

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Informática

Efrem Eladie de Oliveira Lousada

**UMA ABORDAGEM PARA *OFFLOADING* EM REDES
VEICULARES CONSIDERANDO MÚLTIPLOS SALTOS EM UM
CENÁRIO DE SOBREPOSIÇÃO DE RSU**

Belo Horizonte

2024

Efrem Eladie de Oliveira Lousada

**UMA ABORDAGEM PARA *OFFLOADING* EM REDES
VEICULARES CONSIDERANDO MÚLTIPLOS SALTOS EM UM
CENÁRIO DE SOBREPOSIÇÃO DE RSU**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática como requisito para o Grau de Doutor em Informática pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Orientadora: Prof. Dra. Fátima
de Lima Procópio Duarte
Figueiredo

Belo Horizonte

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

L892a	Lousada, Efrem Eladie de Oliveira Uma abordagem para <i>offloading</i> em redes veiculares considerando múltiplos saltos em um cenário de sobreposição de RSU / Efrem Eladie de Oliveira Lousada. Belo Horizonte, 2024. 102 f. : il. Orientadora: Fátima de Lima Procópio Duarte Figueiredo Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Informática 1. Protocolo de aplicação sem fio (Protocolo de rede de computador). 2. Sistemas inteligentes de veículos rodoviários. 3. Sistemas de comunicação móvel. 4. Sistemas de transmissão de dados. 5. Algoritmos computacionais. 6. Levantamentos de rotas. 7. Redes de sensores. 8. Processamento de sinal. I. Figueiredo, Fátima de Lima Procópio Duarte. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Informática. III. Título. SIB PUC MINAS CDU: 681.3.01:621.39
-------	---

Efrem Eladie de Oliveira Lousada

**UMA ABORDAGEM PARA *OFFLOADING* EM REDES
VEICULARES CONSIDERANDO MÚLTIPLOS SALTOS EM UM
CENÁRIO DE SOBREPOSIÇÃO DE RSU**

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Informática como
requisito para o Grau de Doutor em
Informática pela Pontifícia Universidade
Católica de Minas Gerais.

Prof. Dr. Silvio Jamil Ferzoli Guimarães – PUC Minas, representando a
Prof. Dra. Fátima de Lima Procópio Duarte-Figueiredo – PUC Minas
(Orientadora)

Prof. Dr. Robson Eduardo De Grande – Brock University
(Banca Examinadora)

Prof. Dr. Henrique Cota de Freitas – PUC Minas
(Banca Examinadora)

Prof. Dr. Luis Enrique Zárate Gálvez – PUC Minas
(Banca Examinadora)

Prof. Dr. Antônio Alfredo Ferreira Loureiro – UFMG
(Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 13 de Dezembro de 2024.

*Para meu filho, irmãos e pais,
razões da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de realizar esse trabalho.

Ao meu filho Lucas, razão das minhas horas mais agradáveis.

Aos meus pais Éfrem e Graça pelos ensinamentos!

Aos meus irmãos pela amizade!

Aos colegas de mestrado e agora doutorado pelas várias horas de estudo dedicadas.

Ao colegiado e coordenação do curso que souberam compreender as dificuldades que passei durante esta primeira etapa.

À Giovana pelo carinho e direcionamentos.

À CAPES, PUC Minas e IFMG pelo apoio financeiro e liberação de horas para afastamento parcial das atividades.

À minha orientadora de mestrado Raquel pelo apoio a iniciar essa caminhada.

À minha orientadora de doutorado Fátima pelo incondicional apoio nos momentos mais difíceis dessa caminhada.

*“A good decision is based on knowledge and
not on numbers.”*

Plato

ABSTRACT

In the last decade, notable modifications in the vehicles enhanced the growing interest in Vehicular Ad hoc Networks (VANETS). The road safety concerns and the network congestion reduction have motivated the development of the Intelligent Transport Systems (ITS). Finding the optimal vehicle route avoiding network congestion can guarantee quality of service and a good user experience. In order to resolve these intentions, the proposed work makes use of the Predicted Energetic multi-hop multi-RSU (PE-MHMR) for enhanced vehicular networking and communication. It is based on an efficient transfer from the base node to the destination node, via the shortest and energy efficient path for viable and reliable vehicular communications. The novelty is the use of complex networks to select the algorithm parameters. The metrics used were energy, throughput, delay, packet delivery ratio, accuracy, precision and also the recall values. The overall performance of the proposed model was evaluated. Simulation results show that more efficient routes can be calculated using the proposed algorithm.

Keywords: Offloading, VANETs, Broadcast Storm and 5G.

RESUMO

Na última década, modificações significativas nos veículos aumentaram o interesse crescente nas Redes Ad hoc Veiculares (VANETs). As preocupações com a segurança viária e a redução da congestão da rede motivaram o desenvolvimento dos Sistemas de Transporte Inteligente (ITS). Encontrar a rota ideal para os veículos, evitando a congestão da rede, pode garantir qualidade de serviço e uma boa experiência para o usuário. Para atingir esses objetivos, o trabalho proposto utiliza o modelo Predicted Energetic multi-hop multi-RSU (PE-MHMR) para aprimorar a comunicação e o networking veicular. Esse modelo se baseia em uma transferência eficiente do nó de origem para o nó de destino, através do caminho mais curto e energeticamente eficiente, garantindo comunicações veiculares viáveis e confiáveis. A novidade do estudo está na utilização de redes complexas para a seleção dos parâmetros do algoritmo. As métricas utilizadas foram consumo de energia, vazão (throughput), atraso, taxa de entrega de pacotes, acurácia, precisão e valores de revocação (recall). O desempenho geral do modelo proposto foi avaliado e os resultados das simulações demonstram que rotas mais eficientes podem ser calculadas utilizando o algoritmo sugerido.

Palavras Chave: Offloading, Redes Veiculares, Tempestade de Broadcast e 5G.

LISTA DE FIGURAS

FIGURE 1 – Sistema de comunicação V2X	21
FIGURE 2 – Ambiente com MUltiplas RSU.....	23
FIGURE 3 – Arquitetura 5G-VANET em combinação com SDN	42
FIGURE 4 – Diagrama funcional da solução proposta	60
FIGURE 5 – Cenário simulado.	77
FIGURE 6 – Modelo de sistema para a metodologia proposta	78
FIGURE 7 – Seleção de nós pelo PE-MHMR.....	79
FIGURE 8 – Caminho de roteamento pelo PE-MHMR	79
FIGURE 9 – Taxa de entrega	81
FIGURE 10 – Número de transmissões	82
FIGURE 11 – Taxa de redundância	83
FIGURE 12 – Taxa de Perda de Dados <i>10-hop</i>	84
FIGURE 13 – Taxa de Perda de Dados <i>8-hop</i>	84
FIGURE 14 – Taxa de Perda de Dados <i>4-hop</i>	85
FIGURE 15 – Taxa de Perda de Dados <i>2-hop</i>	85
FIGURE 16 – Fração de Descarregamento de Dados <i>10-hop</i>	86
FIGURE 17 – Fração de Descarregamento de Dados <i>8-hop</i>	87
FIGURE 18 – Fração de Descarregamento de Dados <i>4-hop</i>	87
FIGURE 19 – Fração de Descarregamento de Dados <i>2-hop</i>	88
FIGURE 20 – Fração de Descarregamento de Dados Bem-Sucedida <i>10-hop</i>	89
FIGURE 21 – Fração de Descarregamento de Dados Bem-Sucedida <i>8-hop</i>	89
FIGURE 22 – Fração de Descarregamento de Dados Bem-Sucedida <i>4-hop</i>	90
FIGURE 23 – Fração de Descarregamento de Dados Bem-Sucedida <i>2-hop</i>	90

FIGURE 24 – Número de sessões de descarregamento de dados <i>10-hop</i>	91
FIGURE 25 – Número de sessões de descarregamento de dados <i>8-hop</i>	91
FIGURE 26 – Número de sessões de descarregamento de dados <i>4-hop</i>	92
FIGURE 27 – Número de sessões de descarregamento de dados <i>2-hop</i>	92

LISTA DE TABELAS

TABLE 1 – Protocolos de <i>Broadcast</i>	50
TABLE 2 – Variáveis da Função de Qualidade.....	63
TABLE 3 – Parâmetros de simulação	77
TABLE 4 – Parâmetros usados no ambiente de simulação	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

D2D – Dispositivo a Dispositivo

FinTech – Tecnologia Financeira

IoT – Internet das Coisas

IoV – Internet dos Veículos

M2M – Máquina a Máquina

V2I – *Vehicle-to-Road Infrastructure*

V2N – *Vehicle-to-Network*

V2P – *Vehicle-to-Pedestrian*

V2V – *Vehicle-to-Vehicle*

V2X – *Vehicle-to-Everything*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Motivação	22
1.2	Objetivos	23
1.3	Publicações	25
1.4	Estrutura do texto	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TRABALHOS RELACIONADOS	27
2.1	Redes Veiculares Ad-Hoc - VANETs	27
2.1.1	<i>Introdução</i>	<i>27</i>
2.1.2	<i>Fundamentos de VANETs</i>	<i>28</i>
2.1.2.1	<u>Protocolos de Roteamento em VANETs</u>	<u>30</u>
2.1.2.2	<u>Técnicas de Comunicação e Transmissão de Dados</u>	<u>31</u>
2.1.2.3	<u>Desafios em Comunicação</u>	<u>32</u>
2.1.2.4	<u>Aplicações de VANETs</u>	<u>33</u>
2.2	Offloading	34
2.2.1	<i>Introdução</i>	<i>34</i>
2.2.2	<i>Importância do offloading</i>	<i>35</i>
2.2.3	<i>Técnicas de offloading</i>	<i>36</i>
2.2.4	<i>Offloading e Redes Veiculares</i>	<i>37</i>
2.3	Redes Complexas	38
2.3.1	<i>Introdução</i>	<i>38</i>
2.3.2	<i>Fundamentos Teóricos</i>	<i>38</i>
2.3.3	<i>Propriedades das Redes Complexas</i>	<i>39</i>
2.3.4	<i>Modelos de Redes Complexas</i>	<i>39</i>
2.3.5	<i>Metodologias de Análise</i>	<i>40</i>
2.4	Redes Celulares - 5G	40
2.4.1	<i>Visão geral</i>	<i>41</i>
2.4.2	<i>Arquitetura 5G-VANET</i>	<i>41</i>

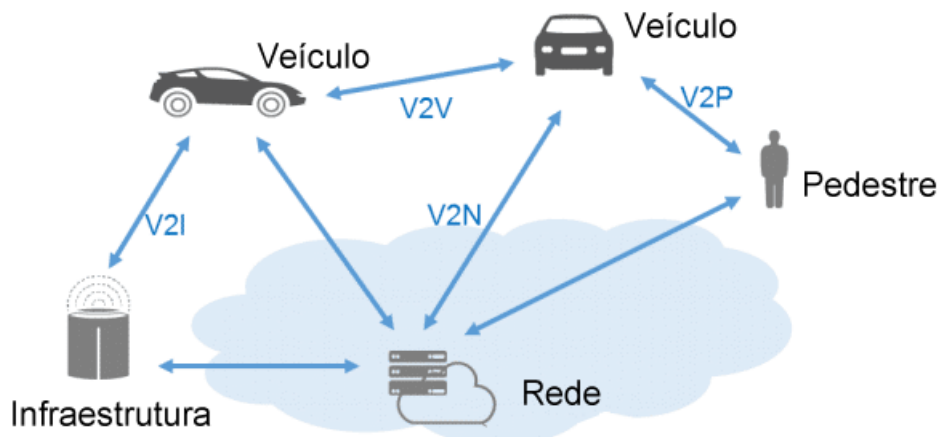
2.5	<i>Multi-access Edge Computing (MEC)</i>	43
2.5.1	<i>Arquitetura e Componentes dos Servidores MEC</i>	44
2.5.2	<i>Tecnologias e Protocolos em MEC</i>	45
2.5.3	<i>Casos de Uso e Aplicações dos Servidores MEC</i>	47
2.6	Trabalhos Relacionados	49
2.7	Problemas Identificados	58
2.8	Considerações Finais	58
3	<i>ALGORITMO BASEADO DE PREVISÃO DE ROTAS MULTI-HOP PARA OFFLOADING EM REDES VEICULARES</i>	59
3.1	Visão geral	59
3.2	Algoritmo Proposto	60
3.2.1	<i>Estado de Inicialização</i>	61
3.2.2	<i>Estado de Redução</i>	69
3.3	Estado de Auto-Descarregamento	70
3.4	Estado de Extensão	70
3.5	Reconstruir o Caminho de Descarregamento	71
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	73
4.1	Ferramentas utilizadas	73
4.2	Simulações	76
4.2.1	<i>Simulação do Algoritmo Cp</i>	76
4.2.2	<i>Simulação do Algoritmo PE-MHMR</i>	77
4.3	Resultados	79
4.3.1	<i>Resultados Cp</i>	80
4.3.1.1	<u>Taxa de entrega</u>	80
4.3.1.2	<u>Número de transmissões</u>	81
4.3.1.3	<u>Taxa de redundância</u>	82
4.3.2	<i>Resultados PE-MHMR</i>	83
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	93
5.1	Considerações Finais e Contribuições	93
5.2	Trabalhos Futuros	94

BIBLIOGRAFIA.....	97
--------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

As Redes Veiculares Ad-hoc, conhecidas como VANETs (*Vehicular Ad-hoc Networks*), são imprescindíveis para a criação de Sistemas de Transporte Inteligentes (*ITS - Intelligent Transport Systems*). Devido à alta mobilidade e ao aumento e à diminuição do número de veículos, em VANETs, a mudança dinâmica na topologia da rede resulta em um desafio para a distribuição de informação entre veículos e dificulta as soluções escaláveis na rede. A Computação de Borda de Acesso Múltiplo (*MEC - Multi-access Edge Computing*) é uma tecnologia emergente que permite que recursos de computação e armazenamento sejam movidos para mais perto da borda da rede. Servidores, pontos de acesso ou estações base são alguns exemplos de tecnologias que podem ser usadas para reduzir a latência da rede e melhorar a eficiência da transferência de dados. A tecnologia MEC pode ser usada em várias aplicações, incluindo comunicações *Vehicle-to-Vehicle* (V2V), *Vehicle-to-Road Infrastructure* (V2I), *Vehicle-to-Pedestrian* (V2P) e *Vehicle-to-Network* (V2N), permitindo que os veículos se comuniquem entre si e com unidades de beira de estrada (*RSUs - Roadside Unit*) (AHMAD et al., 2021). A junção destas formas de comunicação constituem o sistema de comunicação *Vehicle-to-Everything* (V2X). A arquitetura V2X é apresentada na Figura 1.

Figure 1 – Sistema de comunicação V2X



Fonte: do autor

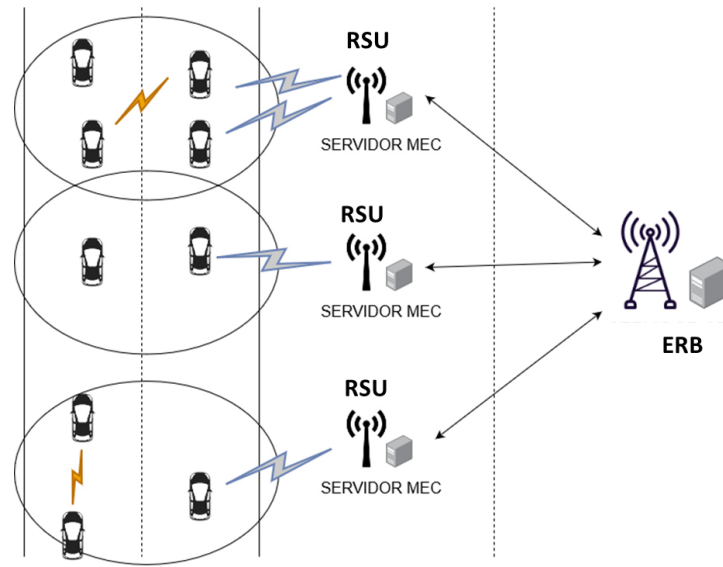
1.1 Motivação

Com a crescente demanda por serviços que utilizam redes veiculares e a grande quantidade de dados gerados pelos veículos, é necessário desenvolver estratégias para aliviar a sobrecarga nessas redes. A descarga de dados (*offloading*) é uma estratégia usada para reduzir a quantidade de dados/serviços transmitidos pela rede. Durante esse processo, os dados são transmitidos através de comunicações Veículo-a-Veículo (V2V) e Veículo-a-Infraestrutura (V2I) (HUSSEIN; MAHMOOD, 2023). A descarga de dados V2V e V2I é um problema importante a ser resolvido nas VANETs. O uso de MEC nesse contexto pode reduzir a carga da rede e melhorar o desempenho da descarga de dados (ISLAM et al., 2023). No entanto, vários desafios envolvem essa tecnologia (HASSAN et al., 2021).

A descarga para a infraestrutura, utilizando comunicações V2I, pode usar Estações Base Celulares (CBS) ou Unidades de Beira de Estrada (RSUs). As CBSs têm custo mais alto por dados transmitidos e devem ser evitadas. As RSUs têm custo mais baixo para tráfego de dados e, portanto, são preferidas para descarga V2I (TAMBAWAL et al., 2019). No entanto, embora as RSUs tenham custos de tráfego de dados mais baixos, em relação às CBSs, elas não estão amplamente disponíveis devido aos custos de implantação. Em casos onde as RSUs não são acessíveis, a solução de descarga deve utilizar a rede celular (SOUZA et al., 2019). Durante a descarga da rede veicular para a infraestrutura, pode surgir a necessidade de roteamento *multi-hop* para garantir que a informação chegue à RSU. A solução deve escolher o melhor caminho entre o veículo que precisa descarregar dados e a RSU. Durante a seleção do caminho de transmissão ideal, fatores como consumo de energia, probabilidade de sucesso na entrega e tempo de entrega devem ser considerados (ZHU et al., 2023).

Em um ambiente de múltiplas RSUs sobrepostas, várias RSUs são implantadas em uma área, e os veículos podem alcançar várias RSUs simultaneamente, conforme ilustra a Figura 2. A eficiência da descarga de dados pode ser melhorada por esse esquema de múltiplas RSUs, que permite que os veículos se comuniquem com a RSU que oferece a melhor conectividade em um determinado momento (CHAVHAN et al., 2022). A ideia básica da descarga de dados baseada em MEC em um ambiente de múltiplas RSUs sobrepostas é que os veículos possam descarregar seus dados para uma RSU que possa processar os dados e encaminhá-los para um servidor MEC localizado na borda da rede. O servidor MEC pode realizar várias tarefas nos dados, tais como agregação, filtragem e análise. Após os tratamentos necessários, o servidor MEC pode enviar os dados processados de volta para a RSU para entrega a outros veículos ou para algum serviço em nuvem (SONG et al., 2023b).

Para implementar a descarga de dados baseada em MEC em um ambiente de

Figure 2 – Ambiente com MUltiplas RSU**Fonte: do autor**

múltiplas RSUs sobrepostas, vários desafios precisam ser enfrentados, tais como a alocação de recursos, o gerenciamento de mobilidade, o roteamento e a segurança (SEHAR et al., 2023). A alocação de recursos envolve alocar recursos de computação e armazenamento para veículos e RSUs com base em seus requisitos e disponibilidade. O gerenciamento de mobilidade envolve garantir uma transição suave dos veículos entre as RSUs e manter a conectividade durante o processo de transição. A segurança envolve garantir a confidencialidade e a integridade dos dados, durante a transferência e o armazenamento. Em resumo, a descarga de dados baseada em MEC em um ambiente de múltiplas RSUs sobrepostas tem o potencial de melhorar a eficiência e o desempenho das comunicações V2V e V2I. Essa técnica também ajuda a prevenir congestionamentos em redes veiculares (BHARANY et al., 2023).

A eficiência energética é um fator crítico nesse contexto, pois o consumo excessivo de energia pode comprometer a sustentabilidade das redes veiculares e aumentar os custos operacionais. O *offloading* inteligente de dados permite otimizar a utilização de energia, reduzindo o uso desnecessário de recursos e prolongando a vida útil dos dispositivos envolvidos na transmissão. Dessa forma, soluções eficientes de descarregamento podem contribuir significativamente para a economia de energia na rede, mantendo um desempenho adequado e garantindo a escalabilidade do sistema.

