veicular (HARTENSTEIN; LABERTEAUX, 2008). As RSUs ficam dispostas ao longo de vias, sendo estrategicamente posicionadas para cobrir toda região necessária para realizar a comunicação com os veículos, e servem de apoio para realização de tarefas, processamento de dados e distribuição de informações (HUANG; LU; CHOO, 2017). Os veículos armazenam dados de aplicações e os transmitem para RSUs próximas utilizando a comunicação veículo para infraes-

trutura, do inglês *Vehicle to Infrastructure* (V2I) ou, quando a RSU não estiver diretamente dentro do alcance, a comunicação V2V se torna obrigatória (ULLAH *et al.*, 2020). As RSUs, por sua vez, transmitem os dados agregados para o ITS de modo a gerenciar eventos de emergência, como acidentes nas vias, deslizamento de terra, congestionamento de tráfego, disponibilidade de passagem livre para ambulância e identificação precoce de obstáculos (ULLAH *et al.*, 2020).

Segundo Hartenstein e Laberteaux (2008), devido à constante movimentação dos veículos, as VANETs são caracterizadas por uma topologia altamente dinâmica, o que resulta em mudanças constantes na configuração da rede. Além disso, essas redes podem enfrentar problemas de conectividade devido à baixa densidade de veículos em determinadas áreas. Diante dessas características, a estabilidade e a confiabilidade de um roteamento de dados são desafios críticos a serem enfrentados. Para otimizar o tráfego de dados em VANETs, são necessários protocolos de roteamento que possibilitem uma maior taxa de entrega de mensagens com um menor atraso. Porém, esses protocolos precisam prover uma boa eficiência no roteamento, para não sobrecarregar a rede com mensagens desnecessárias, dificultando a comunicação entre os veículos.

O presente trabalho propõe um protocolo de roteamento para VANETs que leva em conta tanto a posição de um veículo como a densidade da rede na qual o veículo se encontra. O desempenho desse protocolo é analisado em termos do percentual de mensagens entregues, do atraso médio na entrega e da razão de redundância de mensagens.

1.1 Objetivo Geral e Objetivos Específicos

O objetivo geral do presente trabalho é propor um protocolo de roteamento para VANETs.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um protocolo de roteamento para redes veiculares que analise informações sobre os veículos e a rede;
- Criar diferentes cenários de simulação variando a densidade de tráfego da rede e o tamanho do *buffer* dos veículos;
- Avaliar o desempenho do protocolo proposto em diferentes cenários de simulação e compará-lo com um protocolo relacionado considerando diferentes métricas de desempenho.

1.2 Estrutura do trabalho

Este documento está organizado em seis capítulos. O presente capítulo apresenta um panorama geral sobre as VANETs e um ITS, discorre sobre os desafios a serem enfrentados,

descreve a importância de um protocolo de roteamento para VANETs e detalha os objetivos do presente trabalho. O Capítulo 2 descreve os principais conceitos e o estado da arte das VANETs. O Capítulo 3 discorre sobre o protocolo de roteamento proposto. O Capítulo 4 descreve o funcionamento de um simulador para VANETs, detalha o ambiente de simulação em que o protocolo será implementado, bem como as métricas utilizadas para avaliar o seu desempenho. O Capítulo 5 expõe os resultados obtidos através das simulações. Encerra-se o trabalho com o Capítulo 6, no qual são apresentadas as considerações finais.

2 REDES VEICULARES

Para uma melhor compreensão do contexto do presente trabalho, este capítulo apresenta uma visão geral sobre redes veiculares e seu estado da arte.

2.1 Características

Redes veiculares, ou VANETs (*Veicular Ad Hoc Networks*), são redes móveis onde os veículos e elementos de infraestrutura, também chamados de nós, conseguem realizar comunicação entre si (ZEADALLY *et al.*, 2012). As redes veiculares compõem os Sistemas de Transporte Inteligente (ITS), os quais visam oferecer serviços voltados para veículos, como informações sobre as condições de vias, serviços de localização, controle de tráfego, informações em tempo real sobre acidentes, aplicações de entretenimento, entre outras (GILLANI *et al.*, 2022).

Segundo Yeferny e Hamad (2021), existem algumas características sobre VANETs que valem ser destacadas:

- **Mobilidade:** dependendo do tráfego, a velocidade dos veículos pode variar muito. Velocidades baixas facilitam a troca de mensagens entre os veículos. Em veículos com alta velocidade, pode haver colisão de dados, perda de mensagens e interferências;
- **Padrões de movimento:** em VANETs, veículos seguem a topologia das vias onde trafegam, ou seja, seus movimentos são bem previsíveis e controlados;
- **Densidade do tráfego:** a densidade de veículos nas vias pode variar muito dependendo da localização e horário do dia. Em um tráfego com alta densidade, pode ocorrer alta transmissão de dados, congestionando a rede. Já com uma baixa densidade, problemas como desconexão surgem como um desafio;
- **Heterogeneidade:** os veículos apresentam características distintas, como área de comunicação, capacidade de detecção de outros veículos e categoria (privado, autoridade e veículo de manutenção).

2.2 Tipos de Comunicação

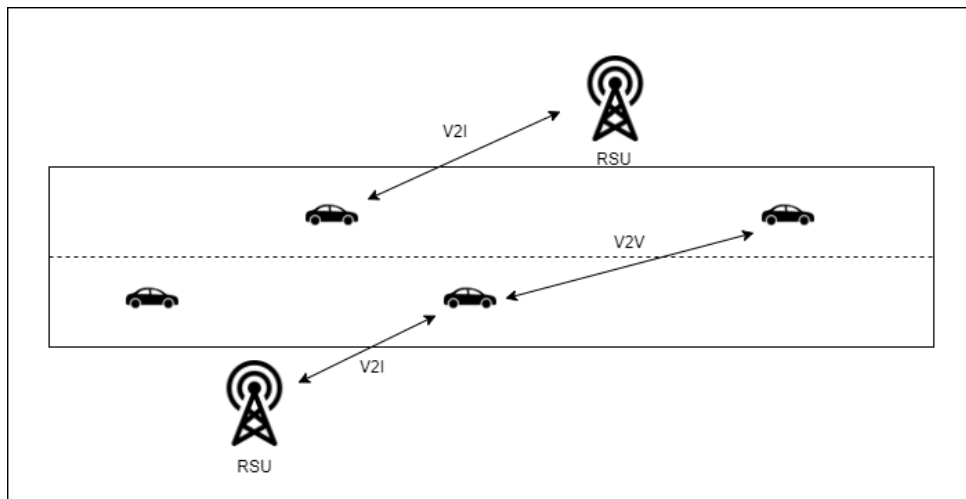
Segundo Cunha *et al.* (2016), Yeferny e Hamad (2021) e Soares (2014), é possível realizar os seguintes tipos de comunicação em VANETs:

- **Intra-veicular:** comunicação entre sensores internos de um veículo, tais como o *Global Positioning System* (GPS) e sensores de velocidade e pressão dos pneus;

- **Veículo para veículo (V2V):** apenas veículos participam da comunicação. Nesse caso, veículos atuam como roteadores e encaminham mensagens do transmissor ao destinatário. Para haver conexão entre os veículos, é preciso que estes estejam próximos o suficiente para permitir a troca de mensagens. Por isso, em vias com tráfego esparso, essa forma de comunicação pode não ser a mais adequada;
- **Veículo para infraestrutura (V2I):** nesse tipo de comunicação, o veículo troca mensagens diretamente com a RSU. Então, há a necessidade desse veículo estar ao alcance da área de cobertura da RSU para realizar essa comunicação;
- **Veículo para Nuvem em Banda Larga (do inglês *Vehicle-to-Broadband Cloud* (V2B)):** comunicação entre veículos e a nuvem de banda larga por meio de tecnologias sem fio como 3G e 4G;
- **Infraestrutura para Infraestrutura (do inglês *Infrastructure-to-Infrastructure* (I2I)):** estende-se a cobertura da rede possibilitando a comunicação entre RSUs.

Os tipos principais de comunicação (V2V e V2I) estão representados na Figura 1, onde é possível perceber os veículos realizando tanto comunicação direta com as RSUs, como também, uma comunicação entre os veículos.

Figura 1 – Comunicação V2V e V2I para VANETs.



Fonte: Autoria própria (2023).

Uma forma muito utilizada de compartilhar informações entre os nós da rede são os *beacons* (YOUSEFI; MOUSAVI; FATHY, 2006). *Beacons* são pequenos pacotes que são propagados de tempos em tempos pelos veículos presentes em uma VANET para compartilhar informações, como posição, velocidade e aceleração. Com essas informações, cada veículo tem uma visão de como se encontra a rede local na qual está inserido e pode, por exemplo, avaliar para qual vizinho encaminhar uma mensagem a fim desta ser roteada até o seu destino.

2.3 Protocolos de Roteamento e Disseminação de Dados

Muitas aplicações das VANETs são voltadas para disseminação de informações sobre as vias, tais como acidentes, congestionamentos, alertas meteorológicos e condições adversas de vias (asfalto esburacado, má sinalização, falta de acostamento, óleo na pista, animais soltos na via, entre outros) que possam torná-las perigosas para os motoristas.

Diferentes protocolos de roteamento e disseminação de dados foram desenvolvidos para VANETs buscando prover o(s) melhor(es) caminho(s) para obter êxito no encaminhamento de mensagens de uma origem a um ou mais destinos, com baixo atraso e sem sobrecarregar a rede com réplicas desnecessárias de mensagens. O destino de uma mensagem pode ser um único nó da rede (como um veículo ou uma estação fixa), um conjunto específico de nós ou todos os nós localizados dentro de uma região geográfica (SOARES, 2014) (CUNHA *et al.*, 2016).

Com base no destino de uma mensagem, Hamdi *et al.* (2020) e Soares (2014) classificam os protocolos para VANETs em três categorias:

- *Unicast*: procuram realizar o envio de dados de uma única origem a um único destino. Entre suas principais aplicações, estão a direção cooperativa, disseminação de avisos sobre estado do trânsito e publicidade;
- *Geocast*, *Multicast* e *Cluster*: os dados são enviados a um conjunto de veículos localizados ou não na mesma região geográfica. Este tipo de protocolo pode ser utilizado para avisar veículos localizados em uma área de interesse a respeito de algum evento de trânsito, como congestionamentos e acidentes;
- *Broadcast*: visam enviar os dados de interesse geral a todos os nós dentro de uma área de cobertura e, em seguida, cada nó vizinho participa também do processo de disseminação, retransmitindo cada mensagem para todos os seus vizinhos. Esses protocolos são importantes para notificações de segurança, onde os veículos próximos a um dado evento devem ser informados o mais rápido possível.

Nos protocolos que empregam *broadcast*, uma mesma mensagem é encaminhada várias vezes por cada nó, o que aumenta a probabilidade de entrega dessa mensagem e reduz o seu atraso na entrega. Por outro lado, uma inundação “cega”, isto é, sem controle, pode ocasionar alta contenção e colisão de pacotes no meio de transmissão, conhecido como problema de tempestade de transmissão (*broadcast storm problem*) (NAJAFZADEH *et al.*, 2013) (SOARES, 2014) (GILLANI *et al.*, 2022). Além disso, uma inundação de mensagens podem ocasionar um esgotamento de recursos na rede e nos nós, como espaço de armazenamento em *buffer*.

Para amenizar esses problemas, muitos protocolos utilizam uma abordagem em que apenas um vizinho ou um pequeno grupo de vizinhos é selecionado para participar da disseminação, reduzindo assim o número de mensagens redundantes na rede. Para essa seleção, os

protocolos utilizam algum conhecimento sobre os nós e sobre a rede, tais como topologia da rede, posição dos nós, densidade de nós na rede, regiões geográficas, entre outras.

As próximas seções apresentam alguns protocolos para VANETs que utilizam o conhecimento da rede e/ou dos nós para tomar decisões de encaminhamento de mensagens.

2.3.1 Protocolos roteados pela topologia da rede

Segundo (SINGH; AGRAWAL, 2014), os protocolos de roteamento que utilizam informações topológicas da rede para determinar a melhor rota de encaminhamento de mensagens são classificados em três subcategorias:

Roteamento Proativo: mantém informações atualizadas sobre o estado de todos os caminhos da rede e de todos os nós. Cada nó veicular envia informações pertinentes para todos os outros nós na rede, que então usam essas informações para construir uma visão completa da topologia da rede. Com base nessa visão da rede, cada nó pode determinar as rotas mais curtas e confiáveis para alcançar outros nós na rede.

No artigo de Jacquet *et al.* (2001), é apresentado o protocolo *Optimized Link State Routing Protocol for Ad Hoc Networks* (OLSR). Ele é considerado um protocolo proativo com base na topologia, então as tabelas de roteamento são atualizadas com frequência. O protocolo OLSR limita o número de nós que encaminham as mensagens de controle usando *MultiPoint Relays* (MPR). Em vez de permitir que todos os nós encaminhem as mensagens de controle sobre a topologia da rede, o OLSR usa o conceito de MPR para selecionar um conjunto de nós responsáveis por encaminhar essas mensagens. Os nós MPR são selecionados de forma que, juntos, possam alcançar todos os nós da rede de maneira eficiente. Isso reduz a sobrecarga de mensagens de controle na rede e aumenta a eficiência do roteamento. Os nós MPR são selecionados com base no conjunto de vizinhos que eles alcançam. Cada nó seleciona um conjunto mínimo de vizinhos que pode alcançar todos os outros nós na rede, e esses vizinhos são adicionados ao conjunto MPR do nó. Os nós que fazem parte do conjunto MPR de um nó recebem prioridade na transmissão de mensagens de controle de topologia. Ao usar o conceito de MPR, o OLSR pode reduzir significativamente a sobrecarga de mensagens de controle na rede, sem comprometer a eficiência do roteamento.

Roteamento Reativo: apenas gera as rotas sob demanda e as mantém somente enquanto estas estiverem sendo usadas. Esse tipo de protocolo é especialmente apropriado para situações em que a transferência de dados entre veículos pode usar exclusivamente uma variedade muito restrita de rotas. Um exemplo desse tipo de protocolo de roteamento é o *Dynamic Source Routing* (DSR) (JOHNSON *et al.*, 2001);

Roteamento Híbrido: esse tipo de protocolo divide a rede em local e global. Na rede local é utilizado o roteamento proativo, e na rede global é utilizado o roteamento reativo. Com isso, minimizam-se os custos e o atraso no processo de descoberta das rotas. Um protocolo que se encaixa nessa categoria é o *Zone Routing Protocol* (ZRP) (HAAS; PEARLMAN, 1998).

Segundo (ULLAH *et al.*, 2020), os protocolos de roteamento baseados na topologia da rede não são adequados para VANETs dada a alta mobilidade dos veículos o que torna a topologia da rede dinâmica.

2.3.2 Protocolos norteados pela posição dos nós

Os protocolos de roteamento que norteiam suas decisões de encaminhamento com base na posição dos nós precisam de um sistema de posicionamento como o GPS para calcular em tempo real a posição exata de um nó. Segundo Singh e Agrawal (2014), os veículos podem propagar, por meio dos *beacons*, suas posições e outros parâmetros relevantes (como a velocidade e a direção) para outros veículos e para as RSUs próximas. Essas informações podem ser utilizadas para construir uma topologia dinâmica da rede e para determinar o melhor caminho para encaminhar um pacote de dados de um veículo para outro.

O protocolo *Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks* (GPSR), proposto por Karp e Kung (2000), é um exemplo de protocolo de roteamento que utiliza a posição geográfica dos nós para encaminhamento das mensagens. Ele tem como objetivo encontrar a rota mais curta entre dois nós na rede, minimizando o número de saltos necessários para encaminhar as mensagens. Quando um nó deseja enviar uma mensagem para um destino, ele usa o algoritmo guloso de roteamento do GPSR para encontrar a rota mais curta. Com a posição conhecida do destino da mensagem, o algoritmo começa procurando por um nó vizinho que esteja mais próximo do destino. Ao encontrar esse nó, a mensagem é encaminhada para ele. Esse processo se repete até a mensagem chegar no nó destino. No entanto, se o nó vizinho mais próximo não puder receber a mensagem diretamente, o algoritmo escolherá um ponto de passagem na fronteira do alcance do sinal de rádio do nó atual e do nó vizinho mais próximo, que é determinado de forma mais cautelosa, evitando possíveis obstáculos e garantindo que a mensagem chegue ao destino. Assim, embora o GPSR seja conhecido como um protocolo de roteamento "guloso", ele também usa técnicas mais cuidadosas e adaptativas para lidar com possíveis falhas na primeira escolha de rota, garantindo que as mensagens cheguem ao destino de forma eficiente.

Korkmaz *et al.* (2004) apresenta o protocolo *Urban Multi-Hop Broadcast Protocol* (UMB) e introduz uma técnica chamada *broadcast* direcional onde o nó origem transmite os dados apenas para um conjunto dos veículos baseados em suas distâncias.

O protocolo *Smart Broadcast* (SB) proposto por Fasolo, Zanella e Zorzi (2006), utiliza o mesmo conceito que o protocolo UMB, onde os dados são transmitidos para apenas alguns de seus vizinhos. A diferença é que o protocolo SB aplica uma técnica de resolução de contenção, visando reduzir o tempo para selecionar esse vizinhos para os quais os dados serão transmitidos.

Outro exemplo de protocolo de roteamento que utiliza a posição geográfica dos nós para encaminhamento das mensagens é o *Distance Routing Effect Algorithm for Mobility* (DREAM),

apresentado por Basagni *et al.* (1998). O DREAM leva em consideração dois princípios para sua construção. O primeiro é o efeito distância, que indica que quanto mais distantes estão dois nós, menor a velocidade relativa entre os dois. Isso implica que é possível atualizar a tabela de roteamento com uma menor frequência em comparação com os nós que estão com uma distância menor. O segundo princípio é que cada veículo pode determinar a frequência em que compartilha sua posição com base na velocidade em que se encontra. Veículos mais lentos podem compartilhar sua posição em maiores intervalos de tempo do que aqueles com velocidades maiores.

Almeida *et al.* (2019) propõem um protocolo, chamado *Rules to prevent Over-Dissemination Of messaGEs* (RODOGE), para disseminação de mensagens de alerta com controle de replicação. O foco do protocolo está em evitar o problema da *broadcast storm*. Para isso, eles propõem a limitação da disseminação de mensagens por dispositivos que integram a rede (móveis e de infraestrutura). As regras para controle de reenvio de mensagens são baseadas em informações contidas na própria mensagem de alerta, como: tempo de vida, remetente, *backoff* (para evitar colisões) e distância do remetente. Os resultados mostraram que o RODOGE evita o problema de *broadcast storm* ao reduzir a quantidade de mensagens geradas e recebidas, além de manter uma área de cobertura de mensagens que viabiliza a reação do motorista a tempo de evitar acidentes.

Em Ullah *et al.* (2020), é apresentada uma taxonomia para diferentes protocolos de roteamento voltados para VANETs que consideram as posições dos nós. Eles discutem as vantagens e desvantagens de cada protocolo de modo a identificar novos desafios.

2.3.3 Protocolos norteados pela densidade de nós

Soares (2014) propõe os protocolos *Traffic-Oriented Data Dissemination* (TODD) e *Centralized Traffic-Oriented Data Dissemination* (CTODD) que levam em consideração informações de tráfego em tempo real para escolher os melhores veículos retransmissores de pacotes. O que diferencia os dois protocolos propostos é a forma como as informações em tempo real do tráfego são obtidas. No TODD, todos os veículos carregam bancos de dados referentes ao tráfego de veículos e no CTODD tem-se estações fixas instaladas nas interseções para coletar informações sobre o tráfego de veículos e calcular o melhor caminho de disseminação de pacotes. O processo é feito através de uma métrica calculada por cada veículo candidato, podendo priorizar três fatores: distância ao destino, velocidade e densidade de veículos na rua em que está localizado. Esses fatores são normalizados baseado em valores estimados para a máxima distância ao destino, máxima velocidade e máxima densidade de veículos no cenário. No TODD, todos os veículos que calculam a métrica, utilizam os três fatores. No CTODD, os veículos utilizam apenas os dois primeiros fatores. Uma vez que cada fator é normalizado, coeficientes são utilizados para atribuir pesos a eles. Os protocolos TODD e CTODD são do tipo *unicast*, pois procuram disseminar dados de um veículo fonte a um único destino, sendo que esse destino

é um nó estático e ambos os protocolos assumem que o veículo origem sabe a localização do destino.

Outros protocolos tentam estimar a densidade de nós nas vias e reduzir o número de mensagens redundantes encaminhadas com base na informação sobre o número de cópias de cada mensagem que cada veículo recebe em um determinado período de tempo para decidir se colabora ou não com a disseminação da informação. Esses protocolos são detalhados a seguir.

O protocolo *Adaptive Approach for Information Dissemination* (AID) apresentado por Bakhouya, Gaber e Lorenz (2011) é um exemplo de protocolo que retransmite as mensagens recebidas em *broadcast*. Porém, nem todas as mensagens recebidas são retransmitidas, como descrito no Algoritmo 1.