1.2 Objetivos

Este trabalho apresenta uma solução para descarga de dados considerando múltiplos saltos e a possível sobreposição de sinais de RSUs. Para isso, é proposto um

algoritmo de Múltiplos Saltos (AHMED; SERAJ; ISLAM, 2020), para encontrar o servidor MEC mais eficiente para a descarga veicular denominado PE-MHMR (Predicted Energetic multi-hop multi-RS). Isso é feito avaliando a aptidão das RSUs, que são intermediárias para fornecer uma comunicação veicular ininterrupta. Essas avaliações são feitas de forma contínua, até que uma rota energeticamente eficiente seja encontrada para a transferência eficiente entre os nós da rede (LIN; HUANG; WU, 2022).

O principal objetivo do algoritmo proposto é encontrar a rota ideal para os veículos, evitando congestionamentos na rede. O uso do caminho mais curto e a eficiência energética guiaram o uso de redes complexas para selecionar os parâmetros do algoritmo. As métricas utilizadas foram energia, vazão *throughput*, atraso, taxa de entrega de pacotes, precisão e também os valores de *recall*. O desempenho geral do modelo proposto foi avaliado através de simulações. Os resultados das simulações mostram que rotas mais eficientes podem ser calculadas usando o algoritmo proposto. Ele foi avaliado usando as métricas de desempenho apropriadas, consistindo em níveis de *throughput*, atraso, taxas de entrega de pacotes e níveis de consumo de energia, para avaliar o caminho energeticamente eficiente identificado para a transferência de nós da estação base para o destino. A meta final é a comunicação eficaz V2V2I (Veículo-a-Veículo-a-Infraestrutura). Isso é alcançado encontrando as melhores formas de descarga de dados, considerando múltiplas RSUs, consumo de energia e congestionamento da rede. Os objetivos específicos foram:

1. A implementação de um algoritmo, o Cp (*Complex Probability*) que, através de métricas de redes complexas, verifica a probabilidade de sucesso na transmissão de um enlace.
2. A implementação do algoritmo PE-MHMR (*Predicted Energetic multi-hop multi-RSU*) para avaliar o valor da função de aptidão das RSUs, garantindo a transmissão de dados veiculares e o roteamento para a transmissão de nós usando o método VVR-RSU. O algoritmo PE-MHMR é composto por outros algoritmos funcionais, também propostos neste trabalho. Os algoritmos funcionais que compõem os módulos do PE-MHMR são:
 - (a) Cálculo do tempo de início e de término para todos os enlaces
 - (b) Cálculo da probabilidade de sucesso de entrega (SP) para cada enlace. Ele aciona o algoritmo Cp (*Complex Probability*), citado anteriormente.
 - (c) *InitContenderSet* com o objetivo de encontrar o conjunto de caminhos candidatos para encontrar o melhor caminho para realizar o *offloading*.
 - (d) CBOP - (*Constrained Best-Offloading Path*) projetado para encontrar o melhor caminho de descarregamento entre os caminhos candidatos.

3. A avaliação do desempenho geral do modelo por meio de algumas métricas, como taxa de entrega de pacotes, tempo de atraso, precisão, *recall* e também taxas de acurácia.

1.3 Publicações

Esta tese gerou as seguintes publicações, apresentadas em ordem cronológica crescente:

1. LOUSADA, E. ; STORCK, C. ; Mini, Raquel A. de F. ; DUARTE-FIGUEIREDO, FÁTIMA . Using Complex Networks Metrics to Mitigate the Broadcast Storm Problem. In: IEEE Symposium on Computers and Communications, 2019, Barcelona. ISCC, 2019.
2. LOUSADA, E. ; STORCK, C. R. ; Mini, Raquel A. de F. ; DUARTE-FIGUEIREDO, F L P . Protocolo Baseado em Métricas de Redes Complexas para Mitigação de Tempestade de Broadcast. In: Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva - SBCUP, 2019, Belém. Congresso da Sociedade Brasileira de Computação (CSBC 2019), 2019. Mensão Honrosa do comitê de avaliação do simpósio.
3. LOUSADA, EFREM ELADIE DE OLIVEIRA ; Figueiredo, Fátima de Lima Procópio Duarte . CN-ffVP: uma solução para mitigação de tempestade de broadcast baseada em métricas de redes complexas, distância e energia dos nós. OBSERVATORIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, v. 22, p. 4494-4512, 2024.
4. LOUSADA, EFREM ELADIE DE OLIVEIRA ; Figueiredo, Fátima de Lima Procópio Duarte . An approach for offloading with multi-hop considerations in an RSU signal overlay setting. REVISTA DE GESTÃO E SECRETARIADO, v. 15, p. e3739, 2024.

As seguintes publicações foram, também, frutos de pesquisa do doutorado, em coautoria:

1. STORCK, C. ; LOUSADA, E. ; SILVA, G. G. O. ; Mini, Raquel A. de F. ; DUARTE-FIGUEIREDO, F L P . FiVH: A solution of inter-V-Cell handover decision for connected vehicles in ultra-dense 5G networks. Vehicular Communications, v. 28, p. 100307, 2021.

2. STORCK, Carlos R. ; LOUSADA, E. ; SILVA, G. G. O. ; Mini, Raquel A. de F. ; DUARTE-FIGUEIREDO, FÁTIMA . Uma Solução de Decisão de Handover inter-V-Cell para Veículos Conectados em Redes 5G Ultradensas. In: Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva, 2020, Cuiabá. SBCUP, 2020.

1.4 Estrutura do texto

Este capítulo contextualiza a área de pesquisa, as motivações e os objetivos para o desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 2, são apresentados o referencial teórico e os trabalhos relacionados. No Capítulo 3, é mostrada a proposta para realização de *offloading*. No Capítulo 4, as tecnologias utilizadas para simulação e os resultados são apresentados. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões e propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TRABALHOS RELACIONADOS

O objetivo deste capítulo é fornecer um embasamento teórico e mostrar trabalhos da literatura relacionados ao tema deste trabalho. Primeiramente, são apresentados, nas próximas seções, os conceitos relacionados às Redes Veiculares, às Redes Complexas, a *Offloading*, às redes de celulares 5G e à sua interação com VANETs. Na Seção 2.6, os trabalhos relacionados ao tema são abordados.

2.1 Redes Veiculares Ad-Hoc - VANETs

2.1.1 Introdução

Nos últimos anos, a crescente necessidade por soluções de mobilidade e segurança no trânsito tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias inovadoras no campo dos transportes, principalmente no contexto de cidades inteligentes e na evolução de veículos autônomos. Entre essas tecnologias, as Redes Veiculares Ad-Hoc (VANETs) têm se destacado como um pilar fundamental para possibilitar a comunicação em tempo real entre veículos e entre veículos e a infraestrutura viária. VANETs são redes formadas por veículos que se comunicam entre si, sem a necessidade de uma infraestrutura centralizada tradicional, possibilitando a troca de informações sobre o ambiente, condições de tráfego e possíveis situações de risco. Essas redes são projetadas para operar em condições dinâmicas, dado o movimento constante dos veículos, e para lidar com cenários que requerem transmissão rápida de dados e alta resiliência a falhas.

A relevância das VANETs reside no seu potencial para melhorar a segurança nas estradas, reduzir congestionamentos, otimizar o fluxo de tráfego e fornecer serviços de conveniência e entretenimento aos passageiros. No entanto, a natureza dinâmica dessas redes traz desafios significativos, como a manutenção da conectividade, o gerenciamento eficiente de recursos de comunicação e a necessidade de protocolos de roteamento específicos para o ambiente veicular. Além disso, questões de segurança e privacidade tornam-se cruciais, uma vez que as informações trocadas entre veículos podem incluir dados sensíveis e críticos para a segurança de passageiros e pedestres (HEMMATI; ZAREI; RAHMANI, 2024).

2.1.2 Fundamentos de VANETs

As Redes Veiculares Ad-Hoc (VANETs) representam uma subcategoria de redes móveis ad-hoc (MANETs) desenvolvidas especificamente para a comunicação entre veículos e entre veículos e infraestruturas rodoviárias. Diferente de outras redes, as VANETs operam em um ambiente altamente dinâmico e caracterizado por grande mobilidade dos nós (veículos), o que exige protocolos de comunicação e estratégias de roteamento específicos para garantir uma comunicação confiável e eficaz. Nas VANETs, cada veículo é equipado com um dispositivo de comunicação conhecido como unidade embarcada (*On-Board Unit*, ou OBU), que permite a troca de mensagens entre veículos próximos, conhecida como V2V (*Vehicle-to-Vehicle*), e entre veículos e unidades fixas na infraestrutura rodoviária, conhecida como V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*) (YEFERNY; HAMAD, 2021).

Esse tipo de rede é fundamental para Sistemas de Transporte Inteligente (ITS), pois possibilita a troca de informações críticas de segurança, como alertas de colisão iminente, mudanças nas condições de tráfego e informações de trânsito em tempo real. Essas características permitem às VANETs desempenharem um papel central em sistemas de condução assistida e em futuros cenários de condução autônoma, oferecendo suporte para melhorar a segurança rodoviária e a eficiência do transporte.

A arquitetura de VANETs é composta por diferentes camadas que integram tanto os dispositivos veiculares quanto as infraestruturas de comunicação externas. Os principais componentes incluem as unidades embarcadas (OBUs) nos veículos, as unidades de comunicação localizadas em pontos estratégicos da infraestrutura viária (RSUs), e uma variedade de protocolos que definem a transmissão de dados entre esses componentes (HAMDI et al., 2020).

A arquitetura das VANETs geralmente segue uma estrutura de camadas, similar a outros modelos de rede (SULTANA; GROVER; TRIPATHI, 2021):

- **Camada Física:** Responsável pela transmissão de dados físicos no ambiente rodoviário, a camada física lida com as ondas de rádio e com a infraestrutura de comunicação sem fio. Tecnologias como DSRC (*Dedicated Short Range Communication*) e C-V2X (*Cellular Vehicle-to-Everything*) são amplamente utilizadas, cada uma com suas especificidades. DSRC, por exemplo, opera na faixa de 5,9 GHz e é projetada para comunicações de baixa latência em curtas distâncias, enquanto C-V2X utiliza a infraestrutura celular para oferecer uma maior cobertura e conectividade.
- **Camada de Enlace de Dados:** Responsável pela organização dos dados em quadros para transmissão, assegurando a integridade das mensagens enviadas e recebidas.

Essa camada é essencial para o controle de acesso ao meio, permitindo que múltiplos veículos se comuniquem simultaneamente e evitando colisões de pacotes.

- Camada de Rede: Gerencia o encaminhamento de pacotes de dados entre os veículos e entre veículos e infraestrutura, utilizando protocolos de roteamento específicos para o ambiente dinâmico das VANETs, onde a topologia muda constantemente. Protocolos de roteamento como GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) são comumente empregados.
- Camada de Transporte: Oferece suporte à comunicação de ponta a ponta entre nós da rede, controlando o fluxo de dados e evitando congestionamentos. Tecnologias como TCP (*Transmission Control Protocol*) e UDP (*User Datagram Protocol*) são comuns, embora sua eficácia varie dependendo dos requisitos de latência e confiabilidade da aplicação.
- Camada de Aplicação: Contém as aplicações e os serviços específicos, como sistemas de alerta de colisão, informações de tráfego em tempo real, e sistemas de entretenimento. Cada aplicação tem requisitos específicos de latência, confiabilidade e segurança.

Os principais componentes de uma VANET incluem as *On-Board Units* (OBUs) e as *Road-Side Units* (RSUs), que desempenham papéis específicos na comunicação e na infraestrutura da rede (BAYAN; MOHAMMAD, 2023). As *On-Board Units* (OBUs) são dispositivos de comunicação instalados nos veículos e equipados com antenas e transmissores, além de sistemas GPS para localização. Elas possibilitam que os veículos troquem informações em tempo real sobre o ambiente ao seu redor, como a posição, velocidade e direção. Em um cenário de V2V, as OBUs são cruciais para a transmissão rápida de dados de segurança, como alertas de colisão ou mudanças bruscas de velocidade. As *Road-Side Units* (RSUs) são unidades de comunicação instaladas em locais estratégicos da infraestrutura rodoviária, como semáforos, postes ou pedágios. Essas unidades permitem a comunicação entre veículos e a infraestrutura (V2I), fornecendo informações adicionais que não podem ser obtidas apenas a partir da interação entre veículos. As RSUs auxiliam, por exemplo, na comunicação de condições específicas da via, como construções, acidentes ou mudanças de limite de velocidade, e atuam como pontos de conexão para acessar a internet ou para melhorar a conectividade em áreas com baixa densidade veicular.

As VANETs dependem de protocolos e técnicas de comunicação avançados para garantir a transmissão eficaz e confiável de informações em um ambiente dinâmico e altamente variável. A troca de dados entre veículos e entre veículos e infraestruturas exige o desenvolvimento de protocolos específicos que sejam capazes de lidar com a rápida mudança de topologia, altas velocidades e variados tipos de obstáculos físicos. Nesta seção,

serão explorados os principais modelos de propagação de sinal e protocolos de roteamento, assim como os desafios em comunicação que afetam o desempenho das VANETs.

Em ambientes veiculares, o sinal de comunicação está sujeito a fenômenos de atenuação, interferência e reflexão, que variam significativamente conforme o tipo de cenário, como rodovias abertas, áreas urbanas com muitos edifícios ou túneis.

Os principais modelos de propagação de sinal em VANETs são (AL-SHAREEDA; MANICKAM, 2023) o *Free-Space*, o *Two-Ray Ground Reflection* e o *Modelo Rayleigh*. O modelo *Free-Space* é utilizado, principalmente, em rodovias e áreas abertas. Esse modelo considera uma linha de visão direta entre transmissor e receptor, sem a interferência de obstáculos. É ideal para ambientes onde o sinal não encontra barreiras físicas entre os veículos. O modelo *Two-Ray Ground Reflection* considera tanto o caminho direto do sinal quanto o sinal refletido pelo solo, o que é útil para comunicações de longa distância, comuns em rodovias. Esse modelo permite uma estimativa mais realista da intensidade do sinal em cenários mistos, onde o sinal pode sofrer atenuação devido à topografia do terreno. O modelo de difusão urbana (*Rayleigh*) leva em conta a presença de obstáculos, como edifícios e outros veículos, que podem bloquear, refletir ou dispersar o sinal. É amplamente utilizado em áreas urbanas e é adequado para simulações onde o sinal sofre múltiplas reflexões.

2.1.2.1 Protocolos de Roteamento em VANETs

A natureza altamente dinâmica das VANETs torna os protocolos de roteamento fundamentais para garantir uma comunicação eficiente. Eles podem ser classificados em diferentes categorias, cada uma com características específicas para lidar com os desafios de redes veiculares.

Os protocolos baseados em topologia mantêm uma visão da rede para determinar as rotas de transmissão dos pacotes. Embora sejam adaptativos às mudanças na rede, tendem a ser menos eficazes em cenários de alta mobilidade. O protocolo AODV (*Ad hoc On-Demand Distance Vector*) estabelece rotas apenas sob demanda, reduzindo a sobrecarga da rede, mas introduzindo atrasos iniciais na descoberta de rotas. Já o protocolo DSR (*Dynamic Source Routing*) também utiliza rotas sob demanda, mas permite o armazenamento de rotas alternativas, o que o torna vantajoso em cenários de alta dinâmica. Entretanto, sua escalabilidade pode ser comprometida à medida que o número de nós aumenta (PATIL; MALLAPUR, 2022).

Por outro lado, os protocolos baseados em localização utilizam a posição geográfica dos nós, geralmente obtida via GPS, para definir as rotas. Esses protocolos não exigem atualizações contínuas da topologia, sendo mais eficientes em redes veiculares. O

GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) direciona pacotes com base na proximidade do nó de destino, adotando uma abordagem "gananciosa". Em situações onde a comunicação direta não é possível, ele utiliza um método de perímetro para contornar obstáculos. Já o protocolo GRANT (*Geographic Routing for Ad hoc Networks with Traffic Awareness*) incorpora informações sobre o tráfego da rede, além da localização, para evitar congestionamentos, o que o torna especialmente útil em ambientes urbanos densos (YOGARAYAN et al., 2020).

Os protocolos baseados em *cluster* dividem a rede em pequenos grupos, chamados *clusters*, para melhorar a escalabilidade e reduzir a sobrecarga de roteamento em ambientes com grande número de veículos. O protocolo COIN (*Clustering for Open Inter Vehicular Communication Networks*) organiza os veículos em *clusters* com base na proximidade e velocidade relativa. Dentro de cada *cluster*, um líder atua como intermediário para facilitar a comunicação entre diferentes grupos. De forma similar, o protocolo CORA (*Cluster-based Routing Algorithm*) utiliza a posição geográfica para formar *clusters* e estabelecer rotas entre eles, reduzindo a complexidade do roteamento em cenários urbanos (KARABULUT et al., 2023).

Essas diferentes abordagens de roteamento ilustram como as VANETs enfrentam seus desafios específicos, utilizando estratégias otimizadas para lidar com a alta mobilidade, congestionamento e escalabilidade da rede.

2.1.2.2 Técnicas de Comunicação e Transmissão de Dados

A transmissão de dados em VANETs é desafiadora devido à natureza dinâmica do ambiente veicular. Algumas técnicas de comunicação comumente usadas incluem:

Comunicação V2V (Vehicle-to-Vehicle): A comunicação V2V permite que os veículos troquem informações diretamente entre si, sem a necessidade de infraestrutura fixa. Essa comunicação é essencial para aplicações de segurança, pois permite alertas de colisão, notificações de frenagem de emergência e informações sobre condições da via em tempo real (SHAH; KASBE, 2021).

- *Broadcasting*: Em cenários V2V, o método de transmissão mais comum é o *broadcast*, onde uma mensagem é enviada para todos os veículos próximos. Essa técnica é particularmente útil para enviar alertas de emergência, mas pode causar congestionamento da rede, especialmente em áreas densamente povoadas.
- *Multi-hop Routing*: Em casos onde os veículos estão distantes, a técnica de roteamento *multi-hop* é utilizada. Neste caso, os pacotes de dados "saltam" de um veículo para outro até chegarem ao destino. Essa técnica é fundamental para garantir a cobertura em cenários onde a conectividade é intermitente.

Comunicação V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*): A comunicação V2I utiliza unidades de infraestrutura, como RSUs, para interagir com os veículos. Essa forma de comunicação é fundamental para ampliar o alcance das VANETs e fornecer serviços adicionais, como informações de tráfego e condições de estrada (HAMDI et al., 2021).

- **Infraestrutura de Suporte:** As RSUs atuam como pontos de retransmissão, ampliando o alcance das mensagens e conectando veículos que estejam fora do alcance de comunicação direta. Esse tipo de infraestrutura é especialmente útil para distribuir atualizações em tempo real sobre condições climáticas ou para coordenar operações de emergência.
- **Interface com a Nuvem:** A comunicação V2I permite que os veículos acessem dados em tempo real via nuvem, o que é essencial para serviços de navegação e para a integração de dados de tráfego. A conectividade em nuvem permite que informações sobre congestionamentos ou acidentes sejam rapidamente compartilhadas com uma vasta quantidade de veículos.

2.1.2.3 Desafios em Comunicação

A comunicação em VANETs enfrenta diversos desafios técnicos que afetam sua performance. Os principais desafios incluem (HAMDI et al., 2020) alta mobilidade e dinamicidade da rede. Devido à rápida movimentação dos veículos, a rede está em constante alteração. Isso exige que os protocolos de comunicação sejam capazes de se adaptar rapidamente para manter a conectividade, o que é um desafio especialmente em rodovias de alta velocidade.

Muitas aplicações de segurança, como alertas de colisão, exigem baixa latência. Manter a qualidade de serviço em uma rede dinâmica como a VANET, onde a conectividade é intermitente e a carga pode variar, é um dos principais desafios. À medida que o número de veículos conectados aumenta, as VANETs precisam lidar com uma sobrecarga de tráfego, especialmente em áreas urbanas densas. Protocolos de roteamento e estratégias de controle de congestionamento são fundamentais para lidar com essa escalabilidade.