Algoritmo 1 Protocolo AID

```

1:  $M \leftarrow \text{mensagemRecebida}$ 
2:  $t_0 \leftarrow \text{horarioAtual}$ 
3:  $c \leftarrow 0$  // Contador de número de mensagens recebidas em um nó
4:  $s \leftarrow 0$  // Contador usado para determinar quando o nó deve retransmitir a mensagem. É ajustado
   com base no número de mensagens recebidas e no tempo entre as chegadas dessas mensagens.
5:  $x \leftarrow \text{tempoDecisaoTransmissaoMensagem}$  // Tempo em que um nó esperará por novas cópias
   de uma mensagem antes de decidir se encaminha ou não uma mensagem
6:  $\text{listaDeIntervalosDeTempo} \leftarrow []$ 
7: enquanto  $x$  não expirar faça
8:   se cópia de  $M$  é recebida então
9:      $t_1 \leftarrow \text{horarioAtual}$ 
10:     $c \leftarrow c + 1$ 
11:     $\text{listaDeIntervalosDeTempo.adiciona}(t_1 - t_0)$ 
12:   finaliza se
13: finaliza enquanto
14: se  $c = 0$  então
15:   Retransmite a mensagem em broadcast
16: senão,
17:   para  $\Delta t \in \text{listaDeIntervalosDeTempo}$  faça
18:     se  $x/c - \Delta t > 0$  então
19:        $s \leftarrow s - 1$ 
20:     senão,
21:        $s \leftarrow s + 1$ 
22:     finaliza se
23:   finaliza para
24:   se  $s > 0$  então
25:     Retransmite a mensagem em broadcast
26:   senão,
27:     Descarta a mensagem
28:   finaliza se
29: finaliza se

```

O AID leva em consideração o número de cópias de uma mesma mensagem que cada nó veicular recebe em um determinado período de tempo (x) para decidir se retransmite ou não essa mensagem (linhas 7 a 13 do Algoritmo 1). Se a decisão for pela retransmissão da

mensagem, esta será realizada em *broadcast* (linha 15). Ou seja, se um nó receber muitas cópias de uma mesma mensagem em um período de tempo, é provável que, nesse período, a via esteja densa (muitos nós), e com isso, não é necessária uma retransmissão da mensagem, pois esta tem grandes chances de chegar ao seu destino. Entretanto, se o nó receber poucas cópias de uma mensagem, é importante realizar a sua retransmissão, pois o nó veicular pode ter poucos vizinhos (isto é, a via pode estar esparsa). O ajuste do valor do contador s , apresentado nas linhas 19 e 21, é realizado pelas seguintes observações: (1) quando um nó recebe poucas mensagens (valor de c é pequeno) pode ser que ele tenha poucos vizinhos. Nesse caso, o tempo entre chegadas de mensagens pode ser maior que x/c , o que significa que há um número sub-ótimo de retransmissões e, portanto, o nó deve retransmitir a mensagem para obter melhor acessibilidade; (2) Por outro lado, quando c é grande, isso significa que o nó pode ter muitos vizinhos com um número excessivo de cópias de uma mensagem. Portanto, o tempo entre chegadas de mensagens pode ser menor que x/c fazendo com que o nó descarte a mensagem.

Outro exemplo de protocolo que tem como base o roteamento por *broadcast* de forma controlada é o protocolo proposto por Najafzadeh *et al.* (2013). Nesse protocolo, cada veículo mantém uma lista de vizinhos atualizada por meio dos *beacons*. Ao receber uma mensagem para ser encaminhada via V2V, o veículo analisa sua lista de vizinhos, se essa estiver apenas com um veículo, significa que a rede está esparsa e a mensagem é transmitida em *broadcast*. Entretanto, se houver mais registros na lista de vizinhos, realiza-se a Equação 1 para decidir se a mensagem será ou não enviada.

$$Wt = \left(1 - \frac{d_{ij}}{R}\right)^{nn} * Wt_{max} \quad (1)$$

onde:

- Wt : tempo em que o veículo i , o qual está analisando se a mensagem deve ou não ser transmitida, ficará esperando a chegada de novas cópias da mensagem;
- nn : número de vizinhos que estão próximos do destino da mensagem a ser enviada;
- d_{ij} : distância do veículo i até o veículo j , sendo j o vizinho de i ;
- R : área de cobertura do veículo i ;
- Wt_{max} : tempo máximo de espera que o veículo i pode aguardar para transmitir a mensagem.

Após o término de Wt , se uma ou mais cópias da mensagem forem recebidas nesse período de tempo, a mensagem não é transmitida, caso contrário, a mensagem é transmitida. É indicado, ainda, que o valor de Wt_{max} deve ser cuidadosamente escolhido, pois se o valor for muito baixo, muitos veículos podem transmitir a mensagem antes mesmo de receber outras cópias. Mas caso o valor seja muito alto, o atraso nas mensagens poderá ser significativo.

2.3.4 Protocolos voltados para regiões geográficas ou agrupamento de nós

De acordo com Singh e Agrawal (2014), um protocolo com base em *geocast* utiliza mensagens *Mobile Just-in-time Multicasting* (Mobicast) e seu principal fator de consideração é o tempo. O funcionamento desse tipo de protocolo pode ser descrito como um roteamento de mensagens dentro de uma determinada área e em um certo período de tempo. Essas áreas são chamadas de zona de relevância, do inglês *Zone of Relevance* (Zor_t), e sempre que o nó destino pertencer a outras ZORs, a comunicação é feita usando a zona de encaminhamento, do inglês *Zone of Forwarding* (ZOF). O veículo que entra na ZOF tem a responsabilidade de encaminhar o pacote de dados para outras ZORs. Um exemplo de protocolo de roteamento com base em *geocast* é o *The Distributed Robust Geocast* (DRG) (JOSHI; SICHITIU; KIHIL, 2007).

Segundo Singh e Agrawal (2014), veículos com características parecidas, como velocidade e direção, são agrupados e formam um *cluster*. Dentre os vários *clusters* presentes na rede, é escolhido um *cluster head* que será o responsável por gerenciar a comunicação entre eles. Se um veículo deseja enviar um pacote para um outro veículo que esteja no mesmo *cluster*, essa comunicação é feita diretamente. Mas se o veículo de destino estiver em um diferente *cluster* do emissor, o *cluster head* cria uma infraestrutura de rede virtual que servirá de apoio para a transmissão da mensagem. Um exemplo de protocolo com base em *cluster* é o *A Cluster-Based Directional Routing Protocol in VANET* (CBDRP) (SONG *et al.*, 2010).

2.4 Coleta e *offloading* de dados

Segundo Gillani *et al.* (2022), a coleta de dados em VANETs envolve a colaboração entre os veículos e a infraestrutura, bem como a agregação e a transmissão eficiente dos dados coletados. O processo de coleta de dados deve lidar com a mobilidade dos veículos e a rápida mudança na topologia da rede, garantindo que eles sejam coletados de forma confiável e transferidos (processo chamado de *offloading*) aos destinatários corretos para que estes possam realizar o seu processamento, análise e armazenamento. Os dados coletados podem ser transferidos em intervalos de tempo pré-determinados ou em tempo real. A escolha dos protocolos a serem utilizados para coleta e *offloading* de dados dependerá do quão sensível esses dados são em relação ao tempo: (i) dados precisam ser coletados em tempo real: protocolos projetados para coletas em tempo-real são muito utilizados em emergências médicas, agências de segurança ou ao reunir informações militares sensíveis e relacionadas à defesa. Esses protocolos são muito dependentes das condições da via, pois se essa estiver com poucos nós (via esparsa) e não estiver na área de cobertura de uma RSU, não será possível realizar um *offloading* dos dados em tempo real; (ii) a coletada de dados é tolerante a atrasos: a entrega da mensagem é garantida por meio de mecanismos de armazenamento e retransmissão (*carry-forward*). Embora encaminhamentos imediatos sejam possíveis, é esperado que algumas transmissões sejam afetadas e gerem algum atraso. Dados que são tolerantes a atrasos são

comumente utilizados para questões rotineiras, sistemas de previsão de tempo, aplicativos de *streaming*, entre outros; (iii) coleta de dados de melhor esforço (do inglês *Best Effort*): protocolos voltados para esse tipo de coleta são projetados para fornecer serviços de comunicação sem garantias de qualidade de serviço. Eles fazem o possível para entregar os dados coletados, mas não oferecem uma entrega confiável ou garantem limites de tempo para as entregas.

Os dados coletados e transmitidos em VANETs podem ser processados e/ou ficar armazenados em infraestruturas fixas como as RSUs. Diversas aplicações demandam tarefas de armazenamento e processamento de informações que são, por vezes, inviáveis para os recursos computacionais existentes em veículos. Para superar estes desafios, as redes veiculares podem contar com os sistemas ITS.

Os avanços nas redes veiculares e de comunicação originaram o termo Internet de Veículos, do inglês *Internet of Vehicles (IoV)*, que engloba aplicações como planejamento de rotas, compactação de vídeo e navegação com realidade aumentada, fornecendo melhores experiências de viagem para motoristas e passageiros (NING *et al.*, 2021). Entretanto, os recursos computacionais e de armazenamento embarcados em veículos podem ser insuficientes para lidar com aplicações que possuam restrições de tempo. Para resolver este problema, os sistemas ITS têm delegado tarefas de processamento e armazenamento para camadas de computação em névoa.

A computação em névoa fornece serviços de computação e armazenamento fisicamente mais próximos aos usuários finais, desonerando os serviços de nuvem (ATLAM; WALTERS; WILLS, 2018). O uso de computação em névoa no contexto de ITS pode representar alguns benefícios para a coleta de dados em IoV.

Segundo Ning *et al.* (2021), nas redes IoV, a camada de névoa pode ser responsável pela execução de algoritmos mais sofisticados de Inteligência Artificial, por exemplo, realizando processamento eficiente de aplicações críticas, entrega de conteúdo de baixa latência para entretenimento interativo e transmissão inteligente para atender requisitos de qualidade de serviço. A computação em névoa também pode evitar sobrecarga em enlaces de comunicação e fornecer serviços de computação e cache com baixa latência. As RSUs, por exemplo, quando equipadas com servidores de névoa, são capazes de atender veículos dentro de suas áreas de cobertura que estejam realizando o *offloading* de tarefas computacionais. Para casos em que as tarefas computacionais excedem a capacidade dos servidores de névoa, pode ocorrer a transferência para servidores em nuvem.

Ullah *et al.* (2020) apresentam uma nova arquitetura para VANETs que utiliza a rede celular e a computação em névoa, do inglês *Fog Computing* (ATLAM; WALTERS; WILLS, 2018), para melhorar os protocolos de roteamento que norteiam suas decisões com base na posição dos nós. Essa arquitetura utiliza veículos estacionados próximos a entroncamentos de vias como guardas para pontos de ancoragem ou junções com o ITS. Os registros nos veículos estacionados podem ser atualizados por veículos estacionados vizinhos, bem como durante a sinalização com mensagens *beacon* ou durante trocas de mensagens de dados. Na arquitetura

proposta, os veículos estacionados passam informações para a RSU e esta para um servidor da névoa, o qual se comunicará com um servidor na nuvem.