Para melhorar a confiabilidade e a qualidade da comunicação, técnicas são utilizadas (RAMESH; PUNNIAKODI, 2024) para controle de congestionamento e gestão de prioridades. Técnicas de controle de congestionamento são implementadas para reduzir o tráfego excessivo e otimizar a utilização da largura de banda, evitando a perda de pacotes e melhorando a eficiência da rede. Em VANETs, dados de segurança possuem prioridade mais alta em comparação a dados de entretenimento ou outros dados de conveniência.

Técnicas de gerenciamento de filas e prioridades são usadas para garantir que as mensagens de segurança sejam transmitidas rapidamente.

2.1.2.4 Aplicações de VANETs

As VANETs apresentam um vasto leque de aplicações que podem transformar a forma como os veículos interagem entre si e com a infraestrutura viária, com o objetivo principal de melhorar a segurança, a eficiência do tráfego e a experiência do usuário. Essas aplicações são classificadas em três principais categorias: aplicações de segurança, gestão e eficiência do tráfego, e serviços de conveniência e entretenimento. Cada uma dessas categorias abrange diversas funcionalidades que contribuem para o desenvolvimento de Sistemas de Transporte Inteligente (ITS) e para a criação de cidades mais conectadas e inteligentes.

A segurança é uma das principais motivações para o desenvolvimento das VANETs. As aplicações de segurança são projetadas para mitigar o risco de acidentes, melhorar a visibilidade e prever situações perigosas, protegendo motoristas, passageiros e pedestres (AL-SHAREEDA; MANICKAM, 2023). Dentre as principais aplicações de segurança estão os sistemas de alerta de colisão, que utilizam comunicação V2V para trocar informações em tempo real sobre a posição, a velocidade e a direção dos veículos. Quando um veículo identifica uma possível colisão com outro, ele pode enviar um alerta para que os motoristas realizem manobras evasivas a tempo. Também podem ser citados sistemas de informação de tráfego em tempo real, controle inteligente de sinalização, coordenação de veículos autônomos, entretenimento, pagamento automático de pedágio e estacionamento, dentre outros.

Aplicações Futuras e Avanços Esperados: O desenvolvimento das VANETs abre portas para uma variedade de novas aplicações, especialmente com o avanço de tecnologias complementares, como redes 5G, inteligência artificial e computação em borda (*edge computing*) (HOZOURI et al., 2023). Algumas das aplicações futuras mais promissoras incluem suporte para veículos autônomos, transporte de mercadorias e logística, monitoramento de saúde e bem-estar dos motoristas.

As VANETs estão posicionadas como uma das tecnologias-chave para o desenvolvimento de Sistemas de Transporte Inteligente (ITS) e de cidades inteligentes. Com o rápido avanço de tecnologias de comunicação, inteligência artificial, redes 5G/6G e sensores de alta precisão, o futuro das VANETs promete transformar profundamente a mobilidade urbana e a experiência dos usuários. A adoção das redes 5G e a futura implementação das redes 6G são alguns dos avanços mais aguardados para o desenvolvimento das VANETs. Com a promessa de maior largura de banda, baixa latência e alta confiabilidade, essas redes podem melhorar drasticamente o desempenho

das VANETs, permitindo comunicação em tempo real com menos interferências (SAOUD et al., 2024).

Com o crescimento das VANETs, a necessidade de processamento de dados em tempo real e descentralizado está aumentando. A computação em borda e a computação em nuvem surgem como duas tecnologias complementares para tornar as VANETs mais eficientes e responsivas (WANG et al., 2024).

Desafios e Considerações para Aplicações em VANETs: Embora as aplicações de VANETs ofereçam um enorme potencial, sua implementação enfrenta uma série de desafios técnicos, operacionais e sociais que devem ser considerados para garantir o sucesso e a adoção em larga escala (HUSSEIN et al., 2024). Alguns desses desafios incluem privacidade e segurança de dados, escalabilidade e confiabilidade, interoperabilidade entre padrões, alto custo de infraestrutura, aceitação de usuários.

A interoperabilidade entre diferentes sistemas de VANET e a padronização de tecnologias e protocolos são cruciais para que veículos e infraestrutura de diferentes fabricantes e regiões possam se comunicar. Sem padrões consistentes, a implementação de VANETs em larga escala pode ser dificultada, limitando seu potencial.

A instalação de infraestrutura para comunicação V2I, como RSUs (Road-Side Units) e sistemas de controle inteligente de tráfego, pode exigir investimentos substanciais. Além disso, veículos equipados com tecnologia de comunicação V2V/V2I ainda têm um custo elevado, o que pode atrasar a adoção ampla dessa tecnologia.

A inteligência artificial (IA) é uma força motriz para a evolução das VANETs, especialmente para o suporte de sistemas autônomos e análise de dados em tempo real. Com o uso de algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais profundas, as VANETs poderão realizar análises complexas e melhorar a tomada de decisões (SAOUD et al., 2024).

2.2 Offloading

2.2.1 Introdução

O *offloading* em redes é uma estratégia projetada para melhorar a eficiência e o desempenho das redes móveis e sem fio, especialmente em cenários de grande volume de tráfego e alta demanda de dados. À medida que o número de dispositivos conectados cresce exponencialmente, impulsionado pelo aumento de usuários móveis, dispositivos IoT e aplicações que exigem alta velocidade, as redes tradicionais enfrentam desafios significativos. A infraestrutura central da rede, ou “core”, tende a ficar sobrecarregada, levando ao aumento da latência e a problemas de congestionamento. É aqui que entra

o conceito de *offloading*: o desvio de determinadas operações, tarefas de processamento ou até mesmo a transferência de dados para outros pontos da rede, como redes Wi-Fi, servidores de borda (MEC), ou até dispositivos próximos.

O *offloading*, portanto, é uma forma eficaz de descongestionar a infraestrutura central da rede e manter a qualidade do serviço (QoS) para os usuários finais. Essa técnica não só permite melhorar o desempenho da rede, mas também ajuda a reduzir o consumo de energia, especialmente em dispositivos móveis que dependem de baterias. O *offloading* é aplicável em uma ampla variedade de contextos, incluindo redes móveis, computação em nuvem e, mais recentemente, computação de borda. Em um cenário onde a latência é um fator crítico — como em jogos online, realidade aumentada e redes veiculares — o *offloading* para servidores de borda, ou locais mais próximos aos usuários, é uma solução eficiente para atender a requisitos de tempo de resposta ultrabaixo (FENG et al., 2022).

Com a chegada do 5G e a ampliação de aplicações como redes veiculares, o *offloading* tem se tornado uma necessidade, garantindo que os dados mais críticos possam ser processados rapidamente e próximos ao usuário, mantendo a continuidade e a velocidade de resposta da rede.

2.2.2 Importância do *offloading*

O *offloading* desempenha um papel fundamental para garantir a escalabilidade e a qualidade do serviço em redes que enfrentam alta densidade de dispositivos e crescente demanda por dados. Essa técnica é essencial para lidar com os desafios impostos pelo aumento constante de usuários e dispositivos conectados, oferecendo soluções que otimizam o desempenho da rede e melhoram a experiência do usuário (AHMED et al., 2023).

Um dos principais benefícios do *offloading* é a redução da latência. Em redes móveis, o tempo de resposta é um fator crítico, especialmente em aplicações sensíveis ao tempo, como chamadas de vídeo, jogos online e sistemas veiculares críticos. Ao transferir o processamento e a análise de dados para a borda da rede ou para servidores locais, o *offloading* diminui significativamente os atrasos, proporcionando uma experiência mais fluida e responsiva. Além disso, o *offloading* contribui para o descongestionamento da rede central, aliviando a carga do núcleo da rede ao redirecionar tarefas para redes alternativas, como Wi-Fi, ou para servidores de borda. Essa redistribuição de tarefas ajuda a manter a capacidade de resposta da rede central, mesmo em cenários de alta demanda, garantindo a qualidade do serviço para aplicações críticas.

Outro aspecto relevante é a economia de energia em dispositivos móveis. Para dispositivos com baterias limitadas, como smartphones, o *offloading* reduz a necessidade

de processamento local de tarefas intensivas, preservando a vida útil da bateria. Ao delegar essas operações para servidores externos, é possível melhorar significativamente a eficiência energética e a experiência do usuário.

Por fim, o *offloading* promove a escalabilidade da infraestrutura de rede ao possibilitar o suporte a um número maior de dispositivos sem a necessidade de grandes investimentos na expansão do núcleo da rede. Utilizando recursos de borda e redes complementares, as operadoras conseguem atender à crescente demanda de forma eficiente, especialmente em áreas densamente povoadas ou durante eventos de alta concentração de usuários. Esses fatores destacam como o *offloading* é essencial para enfrentar os desafios das redes modernas, assegurando desempenho, eficiência e escalabilidade em ambientes cada vez mais exigentes.

2.2.3 Técnicas de *offloading*

As técnicas de *offloading* desempenham um papel essencial na adaptação das redes para atender às necessidades específicas das aplicações, considerando fatores como o nível de latência exigido e a localização dos recursos de processamento. Diferentes abordagens são utilizadas para otimizar o desempenho e a eficiência das redes móveis e sem fio (ROSELE et al., 2024).

Uma das estratégias mais conhecidas é o *offloading* para a nuvem, onde dados e tarefas de processamento são transferidos para servidores localizados em data centers remotos. Essa abordagem oferece recursos abundantes de armazenamento e capacidade computacional, sendo ideal para tarefas que demandam grande poder de processamento, como análise de big data, treinamento de modelos de inteligência artificial e processamento de dados complexos. Apesar de sua eficiência em aplicações de alta demanda, a técnica pode gerar maior latência, sendo mais adequada para atividades que toleram algum atraso ou que não exijam respostas imediatas.

Outra alternativa amplamente empregada é o *offloading* para a borda (*edge offloading*), viabilizada pelo avanço da computação em borda (MEC). Essa técnica processa dados próximos ao usuário, reduzindo a necessidade de tráfego até a infraestrutura central e, consequentemente, o tempo de resposta. É especialmente vantajosa para aplicações que exigem baixa latência, como realidade aumentada, reconhecimento de imagem e controle de dispositivos IoT. Em redes veiculares e cidades inteligentes, onde decisões rápidas e locais são cruciais, o *offloading* para a borda desempenha um papel estratégico.

O *offloading* para redes próximas, ou *Wi-Fi offloading*, é outra solução eficaz, transferindo tráfego de dados das redes móveis para redes Wi-Fi disponíveis. Essa técnica

é especialmente útil em locais de alta densidade de usuários, como aeroportos, estádios e centros urbanos, aliviando a carga das redes celulares e preservando a capacidade para serviços essenciais. Além disso, beneficia os usuários ao reduzir o consumo de dados móveis.

Por fim, o *offloading* colaborativo permite a cooperação entre dispositivos próximos para compartilhar a carga de processamento. Em ambientes de IoT, dispositivos como sensores e aparelhos inteligentes podem dividir tarefas, aproveitando capacidades ociosas. Em redes veiculares, veículos podem processar dados e compartilhar informações de forma distribuída, uma abordagem útil em cenários com cobertura de rede limitada. Essas técnicas demonstram a flexibilidade do *offloading* para atender a diferentes necessidades, contribuindo significativamente para a eficiência e a escalabilidade das redes modernas.

2.2.4 *Offloading e Redes Veiculares*

No contexto das redes veiculares, o *offloading* é uma estratégia indispensável para garantir que as aplicações dessas redes sejam rápidas, seguras e confiáveis. As redes veiculares suportam comunicações tanto entre veículos (V2V) quanto entre veículos e a infraestrutura (V2I), criando um ecossistema integrado no qual veículos, sensores e a infraestrutura urbana colaboram para melhorar a segurança e a eficiência do trânsito.

Uma das contribuições mais importantes do *offloading* nesse contexto é a possibilidade de viabilizar comunicação em tempo real. Aplicações de segurança, como prevenção de colisões, detecção de pedestres e sistemas de assistência ao motorista, dependem de baixa latência para processar informações rapidamente e reagir a eventos inesperados, como uma freada brusca ou a entrada de pedestres na via. Ao transferir o processamento para servidores de borda próximos aos veículos, esses sistemas podem tomar decisões quase instantaneamente (WEI et al., 2022). Além disso, o *offloading* permite um processamento eficiente dos dados de sensores utilizados em veículos conectados e autônomos. Sensores como câmeras, radares e LIDAR geram grandes volumes de dados que, quando transferidos para servidores de borda, podem ser processados de forma mais rápida e eficiente. Isso alivia a carga computacional nos sistemas internos dos veículos, permitindo que estes se concentrem em tarefas críticas.

Outro benefício significativo é a redução do consumo de banda. Nas redes veiculares, transmitir continuamente dados em alta velocidade pode sobrecarregar a rede central, comprometendo sua eficiência. O *offloading* de tarefas e dados para a borda reduz essa sobrecarga, liberando banda para outras operações essenciais e diminuindo os custos relacionados ao tráfego de dados (AHMED et al., 2023). Além disso, o *offloading* oferece suporte crucial à mobilidade. Devido à alta velocidade e constante movimentação dos veículos, manter uma conexão estável é um desafio. Transferir o processamento para

servidores próximos aos pontos de coleta de dados reduz a necessidade de retransmissões, contribuindo para uma comunicação contínua e confiável.

Por fim, com o avanço das tecnologias V2X, o *offloading* ganha ainda mais relevância para suportar comunicações integradas entre veículos, infraestrutura e pedestres. Essa infraestrutura colaborativa e em tempo real é essencial para o funcionamento de veículos autônomos, promovendo um ambiente de trânsito mais seguro e eficiente. Assim, o *offloading* é um elemento chave para o sucesso das redes veiculares e de sua evolução.

2.3 Redes Complexas

2.3.1 Introdução

Redes complexas são estruturas de sistemas formadas por nós (ou vértices) conectados por arestas (ou enlaces). Em contraste com redes tradicionais e aleatórias, redes complexas possuem características específicas, como agrupamento, hierarquia e conexões não triviais, que não são bem descritas pelos modelos clássicos de grafos. Essas redes aparecem em diversas áreas do conhecimento, como em redes sociais, redes de comunicação, redes biológicas e até em sistemas de transporte. O estudo de redes complexas permite entender e modelar esses sistemas de maneira mais eficaz, revelando padrões, previsibilidade e propriedades estruturais que são essenciais para diversas aplicações práticas.

2.3.2 Fundamentos Teóricos

Redes complexas estendem o conceito de grafos ao descrever sistemas com propriedades e interações complexas. Uma característica central é o grau do vértice, que representa o número de conexões de um nó na rede. Em redes complexas, a distribuição de grau geralmente não é uniforme, mas sim heterogênea, seguindo em muitos casos uma lei de potência, onde poucos nós têm muitos vizinhos (chamados de hubs) e a maioria dos nós possui poucas conexões (HOFSTAD, 2024). Outra propriedade fundamental é a sobreposição topológica, que descreve a maneira como os nós compartilham vizinhos na rede, indicando o nível de interconexão entre diferentes partes da rede. Redes com alta sobreposição tendem a formar módulos ou comunidades, onde certos nós são mais densamente conectados entre si do que com o restante da rede. Essa estrutura modular é importante para entender fenômenos como agrupamento social e a formação de grupos em redes biológicas.

Por fim, a persistência de arestas reflete a estabilidade das conexões ao longo do

tempo. Em redes dinâmicas, como redes sociais e financeiras, as arestas podem aparecer ou desaparecer, dependendo da natureza da interação. A persistência mede a duração e a frequência das conexões entre pares de nós, ajudando a identificar relações mais estáveis e menos suscetíveis a mudanças, o que pode ser essencial para a análise de redes temporais (ZHANG et al., 2023).

2.3.3 Propriedades das Redes Complexas

Redes complexas têm propriedades distintivas, essas propriedades são essenciais para caracterizar e analisar a estrutura e dinâmica das redes, auxiliando na compreensão de aspectos como robustez, propagação de informações e resistência a falhas (BOCCALETTI et al., 2006):

- **Distribuição de Grau:** Em muitas redes complexas, a distribuição de grau segue uma lei de potência, o que significa que há alguns hubs com grau muito alto, enquanto a maioria dos nós tem poucos vizinhos.
- **Grau do Vértice:** Esse valor representa o número de arestas ligadas a um nó específico. Em redes complexas, os vértices com maior grau desempenham papéis importantes na coesão e resiliência da rede.
- **Clustering (Coeficiente de Agrupamento):** Indica a tendência de nós formarem agrupamentos ou comunidades. Redes complexas frequentemente possuem altos coeficientes de agrupamento, sugerindo uma estrutura de comunidade.
- **Sobreposição Topológica:** Refere-se à interconexão entre diferentes módulos da rede. Alta sobreposição entre módulos indica uma rede mais conectada, o que pode facilitar a propagação de informações ou doenças, dependendo do tipo de rede.
- **Persistência de Arestas:** A estabilidade das conexões entre pares de nós ao longo do tempo. Conexões persistentes indicam vínculos estáveis, enquanto conexões temporárias podem representar interações ocasionais ou mudanças na rede.

2.3.4 Modelos de Redes Complexas

Para modelar e compreender redes complexas, diversos modelos foram desenvolvidos, cada um com características específicas que permitem analisar propriedades como sobreposição topológica e persistência de arestas. Esses modelos são ferramentas essenciais para simular tanto redes estáticas quanto dinâmicas, oferecendo uma visão detalhada das estruturas subjacentes e dos comportamentos dessas redes (AMARAL, 2022).

Um dos modelos mais conhecidos é o modelo de Watts-Strogatz, também chamado de modelo de *Small-World*. Ele é caracterizado por gerar redes com baixa distância média entre os nós e um alto coeficiente de agrupamento, propriedades típicas de redes pequenas-mundos. Esse modelo é especialmente útil para simular cenários como redes sociais, onde os nós são fortemente conectados a pequenos grupos, mas algumas conexões de longa distância conectam diferentes partes da rede, criando caminhos curtos entre quaisquer pares de nós.

Outro modelo amplamente utilizado é o modelo de Barabási-Albert, conhecido como modelo *Scale-Free*. Ele se baseia no princípio do crescimento preferencial, onde novos nós têm maior probabilidade de se conectar a nós que já possuem um alto grau de conexões, formando os chamados hubs. Esse modelo é particularmente relevante para representar redes biológicas e de comunicação, em que a existência de hubs é uma característica comum, refletindo a importância desigual de certos nós na rede. Esses modelos fornecem ferramentas fundamentais para a análise de redes complexas, permitindo uma compreensão mais aprofundada das propriedades estruturais e dinâmicas presentes em diferentes contextos, desde sistemas sociais até redes de comunicação e biológicas.

2.3.5 Metodologias de Análise

A análise de redes complexas combina métodos estatísticos e ferramentas computacionais para explorar suas propriedades, sendo essas metodologias essenciais para identificar padrões, analisar a estrutura das redes e acompanhar as mudanças em redes dinâmicas (HAGBERG; CONWAY, 2020). No âmbito da análise estatística, são calculadas métricas como o grau do vértice, o coeficiente de agrupamento, a sobreposição topológica e a persistência de arestas, que ajudam a compreender tanto a estrutura quanto a dinâmica das redes. Além disso, ferramentas computacionais como o Gephi, que permite a visualização e análise de redes, e bibliotecas como o NetworkX, que oferecem suporte para cálculos programáticos, são utilizadas para medir a sobreposição entre módulos e monitorar a persistência de conexões em redes dinâmicas.

2.4 Redes Celulares - 5G

Desde o início do desenvolvimento das tecnologias de comunicação móvel, na década de 1970, os dispositivos de comunicação vem evoluindo de maneira rápida. Inicialmente sendo possível somente realizar chamadas de voz, as redes móveis de hoje fornecem serviços de banda larga com cobertura de grandes áreas. Os avanços em infraestrutura de comunicação, em conjunto com a criação de novos dispositivos móveis, provocaram um

grande aumento nas possibilidades de aplicações e por consequência no tráfego de rede (GUPTA; JHA, 2015).

O tráfego de rede móvel teve um aumento de 70% em 2014. Os *smartphones* representam a maioria dos dispositivos móveis existentes no planeta, e são responsáveis por 88% de toda comunicação. Além disso, atualmente pesquisadores estudam novas aplicações que podem utilizar os benefícios de uma rede móvel, como a Internet das Coisas (IoT), Internet dos Veículos (IoV), comunicação Dispositivo a Dispositivo (D2D), telemedicina, comunicação Máquina a Máquina (M2M) e Tecnologia Financeira (FinTech). Suportar o alto consumo de largura de banda, além de manter uma taxa alta de conectividade, são tarefas difíceis para a geração de rede móvel 4G (AGIWAL; ROY; SAXENA, 2016).

2.4.1 Visão geral

As principais motivações para o avanço das tecnologias 4G foram as necessidades de aumentar a largura de banda e baixar a latência. O 5G provê, além do aumento de largura de banda e menores tempos de resposta, outros benefícios como melhor escalabilidade do sistema, manutenção da conectividade e eficiência energética da rede. Estima-se que até o final de 2027, 50 bilhões de dispositivos estejam conectados em uma rede confiável e sem atrasos (MITRA; AGRAWAL, 2015).

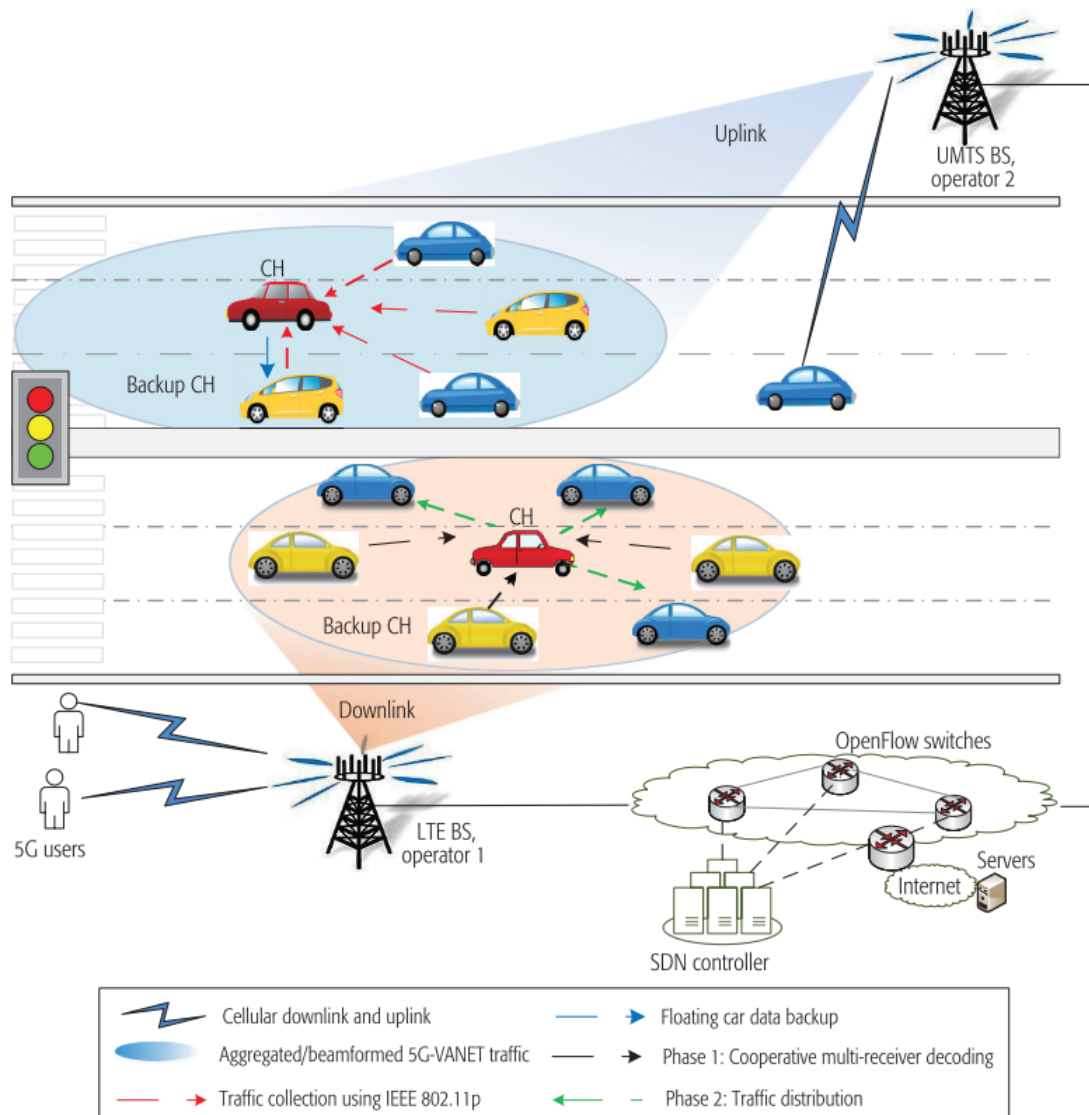
2.4.2 Arquitetura 5G-VANET

Considerando os aspectos do 5G, pode-se observar ser possível a integração de redes heterogêneas, cuja infraestrutura oferece suporte a diferentes protocolos para atender a todos os casos de uso. Para tal, a arquitetura do 5G foi construída em combinação com SDN (*Software Defined Network*), separando o plano de dados do plano de controle. As redes definidas por software estão trazendo à tona um paradigma onde a rede é controlada de maneira centralizada e programável. Além disso, SDN dá suporte aos diferentes cenários observáveis em uma rede veicular (KHAN; ABOLHASAN; NI, 2018).

Em Hussein et al. (2017), Khan, Abolhasan e Ni (2018), e Duan, Liu e Wang (2017) são propostas arquiteturas de comunicação veicular com redes celulares 5G em combinação com SDN. A Figura 3 ilustra o esquema proposto por Duan, Liu e Wang (2017), onde diversos veículos se comunicam com a rede 5G através de um veículo denominado "*head*". Este é responsável pela comunicação com a uma estação base (BS). A BS acessa os serviços disponíveis na rede através dos *switches OpenFlow*, onde dados de dispositivos, que se comunicam utilizando protocolos diferentes, estão trafegando e disponíveis. Na arquitetura de Duan, Liu e Wang (2017), o plano de controle é formado pelos *switches OpenFlow* e

pelos controladores SDN. O plano de dados é formado pelas estações base e pontos de acesso, além dos próprios veículos.

Figure 3 – Arquitetura 5G-VANET em combinação com SDN



Fonte: Duan, Liu e Wang (2017, p. 123)

É imprescindível que veículos que estejam executando aplicações de ITS estejam conectados em uma rede ubíqua com acesso à *internet*. Contudo, em um ambiente altamente congestionado, a infraestrutura das arquiteturas de comunicação veicular propostas não conseguem atender à requisitos de tempo de latência necessários para que as aplicações de segurança de um ITS possam funcionar da maneira esperada (KHAN; ABOLHASAN; NI, 2018). Por este motivo o desenvolvimento de técnicas que definam o momento correto de realizar o *offloading*, e assim aliviar a rede veicular, tornam-se necessárias.

2.5 *Multi-access Edge Computing* (MEC)

O *Multi-access Edge Computing* (MEC) representa uma abordagem inovadora que desloca as capacidades de computação e armazenamento para mais perto do usuário final, possibilitando que os dados sejam processados na borda da rede, ao invés de serem enviados para um data center centralizado. Esse conceito emergiu em resposta à crescente demanda por baixa latência, alto desempenho e maior eficiência em redes móveis, especialmente em aplicações críticas, como veículos autônomos, Internet das Coisas (IoT), cidades inteligentes e jogos online.

O princípio fundamental do MEC é otimizar o uso da rede ao distribuir a computação, o armazenamento e os serviços em vários nós da borda, próximos aos usuários e dispositivos. Essa arquitetura reduz a latência significativamente, pois os dados podem ser processados localmente, o que é crucial para aplicações que exigem respostas em tempo real. Em uma aplicação de veículos autônomos, por exemplo, decisões como o ajuste de velocidade ou a detecção de objetos precisam ser tomadas em frações de segundo. Enviar esses dados para um servidor centralizado implicaria em um tempo de resposta que, mesmo curto, poderia comprometer a segurança. Com o MEC, o processamento é realizado próximo ao local onde o dado é gerado, permitindo que essas decisões sejam tomadas instantaneamente (RANAWEERA; JURCUT; LIYANAGE, 2021).

A evolução do MEC foi impulsionada pelo desenvolvimento das redes móveis, em especial com o advento do 5G, que ampliou a capacidade de conectar bilhões de dispositivos e aumentou drasticamente a velocidade de transmissão de dados. As redes 5G e, futuramente, as redes 6G, habilitam uma série de novos casos de uso para o MEC, pois permitem que uma infraestrutura descentralizada suporte uma quantidade massiva de dispositivos conectados em tempo real. Em uma cidade inteligente, por exemplo, sensores distribuídos em semáforos, câmeras de segurança e sistemas de transporte geram um enorme volume de dados. A descentralização proporcionada pelo MEC permite que esses dados sejam analisados e respondidos de forma mais ágil, sem congestionar a rede central.

Além disso, o MEC se destaca por sua flexibilidade e capacidade de integração com diversas tecnologias e arquiteturas, como redes veiculares (V2X), realidade aumentada e virtual, e processamento de dados de sensores de IoT. Em redes veiculares, o MEC tem um papel fundamental, pois permite que os veículos e a infraestrutura ao seu redor, como semáforos e câmeras, compartilhem informações em tempo real, o que é essencial para a segurança e para a eficiência do tráfego. Esse nível de integração seria impraticável em uma arquitetura de rede tradicional, na qual todos os dados precisam percorrer um longo caminho até o data center antes de serem processados.

Por fim, o MEC também abre novas possibilidades para as operadoras de telecomunicações, que podem oferecer serviços adicionais com base na proximidade aos seus clientes. A infraestrutura MEC permite que operadoras expandam sua gama de serviços e ofereçam soluções personalizadas para empresas e indústrias, como monitoramento em tempo real de equipamentos, análise de dados local e controle remoto de dispositivos, tudo isso com a garantia de baixa latência e maior controle sobre a segurança e privacidade dos dados (PORAMBAGE et al., 2018).

Em síntese, o MEC representa uma revolução na forma como os dados são gerenciados e processados, movendo a computação e o armazenamento para mais perto do usuário final, o que possibilita uma resposta mais rápida e eficaz às demandas de uma sociedade cada vez mais conectada e dependente de serviços digitais instantâneos. Com o avanço das redes móveis e o surgimento de novas tecnologias, o MEC desempenhará um papel central no futuro das comunicações e no suporte a uma vasta gama de aplicações inovadoras e exigentes.

2.5.1 Arquitetura e Componentes dos Servidores MEC

A arquitetura de servidores MEC foi projetada para trazer o poder de computação e armazenamento para a borda da rede, aproximando-o do usuário final e das fontes de dados. Isso exige uma infraestrutura distribuída e composta por vários componentes integrados que trabalham em conjunto para fornecer baixa latência, alta capacidade de processamento local e escalabilidade. Diferentemente das arquiteturas de computação em nuvem tradicionais, que centralizam o processamento em grandes data centers, o MEC utiliza uma arquitetura distribuída, composta por pequenos centros de processamento localizados próximos aos dispositivos e usuários.

Um servidor MEC típico é composto por diversos elementos, como nós de borda, que são unidades de processamento responsáveis por executar tarefas e aplicações específicas. Estes nós estão posicionados estrategicamente na rede, próximos ao usuário final, e são responsáveis por executar aplicações com demandas de baixa latência, processando dados em tempo real. Cada nó de borda tem capacidade computacional e de armazenamento própria, de modo que os dados são processados localmente, reduzindo a necessidade de tráfego na rede central e agilizando o tempo de resposta (TALEB et al., 2017).

Outro elemento essencial da arquitetura MEC é a conectividade de rede de baixa latência, que conecta os servidores MEC com os dispositivos finais e, em alguns casos, com o núcleo da rede. Essa conectividade é viabilizada por redes móveis 4G, 5G e, no futuro, 6G, que oferecem a largura de banda e a velocidade necessárias para suportar a transferência rápida de dados entre os dispositivos e os servidores MEC. No caso de redes

veiculares, por exemplo, essa conexão de baixa latência é fundamental para a comunicação em tempo real entre veículos e a infraestrutura de trânsito.

A arquitetura também inclui um sistema de gerenciamento e orquestração, que controla os recursos dos servidores MEC, garantindo a alocação eficiente e o balanceamento de carga entre os nós de borda. Esse sistema é essencial para otimizar o desempenho dos serviços e assegurar a continuidade das operações em situações de alta demanda. A orquestração centralizada permite que as operadoras e provedores de serviços gerenciem remotamente os recursos e a capacidade dos servidores, adaptando-os conforme necessário para manter a qualidade do serviço (QoS) e a experiência do usuário. Além disso, o gerenciamento de recursos distribuídos no MEC permite que os serviços sejam escalonados automaticamente para responder a picos de demanda, um recurso valioso em ambientes altamente dinâmicos, como redes veiculares e cidades inteligentes.

Os servidores MEC também integram funções de segurança e privacidade, essenciais para a proteção de dados processados localmente. Como os dados gerados em uma infraestrutura MEC muitas vezes incluem informações sensíveis, como dados de localização e preferências do usuário, é importante garantir que esses dados sejam tratados e protegidos adequadamente. A segurança em MEC inclui a criptografia de dados, autenticação de usuários e monitoramento constante para identificar e mitigar ameaças. O fato de o processamento ser feito na borda também reduz o risco de exposição dos dados, uma vez que menos informações precisam ser enviadas para a nuvem ou o núcleo da rede (ISLAM et al., 2021).

Esses componentes trabalham de forma interconectada para criar uma infraestrutura de borda robusta e versátil, capaz de atender a diferentes necessidades de mercado e a uma ampla gama de aplicações. A arquitetura MEC não apenas melhora a experiência dos usuários finais, mas também representa uma oportunidade para as operadoras de telecomunicações e provedores de serviços oferecerem novas soluções que aproveitam as vantagens da computação distribuída. Em resumo, a arquitetura e os componentes dos servidores MEC formam um ecossistema poderoso e flexível, que redefine a forma como dados e serviços são disponibilizados na borda da rede, possibilitando uma nova era de conectividade de alto desempenho e baixa latência.

2.5.2 Tecnologias e Protocolos em MEC

O MEC envolve diversas tecnologias e protocolos que possibilitam a comunicação eficiente e a interoperabilidade entre dispositivos, servidores de borda e redes centrais. Esses elementos técnicos formam a espinha dorsal de uma infraestrutura MEC funcional, promovendo uma troca de dados rápida e confiável, essencial para aplicações que demandam baixa latência, como redes veiculares, IoT, e experiências de realidade

aumentada.

Entre as tecnologias fundamentais em MEC estão os protocolos de comunicação otimizados para transmissão rápida de dados e baixo consumo de largura de banda. Protocolos leves, como o MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) e o CoAP (*Constrained Application Protocol*), são amplamente utilizados em redes IoT e se aplicam bem à infraestrutura MEC, pois são eficientes para troca de dados em ambientes de baixa capacidade de rede. O MQTT, por exemplo, foi projetado para a transmissão de mensagens em redes com largura de banda limitada e dispositivos com processamento restrito, sendo assim ideal para comunicação de sensores e dispositivos conectados em cenários de borda. Já o CoAP é focado em redes IP e é adaptado para ambientes de IoT com baixa capacidade de transmissão, sendo ideal para cenários onde o processamento de dados ocorre na borda da rede (TALEB et al., 2017).

A interoperabilidade é outro aspecto crítico em MEC, e aqui entram os padrões desenvolvidos pela ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), que estabelece especificações para garantir que sistemas MEC sejam interoperáveis e possam integrar-se de maneira fluida com redes de diferentes operadoras e dispositivos variados. Esses padrões incluem definições de interfaces, APIs e processos para provisionamento e gestão de serviços em MEC, garantindo que soluções de diferentes fornecedores possam operar em conjunto. A abordagem de padronização permite que o MEC seja amplamente implementado, independentemente de restrições proprietárias, promovendo um ecossistema aberto e acessível.

As redes móveis 5G também são uma parte crucial da infraestrutura MEC, uma vez que possibilitam uma conexão de alta velocidade e baixa latência entre os dispositivos e os servidores de borda. As redes 5G foram projetadas com características específicas para dar suporte ao MEC, como o "*network slicing*", que permite a criação de múltiplas redes virtuais sobre a mesma infraestrutura física. Isso é particularmente útil em redes veiculares e outros ambientes dinâmicos, onde diferentes serviços (como segurança e entretenimento) podem ter exigências de rede diferentes. Com o *network slicing*, uma rede pode ser segmentada de forma a garantir qualidade de serviço (QoS) elevada para aplicações críticas, enquanto serviços menos urgentes utilizam fatias de rede menos prioritárias (CAO et al., 2019).

Para gerenciar e orquestrar a complexidade de uma infraestrutura distribuída, o MEC utiliza tecnologias de virtualização, como contêineres e máquinas virtuais (VMs), que permitem que os recursos de computação sejam alocados de forma flexível e adaptável. Ferramentas de orquestração, como o Kubernetes, são frequentemente aplicadas para gerenciar contêineres na borda, permitindo que aplicativos sejam escalonados automaticamente conforme a demanda. Além disso, plataformas como

OpenStack Edge Computing oferecem uma solução para provisionamento e gerenciamento de recursos de maneira escalável, permitindo que operadoras e provedores de serviço otimizem a alocação de recursos na borda.

Por fim, os avanços em segurança e autenticação para o ambiente MEC são também vitais, já que a proximidade do processamento de dados ao usuário aumenta a exposição a potenciais ameaças. Protocolos de segurança como TLS (*Transport Layer Security*) e DTLS (*Datagram Transport Layer Security*) são frequentemente utilizados para garantir que a troca de dados entre dispositivos e servidores MEC seja criptografada. Além disso, tecnologias de autenticação como OAuth e certificados digitais são empregadas para autenticar dispositivos e usuários na borda, garantindo que apenas dispositivos autorizados acessem os serviços.

Assim, o MEC integra uma gama variada de tecnologias e protocolos, que juntos viabilizam uma infraestrutura de borda robusta, escalável e segura. A combinação desses elementos técnicos permite que o MEC entregue serviços inovadores, apoiando a expansão de uma sociedade conectada onde aplicações críticas e de baixa latência se tornam cada vez mais comuns.

2.5.3 Casos de Uso e Aplicações dos Servidores MEC

Os servidores MEC oferecem suporte para uma ampla gama de casos de uso e aplicações, especialmente aqueles que requerem baixa latência, processamento local de dados e comunicação em tempo real. Esses casos de uso abrangem setores variados, como cidades inteligentes, saúde, entretenimento, veículos autônomos e segurança pública. Em cidades inteligentes, o MEC permite que dados de sensores urbanos, como câmeras e sensores de tráfego, sejam processados localmente para otimizar a gestão de trânsito, monitoramento ambiental e serviços de segurança. Essa proximidade do processamento dos dados permite que decisões sejam tomadas rapidamente e adaptadas ao contexto local, melhorando a eficiência e a resposta aos eventos da cidade.

No setor de saúde, o MEC é usado em aplicações de telemedicina e monitoramento remoto de pacientes, onde a latência é um fator crítico. Dispositivos médicos conectados podem enviar dados para servidores na borda, onde são analisados em tempo real para detectar anomalias e alertar profissionais de saúde, caso necessário. Isso é especialmente importante para monitoramento de condições crônicas e situações de emergência, onde o tempo de resposta pode ser vital. Além disso, o processamento na borda garante que dados de saúde sensíveis sejam mantidos localmente, reduzindo riscos de privacidade (LIANG; GREGORY; LI, 2022) .