O próximo capítulo detalha o protocolo de roteamento desenvolvido nesse trabalho.

3 PROTOCOLO P_AID

O protocolo AID, visto na Seção 2.3.3, será a base para o protocolo proposto neste trabalho, chamado *Position-based Adaptive Approach for Information Dissemination* (P_AID). O AID encaminha as mensagens através de uma comunicação *broadcast* controlada, a qual considera o número de cópias de uma mesma mensagem que cada nó veicular recebe em um determinado período de tempo para decidir se este nó deve colaborar ou não com a disseminação de uma informação. Com o intuito de minimizar o atraso médio na entrega de mensagens, o protocolo P_AID faz uso dessa mesma técnica empregada pelo AID, porém ele considera também a posição geográfica do nó destino. Com isso, é possível reduzir consideravelmente o número de mensagens replicadas na rede, já que não serão enviadas mensagens para todas as direções, mas apenas para a direção do nó destino de cada mensagem.

Pacotes *beacon* são enviados periodicamente para compartilhar a posição entre os nós. Com essa informação, é possível determinar quais nós estão mais próximos do destino e, assim, encaminhar a mensagem apenas para eles. A lista de vizinhos é atualizada constantemente por meio da troca de mensagens entre os nós, permitindo que a rede se adapte a mudanças na topologia e à disponibilidade dos nós.

Para uma melhor compreensão do funcionamento do P_AID, o Algoritmo 2 demonstra como o nó i decide se uma mensagem M deve ser encaminhada ou não para um vizinho j .

Inicialmente, o nó i verifica se o nó destino d está no seu alcance (linha 4 do Algoritmo 2). Se estiver, é possível realizar a entrega da mensagem M diretamente (linha 5). Entretanto, ao verificar que precisará realizar mais saltos para entregar M , o nó i executará o algoritmo do protocolo AID apenas para decidir se M deverá ou não ser encaminhada (linha 7), conforme o Algoritmo 1 detalhado na Seção 2.3.3.

Para iniciar esse roteamento de múltiplos saltos, o P_AID verifica se a via onde se encontra o nó origem i está esparsa ou densa. Essa densidade das vias é obtida através da análise do número de veículos vizinhos j que estiverem mais próximos de d do que i (linhas 10 a 15). Isto é, quando a distância entre j e d ($dis(j,d)$) for menor que a distância entre i e d ($dis(i,d)$), adiciona-se j na lista de melhores vizinhos de i (linha 13). Considera-se a via como densa, se esse número de melhores vizinhos for maior que α (linha 16). Caso contrário, considera-se a via como esparsa (linha 23).

Se a via estiver densa, é utilizada uma técnica gulosa (*Greedy*) na escolha dos vizinhos para enviar a mensagem M (linhas 16 a 22). Para economizar a largura de banda na rede, a mensagem M será encaminhada apenas para um percentual (ϕ) desses veículos vizinhos j (linhas 20 a 22). Vale ressaltar que caso a frequência do envio dos pacotes *beacon* seja baixa, as localizações dos nós j podem ficar desatualizadas na lista de vizinhos de i e pode ocorrer destes estarem com uma distância maior para d do que o veículo i .

Se a via estiver esparsa, a mensagem M será enviada para todos os veículos j da lista de vizinhos de i que estiverem com uma distância menor para o nó destino d (linhas 25 a 27), com isso é possível garantir uma maior confiabilidade na entrega da mensagem.

Para os próximos saltos até encontrar o nó destino, cada veículo que recebe uma nova mensagem realizará o mesmo processo.

Algoritmo 2 Protocolo P_AID

```

1:  $M \leftarrow mensagemRecebida$ 
2:  $\phi \leftarrow percentualVizinhosEscolhidos$  // Percentual de vizinhos  $j$  escolhidos para encaminhar  $M$ 
3:  $\alpha \leftarrow numeroVizinhosViaDensa$  // Número de vizinhos para considerar via como densa

4: se  $d \in listaVizinhos$  então
5:   Envia  $M$  para  $d$ 
6: senão,
7:   Verifica o número de cópias de  $M$  recebidas no período de tempo  $x$  seguindo o protocolo AID visto no Algoritmo 1

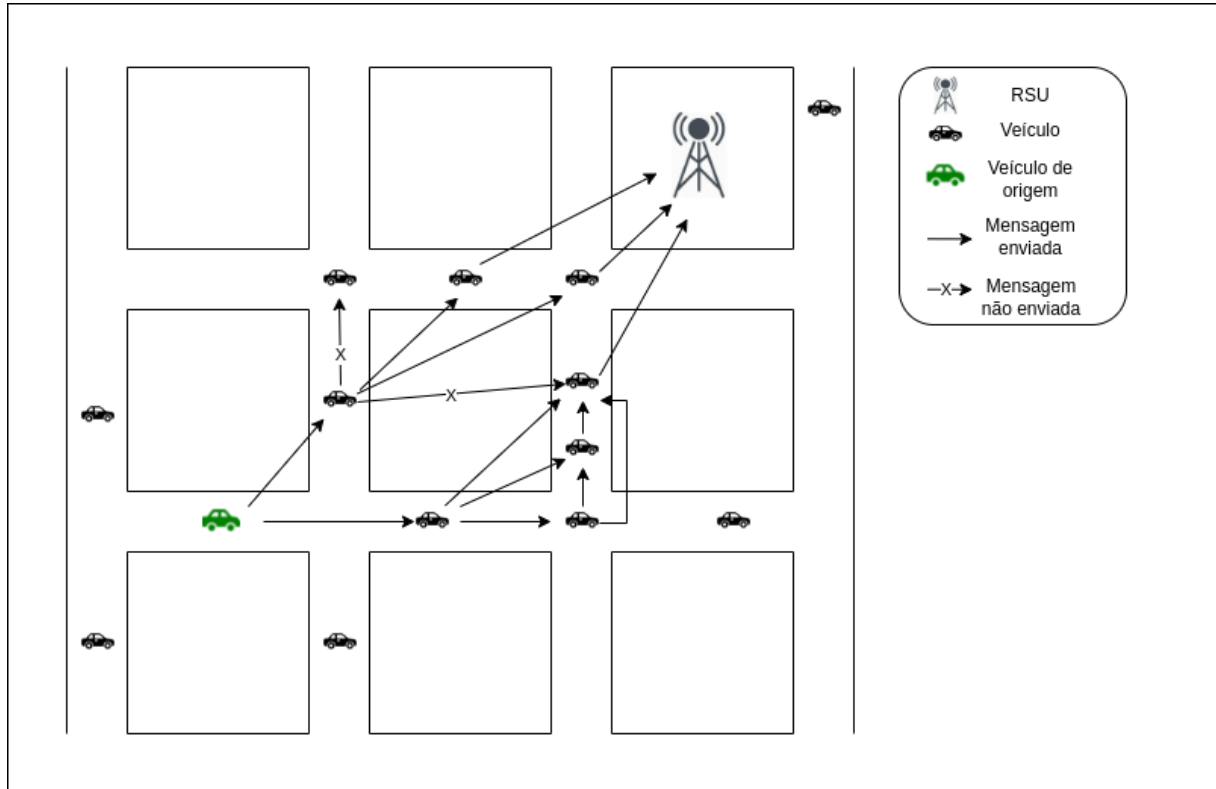
8:   se  $M$  deve ser encaminhada então
9:      $dis(i,d) \leftarrow distanciaVeiculoAtualParaDestino$  // Distância do veículo atual  $i$  até o destino  $d$ 
10:    para  $j \in listaVizinhos$  faça
11:       $dis(j,d) \leftarrow distanciaVeiculoVizinhoParaDestino$  // Distância do veículo vizinho  $j$  até o destino  $d$ 
12:      se  $dis(j,d) < dis(i,d)$  então
13:         $listaMelhoresVizinhos.adiciona(j)$ 
14:      finaliza se
15:    finaliza para
16:    se  $listaMelhoresVizinhos.tamanho > \alpha$  então
17:      // Via densa
18:       $V \leftarrow ordenaEmOrdemCrescente(listaMelhoresVizinhos)$ 
19:       $melhoresV \leftarrow percentual \phi$  de  $V$ 
20:      para  $j \in melhoresV$  faça
21:        Envia  $M$  para  $j$ 
22:      finaliza para
23:    senão,
24:      // Via esparsa
25:      para  $j \in listaMelhoresVizinhos$  faça
26:        Envia  $M$  para  $j$ 
27:      finaliza para
28:    finaliza se
29:  senão,
30:    Descarta  $M$ 
31:  finaliza se
32: finaliza se

```

A Figura 2 ilustra o funcionamento do protocolo P_AID. Pode-se observar que o veículo destacado em verde envia uma mensagem para um destino, que nesse caso é uma RSU, por meio de roteamento múltiplos saltos. Para isso, a mensagem é encaminhada apenas para aqueles veículos que estão mais perto da RSU destino. É possível observar que as setas de-

marcadas com 'X' indicam mensagens que poderiam ser enviadas, mas seguindo o protocolo, foi decidido pelo não encaminhamento.

Figura 2 – Representação do protocolo P_AID.



Fonte: Autoria própria (2023).

O próximo capítulo detalha o ambiente de simulação criado para avaliar o desempenho dos protocolos AID e P_AID.

4 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Este capítulo apresenta o funcionamento de um simulador de redes de comunicação veicular, o ambiente de simulação criado e os parâmetros configurados para cada cenário, de modo a avaliar o desempenho dos protocolos P_AID e AID. São também detalhadas as métricas de desempenho adotadas para a avaliação dos resultados.

4.1 Simulador Veins

O *The open source vehicular network simulation framework* (Veins) é um simulador de código aberto apresentado por Sommer *et al.* (2019) para executar simulação de redes veiculares. O Veins permite a simulação realista de ITS e comunicação veicular (V2X). Para isso, é incluído um sofisticado modelo do IEEE 802.11 para a camada MAC. É baseado no simulador de rede OMNeT++ (VARGA; HORNIG, 2010) e no software de simulação de mobilidade SUMO (BEHRISCH *et al.*, 2011), que juntos permitem a simulação de veículos, estradas e redes de comunicação.

O *Simulation of Urban MObility* (SUMO) é um software de simulação de tráfego urbano. Ele é usado para modelar e simular o comportamento do tráfego urbano em áreas urbanas. É possível criar modelos de redes rodoviárias, incluindo pistas, interseções, semáforos e outros elementos importantes do tráfego urbano. O software também inclui modelos para veículos e pedestres, permitindo que os usuários simulem o comportamento de ambos na rede rodoviária.

O *Objective Modular Network Testbed in C++* (OMNeT++) é uma ferramenta de simulação de rede de código aberto e gratuita, usada principalmente para modelar e simular redes de comunicação, sistemas de transporte e sistemas distribuídos. Ele é escrito em C++ e seu objetivo é fornecer um ambiente de simulação flexível e extensível que permita aos usuários criar modelos detalhados e precisos de sistemas de comunicação complexos.