Em entretenimento e realidade aumentada/virtual (AR/VR), o MEC melhora

significativamente a experiência do usuário ao reduzir o tempo de resposta entre as ações dos usuários e o retorno do sistema. Jogos online, *streaming* de vídeo de alta qualidade e aplicações de AR/VR se beneficiam de servidores MEC, pois a latência é minimizada e o tráfego para data centers centrais é reduzido. A computação na borda também permite que conteúdos personalizados sejam oferecidos aos usuários, aumentando a imersão e a interatividade (TALEB et al., 2017).

Um dos casos mais promissores para o MEC é nas redes veiculares, onde sua integração com a tecnologia V2X (*Vehicle-to-Everything*) tem o potencial de revolucionar o transporte e a segurança no trânsito. Os veículos conectados e autônomos exigem uma troca de informações rápida e precisa para operar de forma segura e eficaz. O MEC torna isso possível ao reduzir drasticamente a latência e permitir que os dados dos veículos sejam processados localmente. Além disso, o MEC permite que grandes volumes de dados, como aqueles capturados por câmeras, LIDAR e radares dos veículos, sejam processados e analisados na borda, sem necessidade de enviar tudo para um servidor central. Isso reduz o congestionamento da rede e acelera a tomada de decisões, o que é essencial para sistemas de prevenção de colisões e detecção de pedestres.

A arquitetura MEC também possibilita a integração direta com redes V2X, suportando comunicações *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I), *Vehicle-to-Vehicle* (V2V) e *Vehicle-to-Pedestrian* (V2P), entre outras. Essa integração permite que os veículos compartilhem informações sobre condições da estrada, presença de outros veículos e localização de pedestres em tempo real, o que é fundamental para o funcionamento seguro de veículos autônomos. A proximidade do processamento de dados também contribui para uma utilização mais eficiente dos recursos da rede, pois o MEC permite que as informações sejam processadas rapidamente e enviadas de volta aos veículos, economizando largura de banda e energia dos dispositivos. Isso é especialmente relevante para redes veiculares, onde a carga de trabalho e o número de dispositivos conectados podem variar rapidamente com o movimento dos veículos (HSIEH; CHEN; BENSLIMANE, 2018).

Outro desafio das redes veiculares é a alta mobilidade dos veículos, que podem se deslocar entre diferentes células de cobertura em questão de segundos. O MEC facilita essa transição contínua de dados entre células, mantendo a qualidade do serviço e minimizando a perda de comunicação em situações de alta mobilidade. Isso é crucial para garantir que os veículos autônomos tenham uma visão contínua e precisa do ambiente ao seu redor, permitindo uma operação segura em condições de trânsito dinâmicas.

Além de melhorar a eficiência, o MEC oferece também uma camada extra de segurança e privacidade para redes veiculares. Ao processar dados na borda, reduz-se a necessidade de transferir informações sensíveis para o núcleo da rede, minimizando o risco de exposição de dados pessoais e vulnerabilidades. Essa arquitetura distribuída permite

que os dados de veículos e pedestres sejam tratados de maneira mais controlada e segura, garantindo que apenas informações essenciais sejam compartilhadas com a infraestrutura central (ISLAM et al., 2021).

Assim, o MEC é uma tecnologia essencial para diversas aplicações modernas e emergentes, desempenhando um papel central na transformação de setores que exigem comunicação em tempo real, eficiência e segurança aprimoradas. Sua aplicação em redes veiculares, em especial, ilustra o potencial do MEC para atender a demandas de baixa latência e alto desempenho, fundamentais para a segurança e a evolução dos veículos conectados e autônomos.

2.6 Trabalhos Relacionados

Os trabalhos descritos na literatura que se relacionam com esta pesquisa são apresentados nesta seção. Algumas pesquisas existentes tem se concentrado em melhorar a eficácia das redes e comunicações veiculares, conforme listado a seguir.

O estudo de *broadcast* em redes veiculares é fundamental no contexto de *offloading*, pois a eficiência na disseminação de mensagens impacta diretamente a utilização dos recursos computacionais e a qualidade do serviço em aplicações baseadas em MEC (Multi-access Edge Computing). Protocolos de *broadcast* otimizados, capazes de mitigar problemas como redundância excessiva e tempestade de mensagens, garantem que informações críticas sejam disseminadas de maneira eficiente, reduzindo atrasos e o consumo de recursos na comunicação entre veículos e servidores MEC, e por isso foram estudados também algoritmos de *broadcast*, em redes veiculares, durante o desenvolvimento deste trabalho.

No estudo conduzido por (LIMA et al., 2015), os pesquisadores propõem um protocolo probabilístico e temporal para enfrentar o desafio da tempestade de *broadcast* em Redes Veiculares (VANETs). Esse protocolo utiliza como critérios fundamentais a quantidade de vizinhos em comum e a distância entre o emissor e o receptor. Em uma pesquisa subsequente, (LIMA; JÚNIOR, 2016) incorpora recompensas e penalidades para os veículos vizinhos, empregando a Teoria dos Jogos. Ambos os estudos, (LIMA et al., 2015) e (LIMA; JÚNIOR, 2016), demonstraram em seus resultados taxas consideráveis de redundância, aproximando-se das observadas no protocolo *Blind Flooding* e sendo as mais elevadas entre os trabalhos comparados. A maioria dos trabalhos anteriores voltados para a mitigação da tempestade de *broadcast* são discutidos em (LIMA; JÚNIOR, 2016), conforme detalhado na Tabela 1.

O protocolo *AutoCast* adota uma abordagem semelhante ao protocolo OAPB (ALSHAER; HORLAIT, 2005), que utiliza zonas vizinhas para calcular a probabilidade

Table 1 – Protocolos de *Broadcast*

Protocolo	Problemas
<i>AutoCast</i>	Não funciona quando o valor de Nh é menor que 5
<i>Blind Flooding</i>	Não escalável e produz a tempestade de <i>broadcast</i>
<i>Irresponsible Forwarding</i>	Descarta irresponsavelmente os pacotes
<i>Weighted p-persistence</i>	Considera um raio de transmissão fornecido por veículos e não verifica pacotes encaminhados por outros veículos na rede
<i>E-probT</i>	Taxa de entrega inferior a 75% em cenários de tráfego moderado e baixo

p . O valor resultante para p está vinculado à quantidade de veículos vizinhos alcançáveis por uma ou duas transmissões. Após esse cálculo, o protocolo determina intervalos de tempo de espera para retransmitir o pacote. Essa medida é obtida multiplicando dois fatores: p e uma variável aleatória, além de uma constante representando o intervalo máximo de espera. O *AutoCast* realiza o cálculo da probabilidade de encaminhamento considerando diversas densidades de vizinhos, baseando-se no número de veículos na vizinhança acessíveis por meio de um salto (Nh). Entretanto, o protocolo enfrenta críticas, conforme apontado em (PANICHPAPIBOON; PATTARA-ATIKOM, 2012), devido à sua ineficácia quando o valor de Nh é inferior a 5. Além disso, os resultados de experimentos revelaram uma baixa taxa de entrega, não atingindo sequer 25%.

A técnica BF (*Flood Blind*) é considerada a maneira mais simples de enviar dados por difusão. Ao receber um pacote, o nó verifica se o mesmo já foi recebido, se sim, descarta o pacote; caso contrário, retransmite o mesmo sem qualquer critério de seleção. Pesquisas mostram que esta técnica é ineficiente, não possui escalabilidade e produz a indesejada tempestade de *broadcast* (SAEED et al., 2018).

A abordagem BF (*Flood Blind*) é reconhecida como a forma mais simples de transmitir dados por difusão. Nessa técnica, ao receber um pacote, o nó verifica se já o recebeu anteriormente. Se sim, o pacote é descartado; caso contrário, o nó o retransmite sem critérios de seleção. Estudos indicam que essa técnica é ineficiente, carece de escalabilidade e resulta na indesejada tempestade de transmissão (SAEED et al., 2018).

No caso da primeira estratégia do IF (*Irresponsible Forwarding*), a consideração principal é a distância entre o emissor e o receptor. Já a segunda estratégia utiliza a distribuição estatística dos veículos para calcular a probabilidade p . Quando um veículo recebe um pacote, ele avalia a probabilidade de outro veículo, mais distante do emissor, ter uma probabilidade de encaminhamento superior. Se não houver tal veículo, o receptor realiza o encaminhamento; caso contrário, o veículo descarta o pacote sem encaminhá-lo de forma irresponsável. Conforme os resultados obtidos, esse protocolo apresenta a menor taxa de entrega entre os trabalhos existentes, aproximando-se de 10%.

O *Weighted p-persistence* utiliza a distância até o possível receptor e sua faixa de

transmissão para calcular a probabilidade de encaminhamento. Conforme os resultados apresentados, a probabilidade de encaminhamento aumenta à medida que o receptor está mais distante do emissor (SHARSHEMBIEV; YOO; ELMAHDI, 2018).

Ao integrar técnicas avançadas de disseminação de dados com estratégias de *offloading*, como seleção de nós retransmissores e controle de congestionamento, é possível não apenas melhorar a entrega de pacotes em cenários dinâmicos, mas também equilibrar a carga computacional em servidores distribuídos. Dessa forma, os trabalhos abordados, que se concentram em protocolos de *broadcast*, são essenciais para entender e propor soluções que possam ser acopladas às estratégias de *offloading*, como aquelas discutidas nos demais trabalhos de referência que exploram diretamente a eficiência do *offloading* em redes veiculares, apresentados a seguir.

Os autores de (YU et al., 2017) propuseram o HetCast, um mecanismo colaborativo de transmissão de dados para usuários de veículos que utiliza tanto redes celulares LTE quanto IEEE 802.11p. O objetivo é usar a rede IEEE 802.11p para descarregar o tráfego de dados LTE através de transmissão de dados baseada em RSU, com base na popularidade dos dados. O método proposto divide os dados em categorias populares e impopulares, transmitindo dados populares a partir das RSUs, enquanto os dados impopulares são recebidos via LTE. Os autores também propuseram três esquemas para estabelecer uma programação de transmissão global, incluindo um esquema de programação de RSU independente, um esquema de programação de RSU colaborativa e um esquema de programação de RSU colaborativa com antecipação. Os resultados das simulações mostraram que o método proposto pode reduzir efetivamente a carga de tráfego na rede celular LTE e melhorar a eficiência de download.

Em (HUANG et al., 2018), os autores propuseram um esquema de descarregamento consciente de QoS para resolver o problema de congestionamento de dados em redes celulares. A solução descarrega dados tolerantes a atrasos para componentes da rede veicular, como veículos e RSUs. O esquema proposto envolve a divisão dos dados tolerantes a atrasos em blocos de dados (DBs) de tamanho igual e seu armazenamento no veículo/RSU atual ou entrega ao próximo dispositivo de salto. O processo de tomada de decisão do próximo dispositivo de salto é formulado como um problema de otimização usando um processo de decisão de Markov parcialmente observável (POMDP). Os resultados experimentais demonstram que o esquema dos autores melhora significativamente o desempenho quando comparado a outros esquemas considerados. A eficácia do esquema em aliviar o congestionamento em redes celulares é demonstrada por sua capacidade de descarregar dados tolerantes a atrasos para os recursos da rede veicular. O uso de POMDP para a tomada de decisões garante que o próximo dispositivo de salto tome decisões ótimas com base em sua observação parcial do estado do sistema.

Em (SI et al., 2016), os autores propuseram um algoritmo adaptativo para a tomada de decisões de descarregamento de dados em redes veiculares, considerando tanto o custo quanto o atraso de estações base celulares (BS) e pontos de acesso Wi-Fi de beira de estrada (APs). O algoritmo foi desenvolvido levando em consideração que os usuários preferem redes gratuitas e desejam um tempo de espera mínimo para download. Para resolver o problema de tomada de decisão, o algoritmo proposto estimou o tempo de encontro entre um veículo e um AP Wi-Fi, e então o veículo escolheu a melhor estratégia de download com base na estimativa. No entanto, como a situação atual pode diferir da estimativa original, por exemplo, se um veículo encontrar um AP Wi-Fi mais cedo do que o esperado, o algoritmo proposto ajusta dinamicamente o tempo de espera estimado e a estratégia de descarregamento atualmente adotada. Os resultados experimentais mostraram que o método proposto pode alcançar uma melhor satisfação do usuário em comparação com outros métodos. Em resumo, o algoritmo adaptativo dos autores considera as preferências dos usuários e as oportunidades de encontro com APs Wi-Fi, resultando em um desempenho aprimorado de download de dados em redes veiculares.

Os trabalhos mencionados anteriormente pertencem ao cenário tradicional de V2I, que considera o descarregamento de dados em apenas um salto. Nosso trabalho proposto adota um caminho multi-hop VVR (Veículo-para-Veículo-para-Beira de Estrada) para realizar o descarregamento.

No cenário tradicional de V2I, o descarregamento é realizado através de um link de comunicação direto entre um veículo e um nó de infraestrutura. Essa abordagem é frequentemente limitada pelo alcance de comunicação do nó de infraestrutura e pode resultar em congestionamento de rede e baixo desempenho. Em contraste, um caminho multi-hop VVR define que os veículos retransmitem os dados entre si até alcançarem uma unidade de beira de estrada que possa enviar os dados para a internet ou outras redes. Ao utilizar uma abordagem multi-hop, as limitações do cenário tradicional de V2I podem ser superadas, melhorando o desempenho da rede. Os veículos podem se comunicar entre si em distâncias mais longas, e a carga de trabalho é distribuída entre vários nós, reduzindo o risco de congestionamento.

Foi proposto um quadro de tomada de decisão inovador para o descarregamento de dados para dois tipos de servidores: servidores MEC terrestres e servidores MEC montados em veículos aéreos não tripulados (VANTs), que possuem características e capacidades distintas (APOSTOLOPOULOS et al., 2021). Neste esquema proposto, os usuários têm a opção de descarregar parcialmente seus dados para um ambiente MEC complexo, considerando a latência e os requisitos de energia. Eles podem usar uma tomada de decisão teórica prospectiva para maximizar a utilidade percebida e reduzir o tempo e o consumo de energia por servidores MEC terrestres. Resultados numéricos mostraram que o quadro proposto opera bem e o método supera outros métodos comparados no estudo.

Em (XUE; AN, 2021), os autores investigaram como melhorar a capacidade de acesso ao MEC e aumentar a eficiência de utilização do espectro estudando o problema de descarregamento de tarefas e alocação de recursos. A ideia principal proposta foi maximizar a capacidade de processamento do MEC como um objetivo de otimização em um cenário de múltiplos usuários, múltiplas tarefas e múltiplos servidores. A abordagem proposta dividiu o problema de programação não linear de números inteiros mistos (MINLP) em um problema de alocação de recursos e um problema de alocação de tarefas. Além disso, o problema de alocação de recursos foi dividido em alocação de recursos de computação e alocação de recursos de comunicação. Para lidar com esses problemas, os autores propuseram um algoritmo de correspondência subótima de baixa complexidade para alocação de subcanais para maximizar a eficiência do descarregamento de tarefas.

O trabalho desenvolvido em (CHEN et al., 2020) abordou a alocação conjunta de recursos de espectro, computação e armazenamento em uma rede veicular baseada em computação de borda multiacesso (MEC). Duas arquiteturas típicas de MEC foram consideradas, e problemas de otimização de recursos multidimensionais foram formulados. Os autores utilizaram os problemas de otimização com o objetivo de maximizar o número de tarefas descarregadas enquanto atendiam aos requisitos de qualidade de serviço (QoS), considerando as quantidades limitadas de recursos disponíveis de espectro, computação e armazenamento. Para alcançar a alocação ideal de espectro entre as estações base e a alocação ideal de espectro, computação e armazenamento entre os veículos, os autores transformaram os problemas de otimização em um problema de Aprendizado por Reforço Profundo e propuseram um algoritmo baseado em gradientes de política determinística profunda para resolvê-los.

Enquanto os trabalhos apresentados anteriormente se concentraram no descarregamento por meio de servidores MEC, nosso trabalho proposto foca no descarregamento de dados por meio de RSUs, transferindo o tráfego de dados da rede celular 4G/5G para a rede veicular IEEE 802.11p com a assistência de servidores MEC. Ao contrário da abordagem de computação distribuída utilizada na Rede Ad Hoc Veicular (VANET) tradicional para encontrar o caminho V2V de k saltos, nosso trabalho proposto adota uma abordagem de computação centralizada, que pode ser alcançada com a ajuda do servidor MEC.

Em (HUANG; LIN; WU, 2020), foi proposto um método para descarregamento de dados veiculares, chamado de seleção de caminho de descarregamento VVR, baseado no limite de tempo de retransmissão do destino, que utiliza uma abordagem de Computação de Borda Móvel (MEC) em vez do método tradicional de descarregamento V2I. O método proposto visa realizar o descarregamento de dados usando a RSU X , n saltos de distância, selecionando o caminho de descarregamento de dados VVR mais adequado. Para alcançar isso, o servidor MEC recebe relatórios de contexto periódicos dos veículos e utiliza

mecanismos de detecção e redução (DAS), detecção e extensão (DAE) e recuperação de caminho para construir e manter o caminho de descarregamento de dados VVR. Os mecanismos DAS e DAE utilizam a reeleição de AD (Agente de Descarregamento) para reconstruir o caminho de descarregamento de dados VVR quando o veículo de origem entra ou sai do alcance do sinal da RSU à frente ou atrás dele. Além disso, o mecanismo de recuperação de caminho é acionado para manter o descarregamento de dados VVR se um veículo na rota de retransmissão se desviar do caminho de descarregamento de dados VVR. Em resumo, o método proposto visa melhorar o descarregamento de dados veiculares utilizando uma abordagem baseada em MEC que seleciona o caminho de descarregamento de dados VVR mais adequado e mantém o descarregamento usando a RSU X sempre que possível.

Os autores do artigo (HUANG; LAI, 2020) propuseram um método inovador chamado Método de Construção de Caminho de Descarregamento de Dados VVR baseado em Utilidade Limitada e de k -saltos com Restrição de Atraso (DC-KUPC). Este método é baseado em MEC e é usado para encontrar o melhor caminho de descarregamento de dados VVR entre um veículo de origem e uma RSU, considerando um período de tempo com uma restrição de atraso. Para implementar este método, o servidor MEC recebe um relatório de contexto do veículo de origem no ponto de tempo t_r e, em seguida, calcula todos os caminhos de descarregamento de dados VVR possíveis entre o veículo de origem e a RSU Y dentro de um período de tempo de $t_r + T$. T representa o período de tempo com restrição de atraso e, durante esse tempo, o servidor MEC busca todos os caminhos de descarregamento de dados VVR candidatos que satisfaçam a restrição de atraso.

Uma função de utilidade é então usada para derivar a qualidade de cada caminho de descarregamento de dados VVR candidato. A função de utilidade leva em consideração vários fatores, como comprimento do caminho, largura de banda e intensidade do sinal. Finalmente, o método DC-KUPC seleciona o caminho de descarregamento de dados VVR com o maior valor de utilidade como o melhor caminho de descarregamento de dados VVR. Comparado com o método baseado na duração proposto em (HUSNAIN; ANWAR; SHAHZAD, 2023), que considera apenas a duração do caminho sem levar em conta a qualidade da rede do caminho, o método DC-KUPC proposto alcança um desempenho melhor no descarregamento de dados. Resultados de simulação demonstram que o método baseado em utilidade proposto pode melhorar significativamente o desempenho do descarregamento de dados em sistemas VVR.

O artigo (SONG et al., 2023b) propõe o método de "*Predicted Utility-centric Path Switching*" (PUPS) para descarregamento de dados em múltiplos saltos (k -hop) no contexto de comunicações V2V, utilizando um controlador de redes definidas por software (SDN) dentro da arquitetura de computação de borda de acesso múltiplo (MEC). O objetivo é melhorar a eficiência do descarregamento de dados entre veículos que geralmente se

comunicam através de estações base (BSs) de redes 4G/5G.

No método PUPS, dois veículos comunicam seus dados regularmente através de BSs e enviam informações de contexto ao servidor MEC, que, com o controlador SDN, prevê caminhos de descarregamento de dados via V2V em múltiplos saltos. A partir dessas informações, o controlador SDN calcula os caminhos de descarregamento mais viáveis, possibilitando a troca de dados sem utilizar a rede celular. Quando um caminho V2V de múltiplos saltos é encontrado, os veículos constituem a rota de transmissão de dados, enquanto o plano de controle é gerenciado pelo controlador SDN do servidor MEC.