A integração entre o SUMO e o OMNeT++ é feita pelo Veins, então, sempre que o SUMO simula a entrada de um nó veicular, o Veins cria um módulo de simulação dedicado no OMNeT++. Com isso, à medida que esse nó se move no SUMO, o Veins mantém o módulo correspondente do OMNeT++ atualizado em relação à sua posição, direção e velocidade. Da mesma forma, quando o SUMO simula a chegada do nó veicular ao seu destino, o Veins remove o módulo correspondente do OMNeT++ da simulação. Dessa forma, o Veins acopla a mobilidade do nó no OMNeT++ à do SUMO.

4.2 Parâmetros de simulação

Com o simulador Veins, é possível realizar simulações usando mapas do mundo real. Para o presente trabalho, foi selecionada a região central de Curitiba-PR, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Simulação de uma rede veicular na cidade de Curitiba-PR usando o simulador Veins.



Fonte: Autoria própria (2023).

Foi configurada uma área de simulação de 2000 m x 2000 m, com quatro RSUs dispostas estrategicamente com um raio de alcance máximo de 350 m cada. As RSUs possuem localizações fixas que são conhecidas pelos veículos. Seis fluxos de veículos foram adicionados à simulação, cada um com pontos de partida e chegada diferentes. O número total de veículos nas simulações foi variado em 50, 100, 150 e 200. Embora o protocolo AID tenha sido projetado com o intuito de disseminar dados para todos os nós da rede, no presente trabalho tem-se como foco o envio de mensagens para um único destino. Um grupo específico de veículos são considerados nós origens e, portanto, enviam mensagens com uma frequência constante para um nó destino escolhido aleatoriamente, o qual, no presente trabalho, é uma das quatro RSUs. Em aplicações de ITS e *offloading* de dados para a computação em névoa, a seleção da RSU se dá pela sua proximidade (área de cobertura) e capacidade de processamento (considerando tarefas que já podem estar em processamento). Se a RSU selecionada estiver dentro do raio de cobertura do veículo, a mensagem é enviada diretamente. Caso contrário, a transmissão será feita via V2V. Também é estabelecido um tempo de vida, do inglês *Time To Live* (TTL), de 200 milissegundos para as mensagens. Como no trabalho de Junior (2016), as simulações são realizadas por 600 segundos. Os valores de ϕ , α , x e da frequência de envio dos *beacons* foram definidos empiricamente como 30%, 5 veículos, 50 milissegundos e 5 segundos, respectivamente. Todos os resultados apresentados são a média de 15 simulações com se-

mentos (*seeds*) distintas. Também variou-se o tamanho do *buffer* dos nós em 50, 100, 150 e 200 mensagens.

Para atualizar a lista de vizinhos, estabeleceu-se que, caso o nó i não receba um *beacon* de um vizinho j em dois intervalos de tempo consecutivos (ou seja, 10 segundos), o nó vizinho j será removido da lista. Isso significa que não será mais possível enviar pacotes diretamente entre esses veículos i e j .

A tabela 1 resume os parâmetros configurados para as simulações.

Tabela 1 – Parâmetros da simulação.

Parâmetros	Valores
Simulador	Veins
Protocolo de roteamento	AID, P_AID
Área de simulação	2000 m X 2000 m
Número de veículos	50, 100, 150, 200
Número de RSUs	4
Raio de alcance das RSUs	350 m
Raio de alcance dos veículos	350 m
Tamanho do buffer	50, 100, 150, 200 mensagens
Tempo de simulação	600 s
Especificação da camada PHY/MAC	IEEE 802.11p
Frequência de envio de <i>beacons</i>	5 s
Tempo para espera de <i>beacons</i> de cada vizinho j antes de atualizar a lista de vizinhos	10 s
(ϕ)	30%
(α)	5
(x)	50 ms
TTL	200 ms

4.3 Métricas de desempenho

Os protocolos AID e P_AID são avaliados com base nas seguintes métricas de desempenho:

- **Percentual de mensagens entregues:** razão do número de mensagens entregues aos destinos pelo número de mensagens encaminhadas pelos emissores;
- **Atraso:** tempo médio necessário para entrega das mensagens;
- **Razão de redundância:** razão da diferença entre as mensagens replicadas e as mensagens entregues, pelas mensagens entregues. Essa métrica é utilizada para medir a eficácia do protocolo em entregar mensagens aos destinos, levando em consideração o número de mensagens replicadas na rede. Uma alta razão de redundância indica que muitas mensagens estão sendo replicadas, mas poucas estão sendo entregues, o que pode levar a um aumento da sobrecarga de rede e ao consumo desnecessário de

recursos. Por outro lado, uma razão baixa indica que poucas mensagens estão sendo replicadas e a maioria está sendo entregue com sucesso, o que é um indicativo de eficiência e eficácia do protocolo.

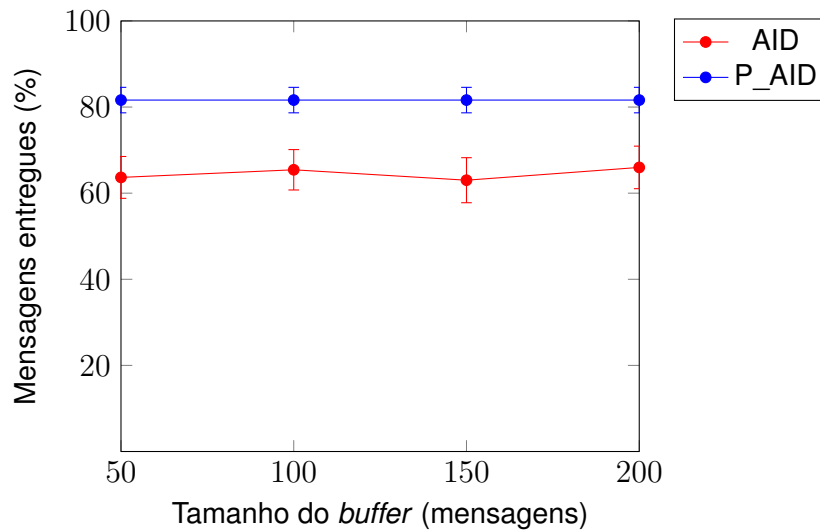
O capítulo seguinte apresenta e analisa os resultados obtidos pelos protocolos AID e P_AID.

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos em cada simulação com os protocolos AID e o P_AID.

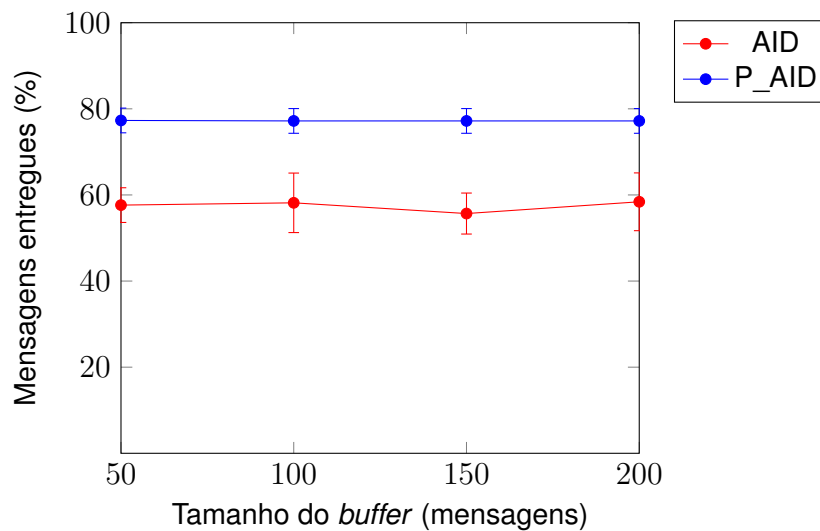
As Figuras 4, 5, 6 e 7 apresentam o percentual de mensagens entregues variando o tamanho do *buffer* dos veículos considerando um tráfego 50, 100, 150 e 200 veículos, respectivamente.

Figura 4 – Percentual de mensagens entregues para 50 veículos.



Fonte: Autoria própria (2023).

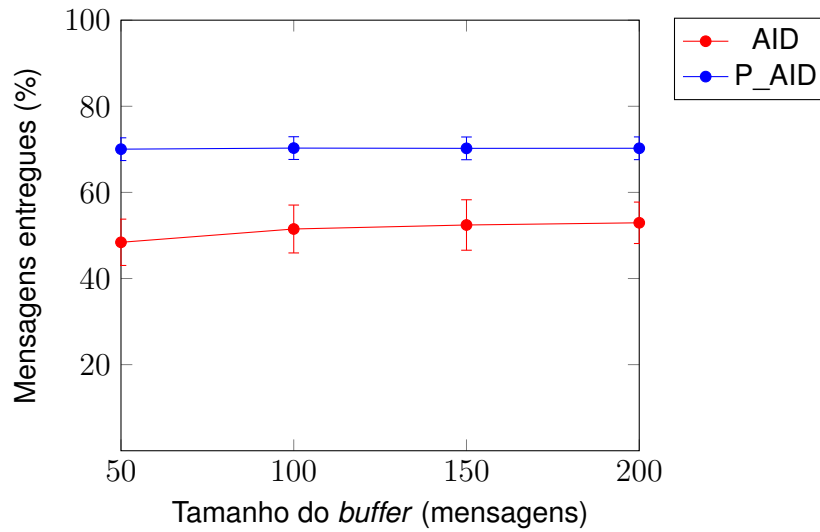
Figura 5 – Percentual de mensagens entregues para 100 veículos.



Fonte: Autoria própria (2023).

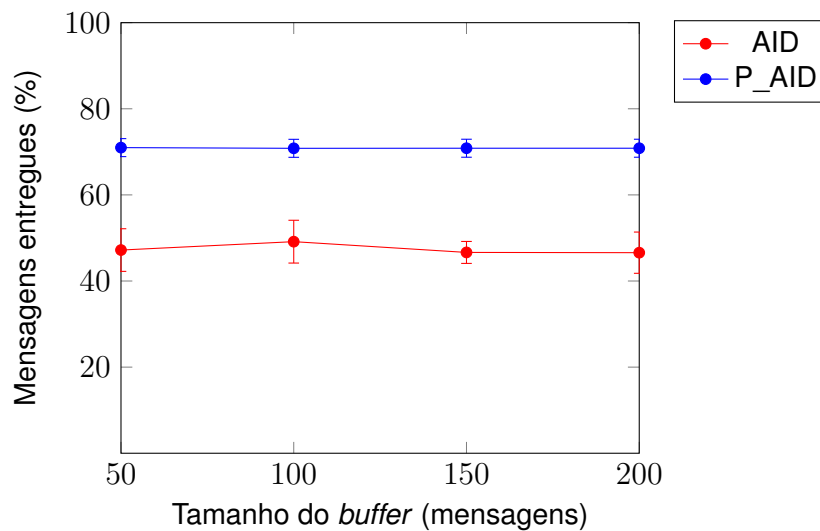
Em todos os cenários simulados, o protocolo P_AID apresentou um maior percentual de entrega de mensagens se comparado ao AID. Por exemplo, no cenário com 200 veículos e estes com um *buffer* de 200 mensagens, o protocolo P_AID apresentou um aumento de 21,64%

Figura 6 – Percentual de mensagens entregues para 150 veículos.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 7 – Percentual de mensagens entregues para 200 veículos.