O servidor MEC também tem a capacidade de notificar os veículos para alternar para um caminho de descarregamento V2V de melhor utilidade (previsto para existir no futuro), maximizando a eficiência da comunicação. Os resultados de avaliação de desempenho indicam que o método PUPS oferece maior fração de descarregamento de dados, menor taxa de perda de dados e maior tempo de serviço de descarregamento, especialmente em cenários com maior limite de saltos e diferentes densidades de veículos. O método não considera o consumo de energia e nem trocas de RSUs durante o descarregamento.

O artigo (CHOI; LIM, 2023) propõe um método de descarregamento de tarefas e agendamento de trabalhos baseado em computação em nuvem e borda para sistemas IoV (Internet of Vehicles). Ele visa melhorar a qualidade do serviço ao reduzir a latência e congestionamento. Utilizando informações de localização e comunicações V2V (veículo a veículo), o método otimiza a posição de descarregamento e usa a otimização por colônia de formigas (ACO) para encontrar a melhor estratégia. O método não considera múltiplas RSUs.

O trabalho (DAI, 2023) aborda a otimização conjunta de descarregamento de tarefas, alocação de recursos e *caching* de dados em uma rede veicular assistida por MEC (*Mobile Edge Computing*). Ele visa minimizar o custo total para os veículos, garantindo alta qualidade de serviço (QoS) ao lidar com tarefas sensíveis a atrasos e com uso intensivo de computação. O problema é formulado como um *Mixed-Integer Non-Linear Programming* (MINLP), e é resolvido utilizando um algoritmo por otimização por enxame de partículas binárias (BPSO). Simulações mostram que o esquema proposto reduz os custos em comparação a outras abordagens.

O artigo (RASHID et al., 2023) propõe uma estratégia centralizada para o posicionamento de RSUs em redes veiculares ad hoc, visando melhorar a comunicação em cenários de multi-hop. O foco é monitorar e controlar a densidade do tráfego de veículos usando parâmetros como taxa de transmissão e localização. A estratégia proposta, chamada CRDSMV, apresentou melhor desempenho em simulações, reduzindo a latência e o overhead de roteamento, além de aumentar a taxa de entrega de pacotes e o *throughput*,

quando comparada a métodos anteriores, mas não trata quando um veículo sai do alcance da RSU escolhida e entra no alcance de outra RSU.

O trabalho apresentado em (WANG et al., 2023) aborda a otimização do descarregamento de tarefas e *cache* de conteúdo no contexto da Internet dos Veículos (IoV), visando melhorar a experiência de viagem. O trabalho propõe um método conjunto de otimização de descarregamento de tarefas e cache de conteúdo, denominado TOCC, baseado na previsão de fluxos de tráfego. Primeiro, são extraídas correlações temporais e espaciais dos dados usando a ferramenta FOST (*Forecasting Open Source Tool*) para prever os fluxos de tráfego e calcular o número de tarefas futuras em uma determinada região. O problema multiobjetivo de minimizar latência e consumo de energia é então decomposto em problemas de objetivo único por meio de um Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo baseado em Decomposição (MOEA/D) aprimorado, utilizando o método de agregação de pesos de Tchebycheff, gerando um conjunto de soluções ótimas de Pareto. Os resultados experimentais demonstram que a estratégia TOCC é eficaz, superando outros métodos, com uma latência menor e um consumo de energia menor, mas não considera múltiplas RSUs, nem a troca de RSU quando o enlace é perdido entre veículo e RSU.

Em (SONG et al., 2023a) os autores propõem um algoritmo de descarregamento de tarefas baseado na otimização dingo (DDOA) em redes de multihop habilitadas para comunicação V2V e V2I. Os autores constroem uma arquitetura de computação de borda com comunicações multihop V2V/V2I, onde veículos e RSUs colaboram para ampliar os recursos de comunicação. A estratégia de seleção de nós de descarregamento utiliza uma tabela de adjacência de veículos e um esquema de busca em profundidade otimizada para encontrar o caminho multihop ideal. Além disso, o artigo propõe um esquema de descarregamento baseado no algoritmo DDOA, que minimiza o tempo de processamento de tarefas. No DDOA, cada "dingo" escolhe entre estratégias de grupo, acelerando a convergência por meio de uma regra de sobrevivência. Os resultados experimentais mostram que o algoritmo proposto supera outros métodos, reduzindo o tempo de atraso em até 80%.

Considerando o descarregamento em um ambiente com múltiplas RSUs e n saltos, três trabalhos são apresentados na literatura. Os três trabalhos descritos a seguir não consideram a energia para calcular a melhor rota, nem o tempo necessário para a transmissão dos dados. Eles também não consideram o tempo de transmissão do caminho de descarregamento de dados VVR, tornando-os inadequados para soluções em tempo real. Um desses trabalhos apresenta um método chamado Predicted K-hop-limited Multi-RSU-considered (PKMR) para descarregamento de dados de unidade veicular-para-veicular-para-RSU (VVR) em um ambiente de computação de borda multiacesso (MEC). O método utiliza um controlador de Rede Definida por Software (SDN) dentro do servidor MEC para gerenciar o processo de descarregamento. Considerando os caminhos previstos e as

condições de rede dos veículos e das unidades de borda (RSUs), o método PKMR seleciona o caminho de descarregamento de dados VVR mais adequado. A avaliação de desempenho mostra que o PKMR supera os métodos tradicionais de auto-d Descarregamento. O método proposto aborda desafios relacionados à implantação de múltiplas RSUs, sobreposição de sinais de RSU e descarregamento de dados (LIN; HUANG; WU, 2022). No entanto, não considera o consumo de energia para calcular a melhor rota, nem o tempo necessário para a transmissão dos dados, tornando-o inadequado para soluções em tempo real.

No trabalho apresentado em (CHOI; LIM, 2023), os autores propõem uma arquitetura de sistema multiusuário e multi-RSU baseada na Internet dos Veículos (IoV) utilizando SDN. Para reduzir o atraso no descarregamento em IoV, uma abordagem conjunta é proposta para otimizar a taxa de descarregamento, as decisões de descarregamento e a alocação de recursos. A solução propõe o uso de RSUs para computar atividades da rede veicular, a fim de equilibrar a utilização dos recursos computacionais entre a rede veicular e as RSUs. Embora o trabalho proponha o uso de múltiplas RSUs, ele não aborda o caso em que os sinais das RSUs se sobrepõem. Também não trata da reeleição de um novo caminho se houver uma desconexão dos veículos que fazem parte do caminho de descarregamento.

O trabalho apresentado em (ZENG; ZHANG; WU, 2024) aborda a complexidade do descarregamento de tarefas em um cenário de veículos conectados, onde a movimentação dos veículos resulta na troca de RSUs e servidores. Essa dinâmica pode gerar falhas no descarregamento de tarefas ou aumentar os atrasos nos serviços oferecidos. Para enfrentar esses desafios, os autores propõem um modelo preditivo baseado em uma rede neural Bi-LSTM para antecipar as trajetórias dos veículos. Essa abordagem se traduz na divisão da área de serviço em grades de tamanhos iguais, permitindo que a precisão das previsões seja avaliada de forma mais eficaz. Além disso, o estudo introduz uma estratégia de agendamento para otimização de atrasos, onde dados necessários para a execução de tarefas são pré-carregados em servidores candidatos, mitigando os efeitos de desvios nas previsões e melhorando a eficiência do processo de descarregamento. Os resultados da simulação demonstraram que a estratégia proposta oferece um desempenho superior em comparação com abordagens clássicas. Entretanto, o trabalho apresenta algumas limitações que merecem consideração. Embora a utilização de um modelo preditivo de trajetórias de veículos seja um passo importante para reduzir os atrasos de descarregamento, o sucesso dessa abordagem depende fortemente da precisão das previsões. Fatores como as características variáveis dos veículos, as interações entre veículos circundantes e as condições de tráfego podem influenciar as trajetórias reais, gerando desvios significativos em relação às previsões. Além disso, a pesquisa não explora em profundidade as implicações do aumento dos custos de recursos associados ao pré-carregamento de dados, um aspecto que pode impactar a viabilidade econômica da

implementação da estratégia proposta em larga escala. Por último, não considera rotas energeticamente mais eficientes e também não considera a sobreposição de RSUs. O estudo sugere que pesquisas futuras devem considerar essas variáveis adicionais para aprimorar ainda mais a precisão das previsões e, assim, otimizar o descarregamento de tarefas em ambientes dinâmicos de veículos conectados.

2.7 Problemas Identificados

Algumas das principais preocupações nos métodos existentes são as seguintes:

- Alguns trabalhos utilizam o cenário tradicional V2I, o que significa descarregamento considerando apenas um salto.
- Alguns métodos metaheurísticos podem ser implementados para maximizar a utilização dos recursos e também podem ser distribuídos para outros nós (BHARANY et al., 2023).
- Alguns dos trabalhos apresentados anteriormente focaram apenas no descarregamento através de servidores MEC.
- Abordagens alternativas na exploração e definição das áreas críticas são reduzidas a regiões retangulares, o que não é aplicável em alguns cenários. Além disso, uma abordagem estendida pode ser feita para encontrar outras aplicações para melhorar a viabilidade do conteúdo e reduzir o tráfego de retorno [7] (SOUZA et al., 2019).
- Os trabalhos apresentados para múltiplas RSUs não consideram o consumo de energia nem o tempo necessário para a transmissão dos dados, tornando-os impraticáveis para soluções em tempo real.

2.8 Considerações Finais

Este capítulo descreveu os conceitos fundamentais usados neste projeto de tese, os conceitos gerais de VANETs, Redes Complexas, Algoritmo K-means, 5G, MEC, *offloading* e revisão bibliográfica. Os principais problemas da literatura foram relacionados e, a partir deles, os objetivos deste trabalho foram traçados. A proposta detalhada, assim como simulações, resultados e conclusões estão nos capítulos a seguir.

3 ALGORITMO BASEADO DE PREVISÃO DE ROTAS MULTI-HOP PARA OFFLOADING EM REDES VEICULARES

3.1 Visão geral

Este capítulo apresenta a solução desenvolvida. A solução proposta envolve o desenvolvimento de alguns algoritmos. O principal deles é o algoritmo para offloading em redes veiculares, considerando múltiplos saltos em cenário de sobreposição de RSUs denominado PE-MHMR (*Predicted Energetic multi-hop multi-RSU*). O PE-MHMR utiliza vários algoritmos intermediários, também propostos neste trabalho, que serão descritos neste capítulo.

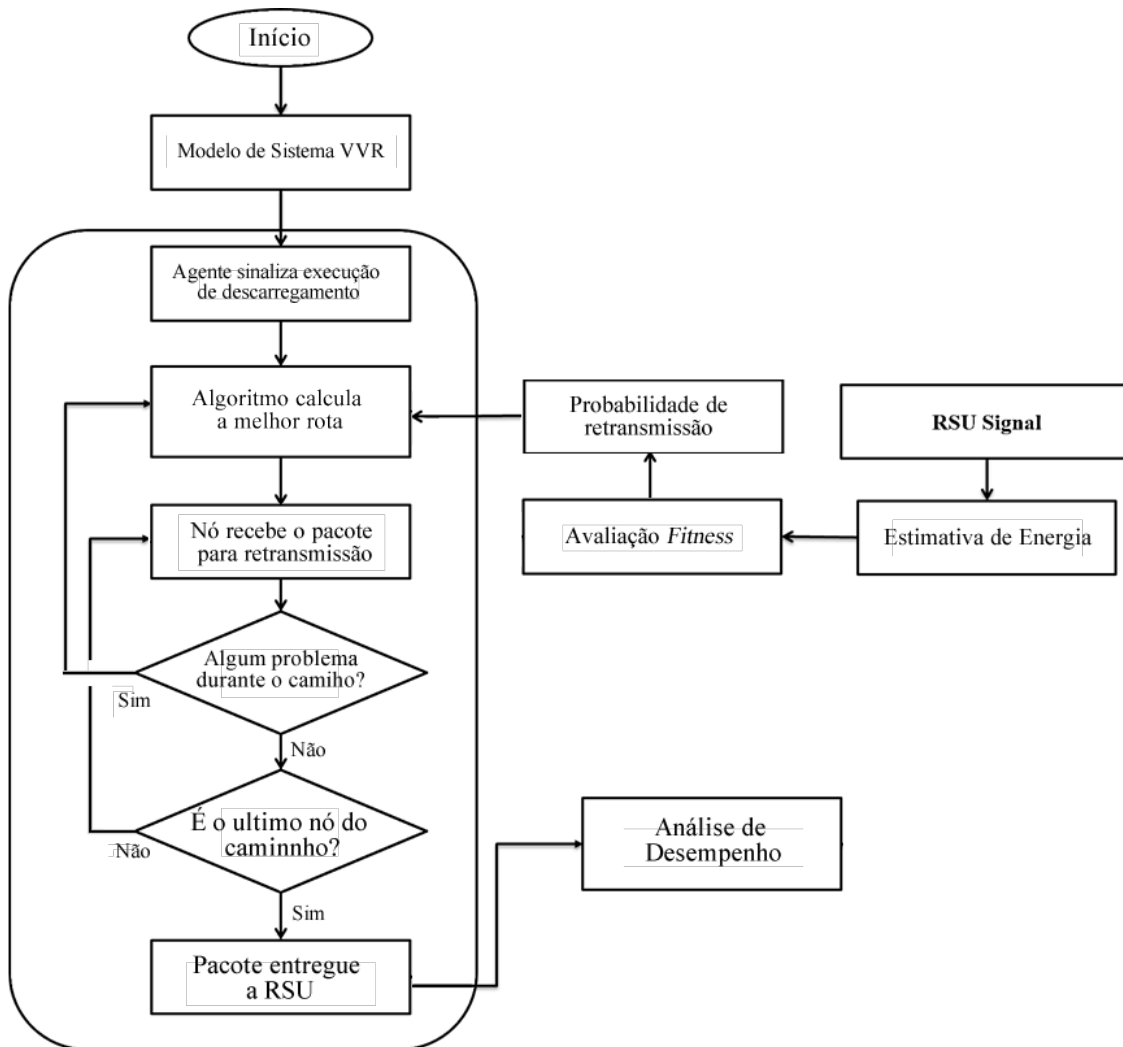
A comunicação veicular sem fio pode utilizar o apoio de RSUs para realizar comunicações de curto alcance, operando em uma faixa de espectro reduzida. O algoritmo proposto prioriza as RSUs como destino para descarregamento de dados veiculares. Ele traça rotas entre o veículo que vai descarregar dados e a RSU, calculando o caminho mais eficiente, através de redes complexas e parâmetros de qualidade. A ação de encaminhamento é denominada VVR (Veículo para Veículo para RSU) (LIN; HUANG; WU, 2022). Nela, os dados são transferidos de nós veículos para outros nós veículos, até o destino escolhido, uma RSU. O algoritmo traça rotas que devem ser energeticamente eficientes. Ao chegar ao nó veículo final da rota, acontece o descarregamento previsto na ação VVR.

A representação diagramática do principal algoritmo proposto, o PE-MHMR, está mostrada na Figura 4. Pode-se ver, no diagrama, que o primeiro passo é a inicialização do agente, nome dado ao nó veículo inicial que deseja realizar o descarregamento de dados para a RSU. Quando um agente inicializa o processo de descarregamento, a melhor rota é calculada com base na avaliação externa da qualidade do sinal da RSU, na estimativa de energia e na qualidade de enlace entre veículos, calculada usando métricas de rede complexas. A probabilidade de retransmissão com sucesso, durante a escolha do melhor caminho, é calculada para cada nó candidato a fazer parte do caminho VVR. Todos esses cálculos serão detalhados nas próximas seções.

Escolhida a melhor rota, o processo de retransmissão de pacotes para o descarregamento é realizado: um nó retransmite para o próximo nó da rota definida. Caso ocorra algum problema durante a retransmissão, faz-se necessário recalcular uma nova rota. A análise de desempenho do algoritmo é feita sobre todos os dados coletados: consumo de energia, largura de banda, *throughput*, atraso e taxa de entrega de pacotes.

Todos os estados do algoritmo serão detalhadamente explicados na seção 3.2.

Figure 4 – Diagrama funcional da solução proposta



Fonte: do autor

3.2 Algoritmo Proposto

O algoritmo PE-MHMR compreende quatro estados. O único estado obrigatório é o de inicialização. Os demais ocorrem em situações específicas, devido à constante movimentação de veículos, implicando em mudanças de tráfego e rota. Os estados são descritos a seguir. A meta é a escolha dos melhores enlaces para que a transmissão de dados entre o Vs (*vehicle source*) e a RSU aconteça de maneira rápida e eficiente. Os melhores enlaces são os que apresentam maior disponibilidade energética, menor atraso médio, maior taxa de entrega e de precisão, além da menor probabilidade de recálculo de rota.

1. Estado de Inicialização: Neste estado, o nó veículo agente, chamado de Vs (*Vehicular*

source), requisita uma rota, ao servidor MEC, para realizar o descarregamento V2V2I (*Vehicle-to-Vehicle-to-Infrastructure*). O servidor MEC calcula a rota através da medida de qualidade do enlace, eficiência energética e métricas de redes complexas, que são grau do vértice, sobreposição topológica e persistência das arestas para seleção de enlaces com melhor desempenho.

2. Estado de Redução: Durante este estado, o veículo Vs move-se em direção a uma RSU que fornece cobertura de sinal, reduzindo gradualmente o comprimento do caminho de descarregamento V2V2I VANET. Essa redução é alcançada diminuindo o número de saltos no caminho V2V2I.
3. Estado de Auto-descarregamento: Neste ponto, o veículo Vs está dentro do alcance de cobertura do sinal da RSU. Ele pode realizar o descarregamento de forma independente, sem depender de outros veículos.
4. Estado de Extensão: Quando o veículo Vs move-se para fora da área de cobertura do sinal da RSU, resultando em um aumento no número de saltos necessários para a comunicação V2V2I, a rota tende a ser aumentada.

Nos estados de redução e de extensão, pode haver situações em que seja necessário reconstruir o caminho. Se tal situação ocorrer, o algoritmo retorna ao estado 1 para recalcular as rotas e estabelecer enlaces entre os nós da rede. Cada estado será detalhado nas próximas subseções.

3.2.1 Estado de Inicialização

Inicialmente, o veículo Vs (agente) utiliza uma conexão a uma rede de celular para se comunicar com seu par, um Vp (*Vehicular pair*). Periodicamente, os veículos enviam uma mensagem de contexto ao MEC. Quando o servidor MEC da rede 4G ou 5G recebe o contexto relatado pelo veículo Vs, no tempo T_c , ele é acionado para determinar se existem caminhos de descarregamento V2V2I (*Vehicle-to-Vehicle-to-Infrastructure*), para o veículo Vs. Se o servidor MEC encontrar um caminho de descarregamento V2V2I para o Vs, ele calcula todos os possíveis caminhos V2V2I que possam existir durante o intervalo $[T_c, T_c + t]$ e seleciona o melhor caminho de descarregamento V2V2I, gerado no tempo T_0 . O instante T_0 está dentro do intervalo $[T_c, T_c + t]$. Subsequentemente, o servidor MEC envia mensagens aos veículos constituintes do caminho de descarregamento V2V2I, para ativar a sessão de descarregamento V2V2I no tempo T_0 .

Durante a sessão de descarregamento, todos os veículos constituintes do caminho de descarregamento V2V2I relatam seus contextos ao servidor MEC de forma síncrona. Esse sincronismo pode ser alcançado pelo alinhamento entre o tempo local e o horário

GPS (*Global Positioning System*). O tempo de atraso t é configurado para ser menor ou igual ao período de tempo de relatório de contexto do veículo correspondente, porque o servidor MEC só pode receber o próximo contexto relatado após um período de tempo de relatório periódico. Após receber os contextos relatados dos veículos constituintes do caminho de descarregamento V2V2I, o servidor MEC calcula o tempo de cada enlace V2V e o enlace V2I, que representa a duração do agente de descarregamento dentro da cobertura do sinal da RSU. Assim, se atualiza o tempo de descarregamento restante do caminho V2V2I correspondente.

O Algoritmo 1 calcula o tempo de início e de término para todos os enlaces. Esse cálculo é baseado na velocidade de localização de cada par de nós (p, q) no ambiente (*NodeSet*), na geo-distância, na faixa de sinal da unidade de bordo e na função de adequação para energia. Para alcançar isso, o algoritmo 1 é executado para derivar o ponto de tempo de início e o ponto de tempo de término de cada enlace, conforme proposto em (LIN; HUANG; WU, 2022). Considerando a posição e a velocidade de cada par de veículos p e q , onde tanto p quanto q fazem parte do *NodeSet* no tempo t_0 . As posições podem ser representadas pelas coordenadas $Pos_x(p)$, $Pos_y(p)$ e $Pos_x(q)$, $Pos_y(q)$, e as velocidades por $Vel_x(p)$, $Vel_y(p)$ e $Vel_x(q)$, $Vel_y(q)$. Os veículos podem se comunicar em um raio R de 300m (igual ao IEEE 802.11p OBU).

Algoritmo 1: Encontre Todos os Intervalos de Tempo de Conexão dos enlaces

```

1 for EACH ENLACE  $(p, q)$  do
2    $\lfloor (Px(p) - Px(q) + t(Vx(p) - Vx(q)))^2 + (Py(p) - Py(q) + t(Vy(p) - Vy(q)))^2 - R^2 = 0$ 

```

Se não houver soluções para a equação utilizada no o Algoritmo 1, significa que a menor distância entre o objeto p e o objeto q é maior que R . Consequentemente, o enlace (p, q) é considerado inválido e é removido da análise. Se houver uma solução, isso indica que o enlace (p, q) se rompe imediatamente e precisa ser removido. No entanto, se houver duas soluções, isso implica que o enlace (p, q) existe por um intervalo de tempo em que uma solução representa o ponto inicial e a outra solução representa o ponto final do enlace (p, q) . Nos casos em que existe um número infinito de soluções, isso sugere que o enlace (p, q) pode persistir indefinidamente. Isso significa que os objetos p e q têm a mesma velocidade e direção, enquanto a distância inicial entre eles não é maior que R . Uma vez que identificamos todos os pontos de início e fim para cada enlace, podemos determinar o caminho adequado para o descarregamento de dados VVR. Para cada enlace, em cada caminho, utilizamos uma função de probabilidade de sucesso (SP), representada pela equação 3.1.

$$SP = Ql \times Ff \times Cp \quad (3.1)$$

Na equação 3.1, SP significa sucesso na transmissão, Ql representa qualidade do link, Ff função de aptidão e Cp probabilidade de sucesso na transmissão. A função de qualidade leva em consideração vários fatores, para determinar a qualidade de um caminho de descarregamento V2V2I. Essas considerações são as seguintes: (i) um tempo de vida mais longo do caminho V2V2I leva a um valor de utilidade mais alto, indicando sua desejabilidade; (ii) se houver mais veículos dentro da cobertura de sinal de um veículo constituinte, pode haver potenciais colisões de transmissão, levando a um valor de utilidade mais baixo devido aos valores de espera maiores necessários para o acesso ao canal; (iii) o número total de veículos dentro da cobertura de sinal de cada veículo constituinte influencia no valor de utilidade do caminho, indicando que uma estrada mais congestionada resulta em um valor de utilidade mais baixo. Uma função de qualidade que pode derivar a qualidade do caminho de descarregamento de dados VVR é definida da seguinte forma, cujas variáveis utilizadas são definidas e explicadas na Tabela 2. Ql é baseado em (HUANG; LAI, 2020).

$$Ql = \frac{T^{\text{offloading}}}{\alpha(2^{\lfloor \log_2 N^{\text{max}} \rfloor} + N^{\text{max}}) + (1 - \alpha)N^{\text{total}}} \cdot \frac{1}{\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n i^2}}{n}} \quad (3.2)$$

Table 2 – Variáveis da Função de Qualidade

Parameter	Description
$T_{\text{offloading}}$	O tempo de vida do caminho de descarregamento V2V2I, que é o tempo mínimo de conexão dos enlaces constituintes no caminho de descarregamento V2V2I.
N_i	O número de veículos que estão na cobertura de sinal do veículo constituinte do caminho de descarregamento V.
N_{max}	Max (N1, N2, ..., Nn).
N_{total}	Soma de (N1, N2, ..., Nn).
n	A contagem de saltos no caminho de descarregamento V2V2I, incluindo o enlace V2I do agente de descarregamento para RSU.

Fonte: (HUANG; LAI, 2020)

A função de aptidão (Ff) foi projetada para avaliar o valor de aptidão da posição de um veículo em um espaço 2D em relação ao seu par. A função avalia a qualidade de um nó na rede, combinando métricas de eficiência de comunicação e penalidades energéticas. O objetivo é encontrar um equilíbrio entre conectividade e eficiência energética, com impacto direto na manutenção e durabilidade da rede. A fórmula considera tanto fatores espaciais (distância entre nós e densidade), quanto conectividade e energia. A função descrita permite a definição de uma rede equilibrada, onde a proximidade, energia, densidade e conectividade são ajustadas para otimizar a rede para um uso prolongado e eficiente. Ajustando os pesos α_1 à α_3 é possível priorizar diferentes aspectos da rede dependendo da aplicação. A função é definida a seguir.

$$\text{fitness_val}_i \leftarrow \alpha_1 \cdot x1_i + \alpha_2 \cdot x2_i + \alpha_3 \cdot x3_i - \text{penalties}_i$$

onde: - α_1 , α_2 e α_3 são pesos atribuídos a cada métrica para refletir a importância relativa de cada uma, permitindo ajuste fino de acordo com os objetivos da rede (priorizar alcance, estabilidade, etc.). - penalties_i é uma penalidade associada ao nó n_i , aplicada em função do nível de energia remanescente.

Métricas da Função

1. Distância Média ($x1_i$)

$$x1_i \leftarrow \frac{\sum_{j \in \{Vn_i\}} d_{ij}}{Cn_i}$$

A distância média de n_i é medida para seus vizinhos diretos Vn_i . d_{ij} representa a distância entre n_i e cada nó vizinho j . Quanto menor a distância média, mais próximo o nó está de outros nós, facilitando a comunicação com baixo consumo de energia. A minimização da distância média implica menor energia gasta na transmissão de dados, ideal para redes veiculares, onde a comunicação eficiente é crucial. Em redes de grande área, nós muito distantes podem ter pontuações de aptidão mais baixas devido ao aumento da distância média e ao custo energético.

2. Energia ($x2_i$)

$$x2_i \leftarrow \frac{\sum_{j \in \{Vn_i\}} e_j}{Cn_i}$$

A energia média dos nós vizinhos de n_i é calculada, sendo e_j a energia de cada vizinho j . Esse cálculo mede a “saúde” energética da vizinhança. Nós com vizinhos de baixa energia tendem a sofrer desconexões na rede, já que esses nós podem falhar mais rapidamente. Otimizar $x2_i$ ajuda a manter uma rede sustentável, equilibrando os nós de forma a preservar a conectividade e evitar áreas onde a comunicação é limitada por falta de energia.

3. Conectividade ($x3_i$)

$$x3_i \leftarrow \frac{\text{número de nós acessíveis via rotas de múltiplos saltos a partir de } n_i}{Cn_i}$$

Representa a proporção de nós que n_i pode alcançar em sua vizinhança Vn_i através de rotas de múltiplos saltos. A conectividade indica a capacidade do nó n_i de se comunicar de forma eficaz com outros nós na rede, mesmo que estejam distantes. Em redes móveis ou dinâmicas, nós com maior conectividade são desejáveis pois têm menos chances de serem isolados, permitindo rotas alternativas.

Penalidade de Baixa Energia A penalidade é adicionada para nós com energia crítica. Se o nó n_i tiver uma energia abaixo de um certo limite, ele é penalizado para refletir o risco de falha iminente:

$$\text{penalty}_i \leftarrow \text{penalidade se a energia de } n_i \text{ cair abaixo do limite mínimo de 50\%.$$

As regras de penalização são:

- - Penalidade de 80% para energia abaixo de 50%
- - Penalidade de 85% para energia abaixo de 40%
- - Penalidade de 90% para energia abaixo de 30%
- - Penalidade de 95% para energia abaixo de 20%
- - Penalidade de 97,5% para energia abaixo de 10%, desincentivando a utilização de nós que estão prestes a falhar.
- - Penalidade de 99% para energia abaixo de 5%, o que praticamente elimina a relevância do nó na rede, priorizando nós com mais energia.

A penalidade de baixa energia visa evitar a dependência de nós que podem se tornar inativos em breve, reduzindo o risco de falhas de conectividade. Esse componente é essencial para a estabilidade da rede em ambientes críticos, onde a interrupção na comunicação pode comprometer a operação.

A função de aptidão descrita permite a definição de uma rede equilibrada, onde a proximidade, energia, densidade e conectividade são ajustadas para otimizar a rede para um uso prolongado e eficiente. Ajustando os pesos α_1 a α_3 , é possível priorizar diferentes aspectos da rede dependendo da aplicação. Após o cálculo da função de aptidão de um determinado nó, este valor encontrado é multiplicado pelo valor de aptidão de cada nó vizinho, encontrando assim o valor de aptidão de cada enlace.

A eficiência de um enlace na realização de transmissões é determinada por uma função de probabilidade que considera fatores como grau do vértice, sobreposição topológica e persistência da aresta. Essa função calcula a probabilidade de sucesso da transmissão (C_p), que é então comparada a um valor de limiar derivado de uma média móvel exponencialmente ponderada. Se C_p exceder o limiar, o enlace é penalizado e pode ser classificado mais baixo. A seleção de componentes para o cálculo da probabilidade de retransmissão é baseada na importância de um veículo específico no processo de retransmissão de pacotes na rede. As seguintes métricas de redes complexas são utilizadas (LOUSADA et al., 2019):

- Grau do vértice: vértices que apresentam um grau elevado são os mais ativos na rede, e podem atuar como um canal para a troca de informações;
- Sobreposição topológica: retrata a tendência de existir vértices com vizinhos compartilhados. Sendo assim, quanto maior a quantidade de vizinhos compartilhados, maior a possibilidade de manutenção do enlace;

- Persistência das arestas: define o número de vezes que dois vértices se encontram na mesma janela temporal. Veículos que estão em uma mesma janela temporal possuem maior probabilidade de sucesso ao trocar informações.

O valor de C_p é calculado pelo produto da probabilidade associada ao Grau do Vértice (pGV), da probabilidade associada à Sobreposição Topológica (pST) e da probabilidade associada à Persistência da Aresta (pPA), formulado pela Equação (3.3):

$$C_p = pGV \times pST \times pPA \quad (3.3)$$

Para o cálculo de pGV de um determinado veículo, é necessário que o veículo saiba o grau do vértice de todos os seus vizinhos, valores mantidos e atualizados na sua tabela de vizinhos. O veículo, então, realiza a razão entre o seu grau de vértice (gV), obtido pela contagem do número de veículos alcançáveis pelo raio de transmissão (essa informação é mantida na tabela de vizinhos do próprio vértice), e o somatório dos graus do vértice de seus vizinhos (gVV), conforme ilustra a equação (3.4).

$$pGV = \frac{gV}{gVV} \quad (3.4)$$

Durante a transmissão de dados, é interessante a seleção dos veículos que possuam o máximo possível de vizinhos em comum, possibilitando novos caminhos, caso o enlace de comunicação entre eles seja quebrado. O cálculo de pST (probabilidade de sobreposição topológica) é feito através da divisão do número de vizinhos em comum (nVC) pela soma do número de vizinhos do transmissor (nVT) com o número de vizinhos do receptor (nVR). A equação (3.5) exhibe a formulação descrita.

$$pST = \frac{nVC}{nVT + nVR} \quad (3.5)$$

O veículo transmissor considera os dois segundos anteriores à escolha do receptor para calcular o valor de pPA . Se a aresta manteve-se pelos dois segundos a pPA recebe o valor 1, se apareceu somente no último segundo recebe o valor 0,5 e, caso no último segundo não tenha aresta, receberá o valor 0, evitando assim que o veículo seja escolhido como receptor.

Após o cálculo de C_p para os três veículos mais distantes, é necessário verificar se os valores são superiores ao valor de limiar. Caso o valor seja maior, o mesmo é penalizado em 50%, alterando o veículo penalizado para a última posição .

O cálculo do limiar baseia-se na metodologia adotada pelo protocolo *E-ProbT* apresentado em (LIMA; JÚNIOR, 2016). O valor inicial de limiar, chamado de *avgThr*,

é calculado com a média de p para os três veículos mais distantes do transmissor. Os veículos que devem receber os pacotes são os mais distantes do emissor e os mais bem classificados, levando em consideração a eficiência. A posição do veículo na rede é fator preponderante para ser escolhido ou não para receber o pacote. Baseado na proposta de (LIMA; JÚNIOR, 2016), são escolhidos os três veículos mais distantes do emissor para ranqueamento. Com o objetivo de refinar esse valor, o mesmo passa por um processo de média móvel exponencial ponderada, que considera valores anteriores e atuais para cálculo dos novos limiares. Com isso, tenta-se eliminar possíveis disparidades, bem como possíveis erros na estimativa realizada. Assim como no calculo do *timeout* do TCP (*Transmission Control Protocol*), uma suavização na curva de valores é realizada. Utilizando $avgThr$, calcula-se o valor de limiar estimado, denominado $estThr$. A equação (3.6) apresenta o cálculo do limiar estimado.

$$estThr = (1 - \beta) \times estThr + \beta \times avgThr \quad (3.6)$$

O valor da constante β utilizada é o mesmo valor recomendado para o TCP. Assim, $\beta = 1/8 = 0,125$ (JACOBSON, 1988). Além de estimar, é necessário calcular a variação do limiar, denominada $varThr$. Este cálculo é realizado com base na equação (3.7).

$$varThr = (1 - \gamma) \times varThr + \gamma \times |avgThr - estThr| \quad (3.7)$$

O valor da constante γ utilizada é o mesmo valor utilizado nos trabalhos Lima et al. (2015), Lima e Júnior (2016), recomendado para o TCP. Assim, $\gamma = 1/4 = 0.250$ (JACOBSON, 1988). Por fim, o valor final de limiar, chamado de $endThr$, é calculado pela soma do seu valor estimado ($estThr$) e o valor da variação ($varThr$). A equação (3.8) apresenta o cálculo para o valor final de limiar.

$$endThr = estThr + varThr \quad (3.8)$$

Com a função de probabilidade de sucesso definida, os caminhos candidatos para descarregamento podem ser determinados. O algoritmo 2 (**InitContenderSet**) tem como objetivo inicializar o conjunto de caminhos candidatos para encontrar o melhor caminho de **Vroot** para outros nós dentro de um conjunto de nós (**NodeSet**) e um conjunto de pontos no tempo (**TimeSet**). Primeiramente, o conjunto de caminhos candidatos (**ContenderSet**) é inicializado como vazio. Em seguida, há uma iteração, no algoritmo, entre cada nó v e o **NodeSet**, no tempo t , no **TimeSet**. Durante a iteração, o algoritmo verifica se existe um enlace ativo entre **Vroot** e o nó v no tempo t . Se tal enlace existir, um novo caminho candidato é criado, começando em **Vroot** e terminando em v , no tempo t . O novo caminho

candidato é, então, atribuído. As suas informações relevantes incluem o nó de início, o nó final, o tempo adiado, o tempo de vida, a qualidade do caminho calculada usando uma função específica e a contagem de saltos, que é definida como 1, pois é um caminho de um salto de **Vroot** para v . Este caminho candidato é adicionado ao conjunto de caminhos candidatos (**ContenderSet**), para consideração posterior. Após completar as iterações entre nós e pontos, no tempo, o algoritmo retorna o **ContenderSet** contendo todos os possíveis caminhos de **Vroot** para os nós no **NodeSet** que estão ativos em seus respectivos pontos de tempo. Esse conjunto será utilizado nos processos subsequentes para determinar o melhor caminho de **Vroot** para o nó final (RSU).

Algoritmo 2: InitContenderSet

```

1 ContenderSet  $\leftarrow \emptyset$ 
2 linksToVroot  $\leftarrow$  Links from Vroot to NodeSet
3 for EACH  $v$  IN NODESET do
4     for EACH  $t$  IN TIMESET do
5         for EACH LINK  $(p, q)$  IN LINKSTOVRROOT do
6             if  $t_{start}(\text{LINK}) \leq t$  and  $t_{end}(\text{LINK}) > t$  then
7                 NewContenderPath  $\leftarrow$  Create new path from Vroot to  $v$  starting at  $t$ 
8                 End(NewContenderPath)  $\leftarrow v$ 
9                 PostponedTime(NewContenderPath)  $\leftarrow t$ 
10                Lifetime(NewContenderPath)  $\leftarrow t_{end}(\text{link}) - t$ 
11                Quality(NewContenderPath)  $\leftarrow$  ComputeQuality
                    (NewContenderPath)
12                HopCount(NewContenderPath)  $\leftarrow$  1 NewContenderPath to
                    ContenderSet
13 Return ContenderSet

```

O Algoritmo 3 (CBOP - *Constrained Best-Offloading Path*) foi projetado para encontrar o melhor caminho de descarregamento de dados em uma rede veicular V2V2I (*Vehicle-to-Vehicle-to-Infrastructure*). O objetivo é identificar o caminho que oferece a melhor qualidade de comunicação, enquanto considera a restrição de atraso imposta pelo sistema. O algoritmo começa inicializando um conjunto de caminhos candidatos (**ContenderSet**) usando a função **InitContenderSet**, que cria todos os possíveis caminhos de um salto a partir do veículo raiz **Vroot**. Em seguida, entra em um *loop* (linha 4) para iterar sobre o **ContenderSet**. Dentro do *loop*, o algoritmo calcula a qualidade de todos os caminhos de descarregamento em **ContenderSet** (linha 6) e seleciona o caminho que tem o valor de qualidade máximo como **Pathmax** (linhas 6 a 9). Se o caminho **Pathmax** alcançar a RSU (Unidade de Serviço de Infraestrutura), o *loop* é interrompido, pois o melhor caminho foi encontrado, e não há necessidade de continuar a busca. Se **Pathmax** não

alcançar o RSU, o **ContenderSet** é atualizado para conter apenas caminhos promissores para continuar a busca (linha 12), e o caminho **Pathmax** é removido do conjunto para evitar cálculos repetidos desnecessários (linha 13). O algoritmo continua a iterar até que não haja mais caminhos candidatos no **ContenderSet**. Em seguida, retorna o caminho **Pathmax**, que é considerado o melhor caminho de descarregamento de dados dentro das restrições de atraso e qualidade.

Algoritmo 3: CBOP (Constrained Best-Offloading Path)

```

1 ContenderSet  $\leftarrow$  InitContenderSet(Vroot, NodeSet, TimeSet)
2 Pathmax  $\leftarrow$  null
3 maxQuality  $\leftarrow -\infty$ 
4 while CONTENDERSET IS NOT EMPTY do
5   for EACH PATH IN CONTENDERSET do
6     quality  $\leftarrow$  calculateQuality(Path)
7     if QUALITY > MAXQUALITY then
8       maxQuality  $\leftarrow$  quality
9       Pathmax  $\leftarrow$  Path
10  if END(PATHMAX) = RSU then
11    break
12  ContenderSet  $\leftarrow$  RefreshContenderSet(Pathmax, ContenderSet, k)
13  ContenderSet.remove(Pathmax)
14 Return Pathmax

```

3.2.2 Estado de Redução

Manter o caminho de descarregamento V2V2I pelo maior tempo possível é altamente desejável, mas nem sempre possível. Como mencionado anteriormente, o servidor MEC recebe o contexto, periodicamente relatado pelo agente de descarregamento no ponto de tempo atual T_c . O MEC detecta que o agente de descarregamento estará fora da cobertura de sinal da RSU quando um contexto periodicamente relatado indica que ele está saindo da cobertura de sinal da RSU. Para resolver isso, o algoritmo de redução é ativado para encontrar um novo agente de descarregamento e atualizar o caminho de descarregamento V2V2I. O servidor MEC seleciona o caminho atualizado a partir de todos os caminhos potenciais que podem existir durante o intervalo $[T_c, T_c + t]$. O subcaminho do caminho de descarregamento V2V2I que está fora da cobertura de sinal da RSU é referido como subcaminho fora-RSU.