Fonte: Autoria própria (2023).

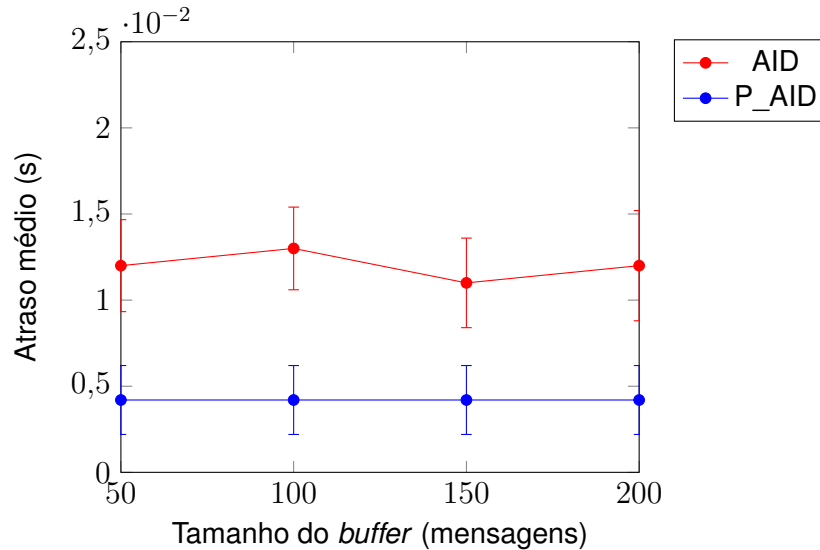
na entrega das mensagens em relação ao protocolo AID. Essa maior eficiência na entrega de mensagens do P_AID ocorreu porque o número de mensagens replicadas no protocolo AID foi consideravelmente maior em todos os cenários, o que ocasionou em uma lotação na capacidade do *buffer* dos veículos. Vale ressaltar que isso se deve ao tamanho limitado do *buffer* dos veículos. Se o tamanho dos *buffers* fosse ilimitado, o protocolo AID, por encaminhar um maior número de mensagens e em todas as direções, teria uma eficiência maior na entrega de mensagens.

É perceptível que, para os tamanhos de *buffer* simulados, o protocolo P_AID não apresentou alteração nos resultados, pois o número de mensagens replicadas na rede não sobrecarregou o *buffer* interno dos veículos. No entanto, com o protocolo AID, o percentual de mensagens entregues variou com o aumento no tamanho do *buffer* dos nós. Isso ocorreu porque,

com um *buffer* maior, os veículos puderam armazenar um maior número de mensagens para posterior retransmissão. No entanto, essa variação não ocorreu de maneira uniforme como se esperava. Um exemplo disso foi a diminuição no percentual de mensagens entregues ao aumentar o tamanho interno dos *buffers* de 100 para 150 mensagens ao considerar um tráfego de 50, 100 e 200 veículos.

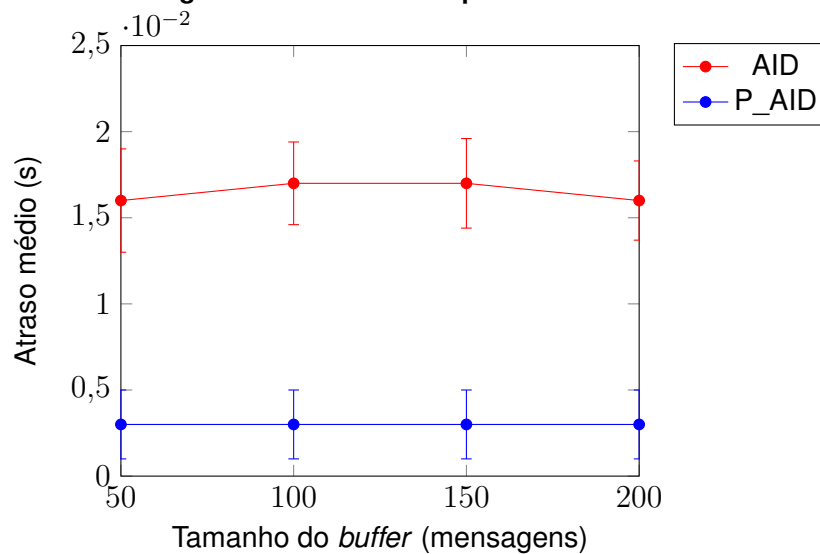
As Figuras 8, 9, 10 e 11 apresentam o atraso médio na entrega das mensagens variando o tamanho do *buffer* dos veículos considerando um tráfego de 50, 100, 150 e 200 veículos, respectivamente.

Figura 8 – Atraso médio para 50 veículos.



Fonte: Autoria própria (2023).

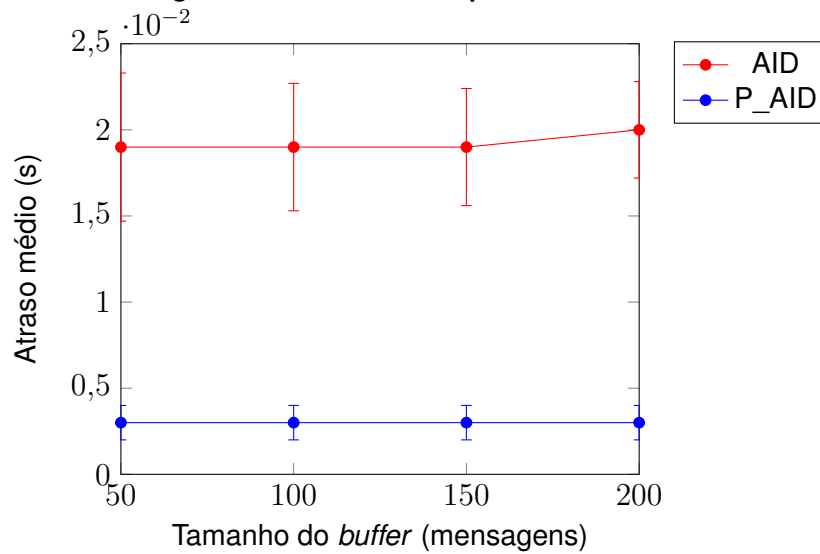
Figura 9 – Atraso médio para 100 veículos.



Fonte: Autoria própria (2023).

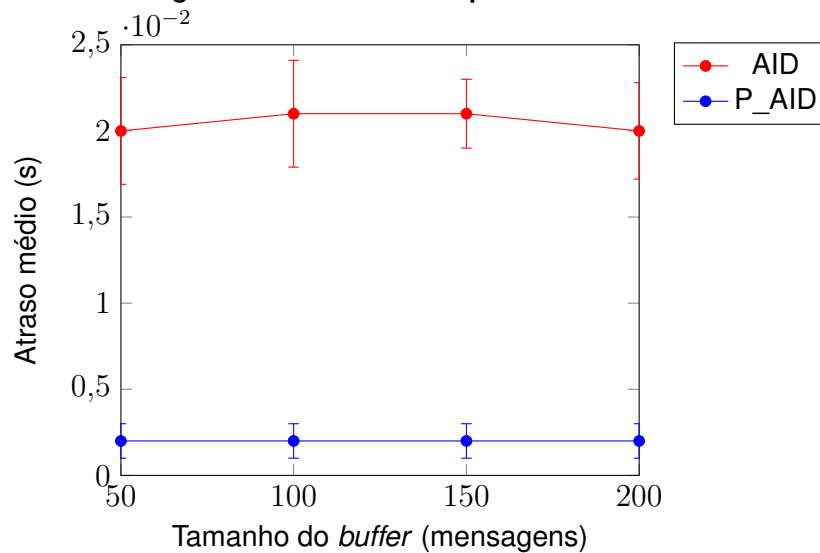
Em todos os cenários simulados, o protocolo P_AID apresentou um menor atraso na entrega das mensagens se comparado ao AID. Por exemplo, no cenário com 200 veículos e

Figura 10 – Atraso médio para 150 veículos.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 11 – Atraso médio para 200 veículos.

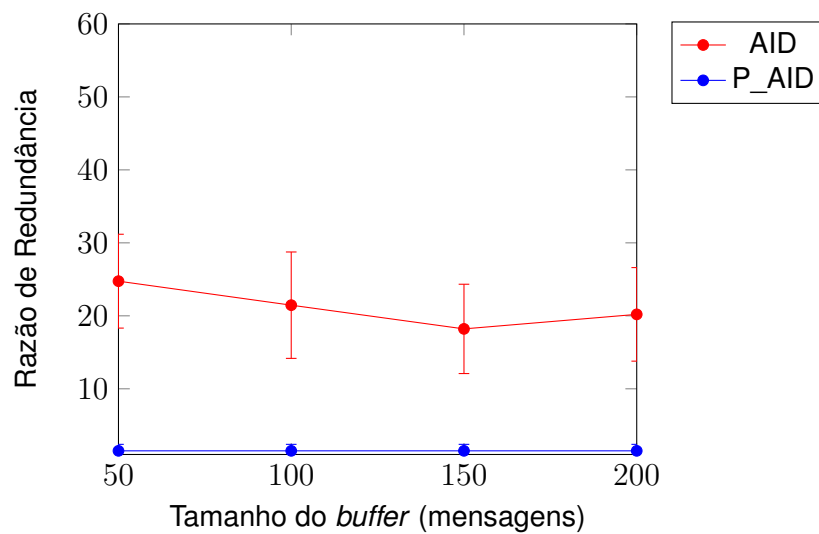


Fonte: Autoria própria (2023).

buffers de 200 mensagens, o protocolo P_AID teve um atraso médio 90% menor em comparação ao protocolo AID. Isso ocorreu por conta da maior eficiência do P_AID em relação ao encaminhamento das mensagens, resultando em um menor número de mensagens replicadas na rede e, por consequência, não ocasionando uma sobrecarga no *buffer* dos veículos e na rede. Quando uma mensagem é enviada em *broadcast* pelo AID, ela precisa ser processada por todos os nós na área de cobertura do nó emissor. Isso pode sobrecarregar a rede e causar atrasos no recebimento de mensagens. Em contraste, o P_AID encaminha mensagens apenas para nós que estão na direção do nó destino, reduzindo a sobrecarga da rede, já que apenas os nós mais relevantes precisam processar a mensagem.

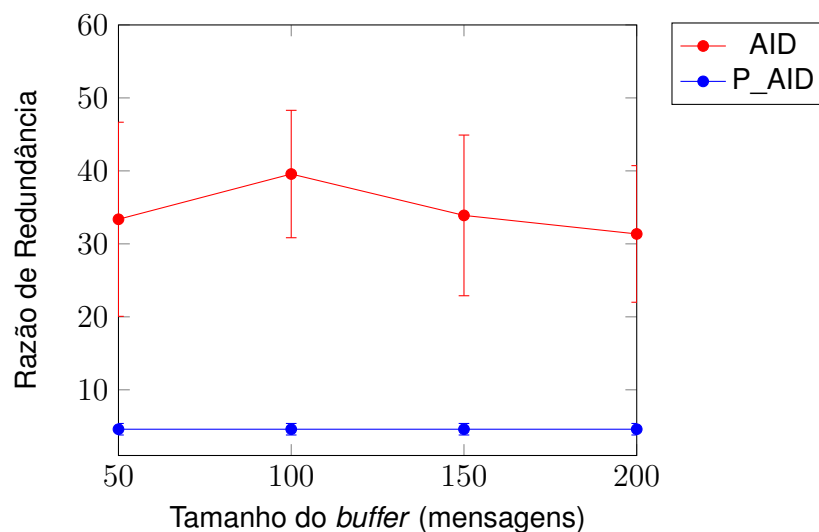
As Figuras 12, 13, 14 e 15 apresentam a razão de redundância de mensagens variando o tamanho do *buffer* dos veículos considerando um tráfego de 50, 100, 150 e 200 veículos, respectivamente. Nota-se que, em todos os cenários, o protocolo P_AID obteve uma significativa melhora na razão de redundância em relação ao AID. Isso indica que ao enviar as mensagens via V2V apenas para os nós mais próximos do destino reduz-se consideravelmente o número de mensagens replicadas, fazendo que a rede não seja sobrecarregada. Para exemplificar essa melhora, é possível notar que em um cenário com tamanho de *buffer* de 200 mensagens e um total de 200 veículos, houve uma redução de 79,1% na razão de redundância para o protocolo P_AID quando comparado ao protocolo AID.

Figura 12 – Razão de redundância para 50 veículos.



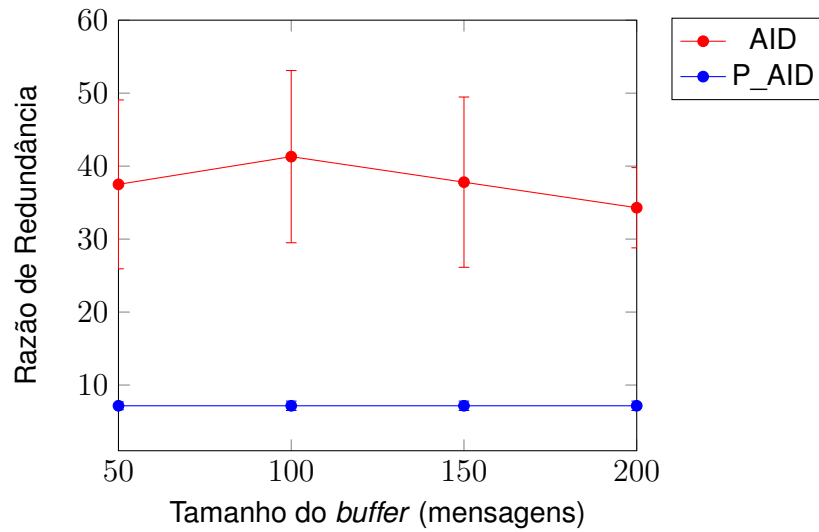
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 13 – Razão de redundância para 100 veículos.



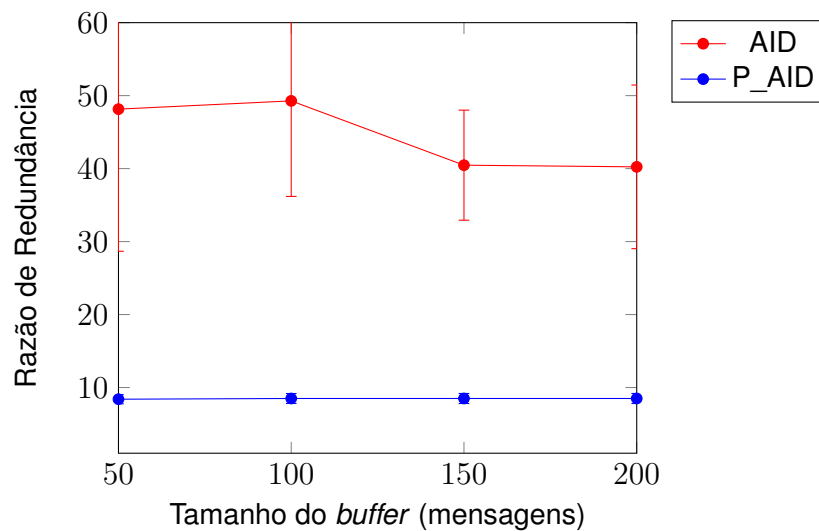
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 14 – Razão de redundância para 150 veículos.



Fonte: Autoria própria (2023).

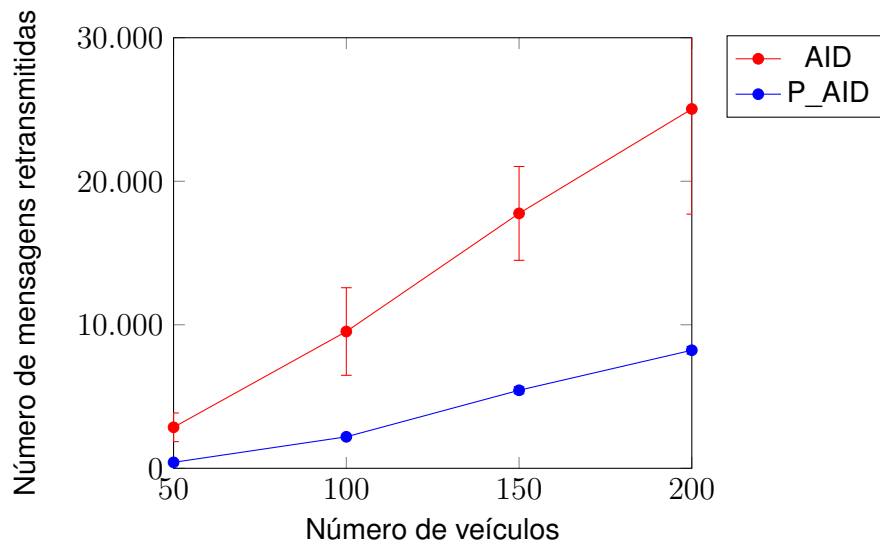
Figura 15 – Razão de redundância para 200 veículos.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 16 ilustra o comportamento dos protocolos AID e P_AID em relação ao número de mensagens replicadas conforme aumenta-se o tráfego na rede. Para essas simulações considerou-se um tamanho de *buffer* de 200 mensagens. O intuito é mostrar se o número de mensagens replicadas cresce linearmente com o aumento no número de veículos ou se os protocolos são capazes de restringir o encaminhamento de cópias de mensagens apenas para os melhores nós intermediários. Conforme pode-se observar, por conta do protocolo P_AID conseguir identificar redes densas (número elevado de veículos vizinhos) e enviar as mensagens apenas para um percentual dos veículos que estão na direção do nó destino, há um crescimento mais lento na curva do número de mensagens retransmitidas à medida que aumenta-se o número de veículos em comparação com o protocolo AID.

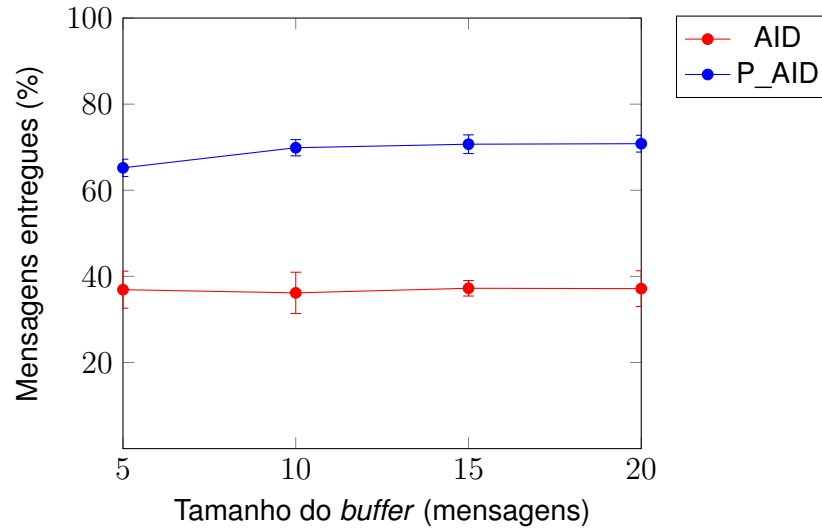
Figura 16 – Número de mensagens retransmitidas versus número de veículos.



Fonte: Autoria própria (2023).

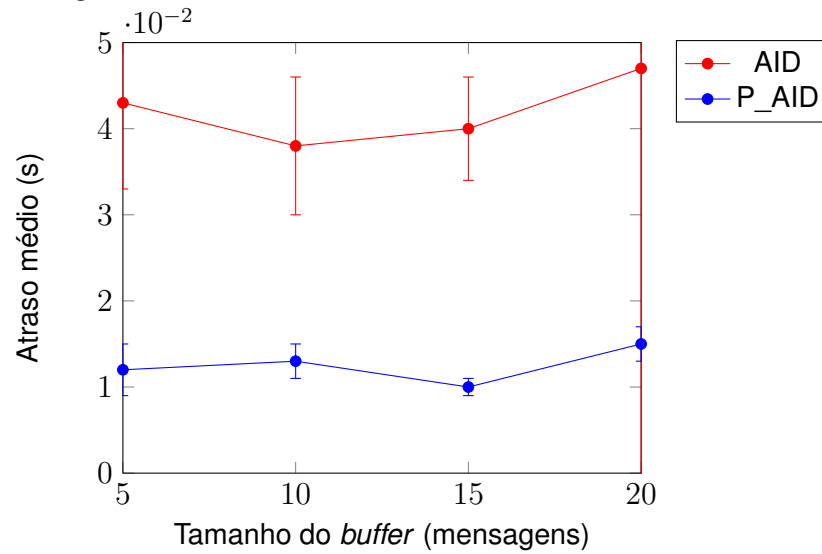
Como pode-se observar nos resultados das Figuras 4 a 15 não houve alterações nos resultados obtidos pelo protocolo P_AID devido à ausência de estouro (*overflow*) de *buffer* nos veículos para os tamanhos de *buffer* selecionados (50, 100, 150 e 200 mensagens). Então, foram realizadas novas simulações com tamanhos menores de *buffer* (5, 10, 15 e 20 mensagens) e no cenário com mais tráfego de veículos (200 veículos) para determinar o limite inferior no qual o protocolo P_AID não causa estouro de *buffer*. As Figuras 17, 18 e 19 apresentam os resultados obtidos para o percentual de mensagens entregues, atraso médio e razão de redundância, respectivamente. Pode-se observar que nas métricas percentual de mensagens entregues e razão de redundância não houve alteração nos resultados obtidos pelo protocolo P_AID a partir de um *buffer* de 15 mensagens. Porém, com *buffers* com capacidade menor que 15 mensagens, alguns tiveram sua capacidade máxima atingida e isso resultou em perda de mensagens. No entanto, é importante ressaltar que, mesmo com essa limitação no tamanho dos *buffers*, para todos os cenários, o protocolo P_AID apresentou um melhor desempenho que o protocolo AID em relação à taxa de entrega de mensagens, atraso médio na entrega e razão de redundância de mensagens.

Figura 17 – Percentual de mensagens entregues com tamanhos menores de *buffer*.



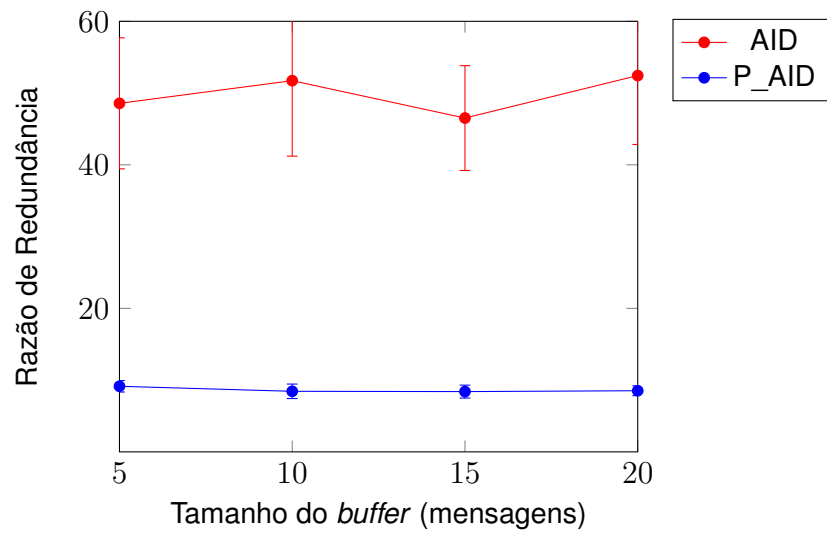
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 18 – Atraso médio com tamanhos menores de *buffer*.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 19 – Razão de redundância com tamanhos menores de *buffer*.



Fonte: Autoria própria (2023).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um novo protocolo de roteamento para VANETs, chamado P_AID, o qual é uma modificação do protocolo AID proposto por Bakhouya, Gaber e Lorenz (2011). O protocolo P_AID adiciona informações geográficas dos nós de modo a otimizar a transmissão, via V2V, enviando mensagens apenas para os veículos que estiverem mais próximos do nó destino de cada mensagem. Além disso, cada veículo pode detectar, em tempo real, a densidade de veículos nas vias próximas a ele, caracterizando as vias como densas ou esparsas com base no número de vizinhos que possui.

Para analisar se os objetivos do protocolo P_AID foram atendidos, criou-se um ambiente de simulação no simulador Veins com parte do mapa da cidade de Curitiba-PR, e adicionaram-se fluxos fixos de veículos com pontos de partidas e destinos distintos. Foram executadas simulações utilizando os protocolos AID e P_AID, variando o número de veículos na rede e o tamanho dos *buffers* dos veículos. Para avaliar o desempenho dos dois protocolos, foram empregadas três métricas: o percentual de mensagens entregues, atraso médio na entrega de mensagens e a razão de redundância de mensagens.

Os resultados obtidos mostraram que o P_AID obteve desempenho melhor que o AID em todos os cenários de simulação e em todas as métricas de desempenho analisadas. Como exemplo, considerando um cenário com 200 veículos que possuem um tamanho de *buffer* de 200 mensagens, o P_AID foi capaz de entregar 21,64% a mais de mensagens, com um atraso 90% menor e com uma razão de redundância 79,1% menor se comparado ao protocolo AID.

Uma limitação do protocolo P_AID em relação ao AID é a necessidade dos veículos serem equipados com GPS para poderem trocar informações de posições por meio dos pacotes de *beacon*. Porém, é de se esperar que veículos inteligentes em redes veiculares possuam essa tecnologia para uma boa operação das funcionalidades requeridas por esse tipo de infraestrutura.

Como trabalhos futuros, pretende-se analisar outras informações importantes a serem capturadas sobre os veículos em sistema de transporte inteligente de modo a melhorar o desempenho do protocolo P_AID, realizar o ajuste dos parâmetros de forma adaptativa e comparar o desempenho do P_AID com outros protocolos existentes. Além disso, pretende-se avaliar o uso do protocolo P_AID em variados cenários de *offloading* de dados para a computação em névoa com o suporte de redes veiculares e ITS.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. *et al.* Rodoge: Protocolo de disseminação de mensagens de alerta de acidentes com regras e controles de reenvio. *In: Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 266–279. ISSN 2177-9384. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/7365>.
- ATLAM, H. F.; WALTERS, R. J.; WILLS, G. B. Fog computing and the internet of things: A review. **Big Data and Cognitive Computing**, v. 2, n. 2, 2018. ISSN 2504-2289. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-2289/2/2/10>.
- BAKHOUYA, M.; GABER, J.; LORENZ, P. An adaptive approach for information dissemination in vehicular ad hoc networks. **Journal of Network and Computer Applications**, Elsevier, v. 34, n. 6, p. 1971–1978, 2011.
- BASAGNI, S. *et al.* A distance routing effect algorithm for mobility (dream). *In: Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 76–84.
- BEHRISCH, M. *et al.* Sumo—simulation of urban mobility: an overview. *In: Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 63–68.
- CUNHA, F. *et al.* Data communication in vanets: Protocols, applications and challenges. **Ad Hoc Networks**, Elsevier, v. 44, p. 90–103, 2016.
- FASOLO, E.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. An effective broadcast scheme for alert message propagation in vehicular ad hoc networks. *In: 2006 IEEE International Conference on Communications*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 9, p. 3960 – 3965.
- GILLANI, M. *et al.* Data collection protocols for vanets: a survey. **Complex & Intelligent Systems**, v. 8, p. 2593–2622, 2022. ISSN 2199-4536.
- HAAS, Z. J.; PEARLMAN, M. R. The performance of query control schemes for the zone routing protocol. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, ACM New York, NY, USA, v. 28, n. 4, p. 167–177, 1998.
- HAMDI, M. M. *et al.* A survey on data dissemination and routing protocol in vanet: Types, challenges, opportunistic and future role. **International Journal of Advanced Science and Technology**, v. 29, n. 05, p. 6473–6482, May 2020. Disponível em: <http://sersc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/15966>.
- HARTENSTEIN, H.; LABERTEAUX, L. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. **IEEE Communications magazine**, IEEE, v. 46, n. 6, p. 164–171, 2008.
- HUANG, C.; LU, R.; CHOO, K.-K. R. Vehicular fog computing: Architecture, use case, and security and forensic challenges. **IEEE Communications Magazine**, v. 55, n. 11, p. 105–111, 2017.
- HUSSAIN, R.; ZEADALLY, S. Autonomous cars: Research results, issues, and future challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 21, n. 2, p. 1275–1313, 2018.
- JACQUET, P. *et al.* Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. *In: Proceedings of the IEEE International Multi Topic Conference 2001*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 62–68.

- JOHNSON, D. B. *et al.* Dsr: The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks. **Ad hoc networking**, v. 5, n. 1, p. 139–172, 2001.
- JOSHI, H. P.; SICHITIU, M. L.; KIHL, M. Distributed robust geocast multicast routing for inter-vehicle communication. *In: Proceedings of WEIRD workshop on WiMax, Wireless and Mobility, 2007*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 9–21.
- JUNIOR, J. A. **Estratégias para aumentar a conectividade e o desempenho das VANETs: infraestrutura baseada no transporte coletivo e protocolos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- KARP, B.; KUNG, H.-T. Gpsr: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. *In: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.: s.n.], 2000. p. 243–254.
- KORKMAZ, G. *et al.* Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems. *In: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 76–85.
- MOITE, S. How smart can a car be? *In: Proceedings of the Intelligent Vehicles '92 Symposium*. [S.l.: s.n.], 1992. p. 277–279.
- NAJAFZADEH, S. *et al.* Dynamic broadcasting in vehicular ad hoc networks. **International Journal of Computer Theory and Engineering**, IACSIT Press, v. 5, n. 4, p. 629–632, 2013.
- NING, Z. *et al.* Intelligent edge computing in internet of vehicles: A joint computation offloading and caching solution. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 22, n. 4, p. 2212–2225, 2021.
- SINGH, S.; AGRAWAL, S. Vanet routing protocols: Issues and challenges. *In: 2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5.
- SOARES, R. B. **Um protocolo de disseminação de dados adaptativo para redes veiculares**. 2014. Dissertação (Mestrado em Computação) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
- SOMMER, C. *et al.* Veins: The open source vehicular network simulation framework. **Recent Advances in Network Simulation: The OMNeT++ Environment and its Ecosystem**, Springer, p. 215–252, 2019.
- SONG, T. *et al.* A cluster-based directional routing protocol in vanet. *In: 12th IEEE International Conference on Communication Technology*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1172 – 1175.
- STATISTA. **Projected number of autonomous cars globally from 2019 to 2024**. 2021. Acesso em: 28 out. 2021. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1230664/projected-number-autonomous-cars-worldwide/>.
- ULLAH, A. *et al.* Advances in position based routing towards its enabled fog-oriented vanet—a survey. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 21, n. 2, p. 828–840, 2020.
- VARGA, A.; HORNIG, R. An overview of the omnet++ simulation environment. *In: 1st International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems*. [S.l.]: ICST, 2010. p. 1–10.

YEFERNY, T.; HAMAD, S. Vehicular ad-hoc networks: Architecture, applications and challenges. **International Journal of Computer Science and Network Security**, v. 20, n. 2, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2101.04539>.

YOUSEFI, S.; MOUSAVI, M. S.; FATHY, M. Vehicular ad hoc networks (vanets): Challenges and perspectives. *In: 2006 6th International Conference on ITS Telecommunications*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 761–766.

ZEADALLY, S. *et al.* Vehicular ad hoc networks (vanets): status, results, and challenges. **Telecommunication Systems**, Springer, v. 50, n. 4, p. 217–241, 2012.