Para garantir que o comprimento de tempo com restrição de atraso t não exceda a vida útil do sub-caminho fora-RSU, a restrição de atraso é definida para ser menor ou

igual à vida útil do sub-caminho fora-RSU. Se um novo agente de descarregamento e/ou um caminho atualizado de descarregamento V2V2I não puder ser encontrado, o servidor MEC informará ao veículo V_s para retornar à rede celular, e a sessão de descarregamento é encerrada. No entanto, se o veículo V_s permanecer dentro da cobertura de sinal do RSU, indicando que o caminho de descarregamento ainda está intacto, o estado de redução é concluído, e o veículo V_s pode continuar com o descarregamento por conta própria.

3.3 Estado de Auto-Descarregamento

Quando o veículo V_s está dentro da cobertura de sinal do RSU, ele pode se comunicar diretamente com seu V_p através do RSU. Durante esse estado, o servidor MEC calcula continuamente a duração de tempo que o veículo V_s permanece dentro da cobertura de sinal do RSU, com base no contexto periodicamente relatado pelo V_s . O servidor MEC recebe o contexto do V_s em um determinado ponto de tempo T_c , e sabe que o veículo V_s sairá da cobertura do RSU quando o próximo contexto for recebido, indicando que o veículo V_s está se afastando da cobertura de sinal do RSU. Essa transição desencadeia o início do estado de extensão.

3.4 Estado de Extensão

Quando o veículo fonte V_s , ou o agente de descarregamento do estado de extensão, sai da cobertura de sinal do RSU, o algoritmo de extensão é ativado. No tempo atual T_c , o servidor MEC recebe o contexto periodicamente relatado do agente de descarregamento e prevê que o veículo fonte ou o agente de descarregamento deixará a cobertura de sinal do RSU ao receber o próximo contexto. Esse evento desencadeia o algoritmo de extensão, que visa encontrar um novo agente de descarregamento e um caminho atualizado de descarregamento V2V2I. O servidor MEC avalia todos os candidatos potenciais que podem estar disponíveis durante o intervalo $[T_c, T_c + t]$. O caminho atual de descarregamento V2V2I do veículo V_s para o agente de descarregamento, que está dentro da cobertura de sinal do RSU, mas está saindo, é referido como sub-caminho **c-offloading**. Para garantir que o comprimento de tempo com restrição de atraso t seja razoável e não exceda a vida útil do sub-caminho **c-offloading**, t é definido como menor ou igual à vida útil do sub-caminho **c-offloading**. Se o servidor MEC não conseguir encontrar um novo agente de descarregamento e/ou um caminho atualizado de descarregamento V2V2I, ele notificará o veículo V_s para retornar à rede celular e a sessão de descarregamento será encerrada.

3.5 Reconstruir o Caminho de Descarregamento

Quando um caminho de descarregamento V2V2I sofre uma quebra inesperada, o algoritmo de recuperação de caminho é ativado para restaurar a conexão. Vamos considerar um sub-caminho $V_b - V_y - V_a$ dentro do caminho de descarregamento V2V2I para o veículo V_s . Se V_b não consegue transmitir dados para V_a , por exemplo, porque V_y saiu da estrada, resultando na quebra do caminho de descarregamento V2V2I, denominamos este evento como o ponto de tempo quebrado T_c . O algoritmo de recuperação de caminho tenta encontrar um novo veículo V_x que possa reparar o caminho de descarregamento V2V2I, ou procura uma oportunidade para que V_b se reconecte com V_a dentro do intervalo $[T_c, T_c + t]$. Aqui, **sub-caminho-a** representa o sub-caminho de descarregamento atual de V_s para V_a , e **sub-caminho-b-AD** representa o sub-caminho de descarregamento atual de V_b para o agente de descarregamento. Para garantir que o comprimento de tempo com restrição de atraso t seja razoável e não exceda as vidas úteis de **sub-caminho-a** ou **sub-caminho-b-AD**, t é definido como menor ou igual à vida útil mínima entre **sub-caminho-a** e **sub-caminho-b-AD**. Se o algoritmo de recuperação de caminho falhar em reparar o caminho de descarregamento V2V2I, o servidor MEC informará o veículo V_s para retornar à rede celular, e a sessão de descarregamento V2V2I será encerrada. O algoritmo utilizado para reconstrução, quando a RSU deve ser atualizada, é o mesmo proposto em (LIN; HUANG; WU, 2022)

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A solução proposta neste trabalho foi desenvolvida em duas grandes etapas de simulações. A primeira etapa abrangeu o desenvolvimento, a simulação e a coleta de resultados do algoritmo para verificar a probabilidade de sucesso na transmissão de um enlace, conforme definido no capítulo anterior pela fórmula: $C_p = pGV \times pST \times pPA$, onde pGV significa probabilidade associada ao Grau do Vértice, pST probabilidade associada à Sobreposição Topológica e pPA probabilidade associada à Persistência da Aresta. A segunda etapa englobou todo o algoritmo PE-MHMR, que utiliza a fórmula proposta no capítulo anterior: $SP = Ql \times Ff \times Cp$, onde SP significa sucesso na transmissão, Ql representa qualidade do link, Ff função de aptidão e Cp probabilidade de sucesso na transmissão.

As ferramentas utilizadas, as configurações e os cenários para as simulações, além dos resultados obtidos, são apresentados nas seções a seguir.

4.1 Ferramentas utilizadas

Nesta seção, são apresentadas as ferramentas utilizadas para simulação, coleta e análise de dados. O SUMO (*Simulation of Urban Mobility*), foi utilizado para simulação de mobilidade urbana. Dois simuladores foram utilizados junto ao SUMO, o primeiro foi o ns-3 (*Network Simulator 3*), utilizado na primeira parte do trabalho para desenvolver o algoritmo Cp (probabilidade de sucesso na transmissão). O segundo foi o VANET Toolbox do MATLAB. A simulação final, com todos os demais componentes da equação, conforme proposto neste trabalho pelo algoritmo PE-MHMR, foi realizada com o VANET Toolbox do MATLAB(WANG, 2024).

O SUMO é um simulador de mobilidade urbana *open source*, que suporta redes rodoviárias largas. Suas principais funcionalidades são o movimento de veículos livres de colisões, suporte a diferentes tipos de veículos, roteamento de veículo único, estradas com múltiplas faixas com suporte à mudança de faixa, suporte à regras de preferências em cruzamentos, hierarquia de junções, interface gráfica, e roteamento dinâmico. O SUMO não possui integração nativa com simuladores de rede, contudo, *frameworks* podem ser utilizados em conjunto com simuladores de rede para simulação de redes veiculares (BEHRISCH et al., 2011). O SUMO v1.2.0 é utilizado como gerador de mobilidade para simulação de fluxo de tráfego rodoviário. Para tal, é necessário configurar a rede rodoviária, isso é, as ruas, estradas, semáforos, e aspectos semelhantes, e a demanda de

tráfego, que consiste na especificação da dinâmica dos veículos, detalhando a velocidade, direção, posição e tempo de partida e chegada, e aspectos semelhantes. Além disso, a posição das células 5G e dos controladores SDN também são especificados.

O ns-3 é um simulador de redes de código aberto amplamente utilizado para pesquisa e desenvolvimento de soluções em redes de computadores e sistemas de comunicação. Ele foi projetado para fornecer um ambiente modular, flexível e extensível, permitindo a simulação de redes heterogêneas e oferecendo suporte a uma ampla gama de tecnologias, protocolos e arquiteturas. O principal objetivo do ns-3 é viabilizar o estudo e a avaliação de cenários complexos de redes com alta precisão, em condições controladas, o que o torna uma ferramenta essencial para pesquisadores e desenvolvedores. Implementado principalmente em C++ e com suporte a *bindings* em Python, o ns-3 adota uma arquitetura modular baseada em um motor de eventos discretos que gerencia a execução temporal das simulações. Isso garante precisão e confiabilidade nos resultados. Além disso, sua estrutura é composta por módulos que encapsulam funcionalidades específicas, como suporte a tecnologias de rede (Wi-Fi, LTE, 5G), protocolos de comunicação (TCP, UDP, IPv4, IPv6) e ferramentas de coleta de métricas. Esse design permite não apenas uma implementação fiel de protocolos e modelos que refletem o comportamento real das redes, mas também a extensibilidade necessária para incorporar novos módulos ou integrar o simulador com ferramentas externas, como geradores de tráfego ou sistemas de monitoramento (RILEY; HENDERSON, 2010). O ns-3 é amplamente utilizado em pesquisas acadêmicas e industriais devido à sua capacidade de modelar redes de maneira detalhada e realista. Ele é especialmente relevante em áreas como Mobile Edge Computing (MEC) e redes veiculares, onde sua precisão permite a análise de arquiteturas, protocolos e estratégias de alocação de recursos em cenários dinâmicos e complexos. Por exemplo, o simulador possibilita a experimentação em ambientes urbanos, considerando fatores como mobilidade de veículos e condições de canal, que impactam diretamente o desempenho das redes e das aplicações suportadas por elas.

Apesar de suas vantagens, o ns-3 apresenta desafios, como sua curva de aprendizado acentuada devido à complexidade da configuração e programação. Além disso, a simulação de redes muito grandes pode demandar elevado poder computacional, o que exige hardware robusto para uma execução eficiente. Ainda assim, o ns-3 é reconhecido como um padrão pela comunidade científica, graças à sua capacidade de realizar experimentos controlados que seriam inviáveis ou impraticáveis em ambientes reais. Seu uso no estudo de sistemas como o MEC e as redes veiculares permite *insights* valiosos para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e escaláveis, consolidando-o como uma ferramenta indispensável para avanços na área de redes e sistemas distribuídos (HENDERSON et al., 2008).

O VANET Toolbox do MATLAB é utilizado para a simulação final, uma rede

veicular SDN com tecnologia 5G. O VANET Toolbox é uma ferramenta de simulação desenvolvida para modelar redes veiculares, utilizando uma abordagem baseada em Simulação de Eventos Discretos (DES, do inglês *Discrete Event Simulation*). Esse tipo de simulação permite um alto grau de precisão no acompanhamento do comportamento de redes veiculares, pois se baseia em eventos específicos e interações entre veículos em ambientes urbanos ou rodoviários. A VANET Toolbox é especialmente útil para estudar a comunicação entre veículos e a infraestrutura urbana, sendo amplamente empregada em pesquisas de redes de comunicação veicular, segurança e otimização de tráfego (WANG, 2024).

Um dos principais diferenciais do VANET Toolbox é sua base na Simulação de Eventos Discretos. Essa abordagem foca na ocorrência de eventos em pontos específicos no tempo, sendo ideal para redes veiculares, onde é essencial monitorar e registrar eventos críticos, como a troca de mensagens entre veículos, colisões, congestionamentos e mudanças de rota. A ferramenta permite, assim, acompanhar o comportamento do sistema em tempo real, auxiliando na análise e desenvolvimento de tecnologias que aumentem a eficiência e a segurança do tráfego.

A VANET Toolbox inclui um modelo de movimentação veicular que simula o comportamento de veículos de forma realista, considerando aceleração, frenagem e distâncias seguras entre automóveis. Esse modelo também leva em conta o comportamento dos motoristas em diversas condições de tráfego, essencial para entender o impacto da comunicação veicular no trânsito. Outra vantagem importante é o suporte da ferramenta a diversos protocolos de comunicação, como DSRC (*Dedicated Short-Range Communications*) e V2X (*Vehicle-to-Everything*), permitindo simular a troca de mensagens de alerta, compartilhamento de dados sobre tráfego e informações de segurança segundo diferentes padrões de comunicação.

A versatilidade do VANET Toolbox permite simular tanto cenários urbanos, com alta densidade de veículos e múltiplos cruzamentos, quanto cenários rodoviários, onde os veículos se deslocam a maiores velocidades e há menor número de interseções. Com isso, a ferramenta possibilita estudar o desempenho de sistemas de comunicação em ambientes variados, analisando o comportamento dos veículos e sua interação com o ambiente. Além disso, ela permite a avaliação de diversas métricas de desempenho, como latência de comunicação, taxa de entrega de pacotes, uso de largura de banda e tempo médio de resposta, que são essenciais para medir a eficácia dos protocolos de comunicação e o impacto das mensagens de segurança nas condições de trânsito.

As aplicações da VANET Toolbox são diversas, destacando-se em pesquisas de redes veiculares e sistemas de transporte inteligente. Em estudos de protocolos de comunicação, por exemplo, a ferramenta possibilita avaliar a eficiência e robustez de

diferentes protocolos, como DSRC e V2X, em cenários de tráfego realistas. Além disso, a VANET Toolbox é utilizada para simular sistemas de auxílio ao motorista, como alertas de colisão iminente e informações de condições de trânsito em tempo real, que dependem de uma troca rápida e confiável de informações entre veículos e a infraestrutura urbana. A ferramenta também é útil na otimização do tráfego urbano, permitindo testar estratégias de controle de congestionamentos por meio da comunicação entre veículos e sinais de trânsito. Finalmente, em estudos de segurança no trânsito, o VANET Toolbox auxilia na análise de como a troca de informações críticas em tempo real, como posição e velocidade dos veículos, pode contribuir para a redução de acidentes.

O uso do VANET Toolbox oferece diversos benefícios, como a flexibilidade para customizar cenários de simulação e ajustar parâmetros de tráfego, comunicação e densidade de veículos, facilitando sua aplicação em diferentes contextos e objetivos de pesquisa. O uso de DES proporciona uma simulação precisa das interações entre eventos, especialmente em redes veiculares onde fenômenos como colisões e mudanças de rota são comuns. A ferramenta também pode ser integrada a outros simuladores de tráfego, como SUMO, para criar cenários ainda mais detalhados e completos. No entanto, essa precisão no uso de DES traz um aumento significativo no custo computacional, especialmente em cenários de larga escala com alta densidade de veículos. Outra limitação importante é a dependência de dados realistas sobre tráfego e comportamento de motoristas, fundamentais para a obtenção de resultados confiáveis, o que pode representar um desafio em alguns cenários de aplicação.

Em síntese, o VANET Toolbox se apresenta como uma ferramenta poderosa para o estudo de redes veiculares, permitindo que pesquisadores e desenvolvedores testem protocolos de comunicação e sistemas de assistência ao motorista em condições de tráfego realistas. Sua abordagem baseada em Simulação de Eventos Discretos possibilita modelar com precisão as interações entre veículos, enquanto a flexibilidade para configurar protocolos e cenários permite adequar a ferramenta a uma grande variedade de contextos.

4.2 Simulações

Esta seção contém o modelo de sistema que foi implantado nos estudos específicos para cada etapa desenvolvida.

4.2.1 *Simulação do Algoritmo C_p*

O algoritmo C_p foi implementado para avaliar a fórmula de cálculo de probabilidade: $C_p = p_{GV} \times p_{ST} \times p_{PA}$ testado através do simulador de eventos discretos em rede ns-3, que foi projetado para simular diferentes tecnologias e cenários. O modelo de

tráfego adotado no trabalho foi criado através do *Simulation of Urban Mobility* (SUMO), consistindo em uma rodovia com 2 pistas e veículos se movendo na mesma direção, da esquerda para a direita. Para que veículos cruzem com outros veículos durante os seus trajetos, velocidades distintas foram adotadas para tornar possíveis as ultrapassagens. O cenário simulado é apresentado na Figura 5.

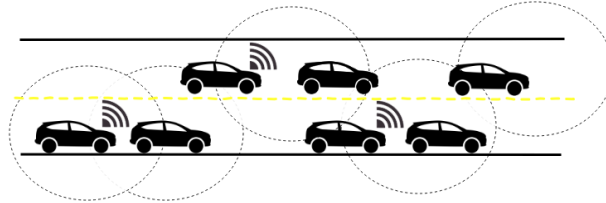


Figure 5 – Cenário simulado.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros usados nas simulações. As densidades de veículos foram definidas e classificadas como trânsito leve (20 veículos/km), trânsito moderado (30 veículos/km), trânsito pesado (60 veículos/km) e trânsito congestionado (90 e 120 veículos/km) (WISITPONGPHAN et al., 2007). Cada simulação foi executada com a adoção de 300 segundos como tempo total. Inicialmente, um intervalo de aquecimento da rede, termo conhecido como *warm-up*, é realizado por 10 segundos. Esse período é usado para uma melhor caracterização do valor de limiar e cálculo de intervalos de espera utilizados na simulação, antes do início da medição das métricas.

Table 3 – Parâmetros de simulação

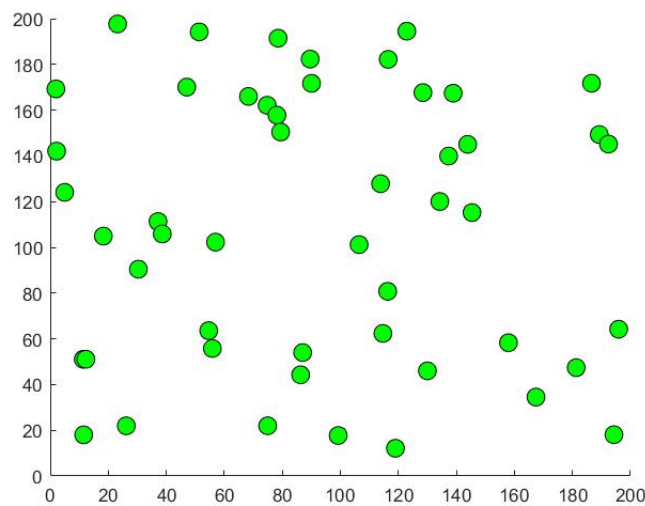
Parâmetro	Valor	Descrição
<i>vehicles</i>	300	Número de Veículos
<i>density</i>	20, 30, 60, 90 e 120	Veículos/km
<i>speed</i>	36, 54, 72 e 90 km/h	Velocidades distintas dos veículos
<i>dataPacket</i>	48 bytes	Tamanho do pacote
<i>sendingRate</i>	1 pacote/segundo	Taxa de envio de pacotes
<i>propagation</i>	Nakagami	Modelo de propagação
<i>transport</i>	UDP	Protocolo de transporte
<i>MAC/PHY</i>	802.11p	Sistema de comunicação veicular
<i>transmission</i>	1 km	Faixa de transmissão
<i>simTime</i>	300 segundos	Tempo total da simulação
<i>interval</i>	95 %	Intervalo de confiança

4.2.2 Simulação do Algoritmo PE-MHMR

Para o algoritmo *PE-MHMR* o VANET Toolbox do MATLAB foi utilizado como simulador. O modelo de tráfego adotado no trabalho foi criado através do *Simulation of Urban Mobility* (SUMO). Foram simuladas três RSUs com sinais parcialmente sobrepostos e veículos se movimentando de forma aleatória. Os veículos se movimentam em diversas direções, em um plano, para simular saídas repentinas do alcance de RSUs e dos próprios veículos vizinhos, criando, assim, maior dificuldade na realização do *offloading*.

As Figuras 6 e 7 ilustram o modelo de sistema e a seleção dos nós retransmissores, que são energeticamente eficientes, produzindo um caminho de entrega de dados mais eficiente. O modelo de sistema representado é utilizado no estudo proposto para simulação e avaliação do algoritmo desenvolvido. Como dito anteriormente, a escolha e a montagem do caminho de descarregamento são realizadas pelo algoritmo PE-MHMR. A Figura 8 representa o caminho de roteamento encontrado usando o algoritmo desenvolvido para a transferência eficaz de dados de um nó para outro, onde os círculos pretos representam o alcance de cada veículo e os círculos vermelhos o alcance das RSUs. Isso possibilita uma comunicação mais assertiva e com menos atraso e perda de pacotes. Apenas após a seleção eficaz de cada componente, a rota energeticamente eficiente é selecionada e otimizada para a transferência de dados entre nós até a RSU.

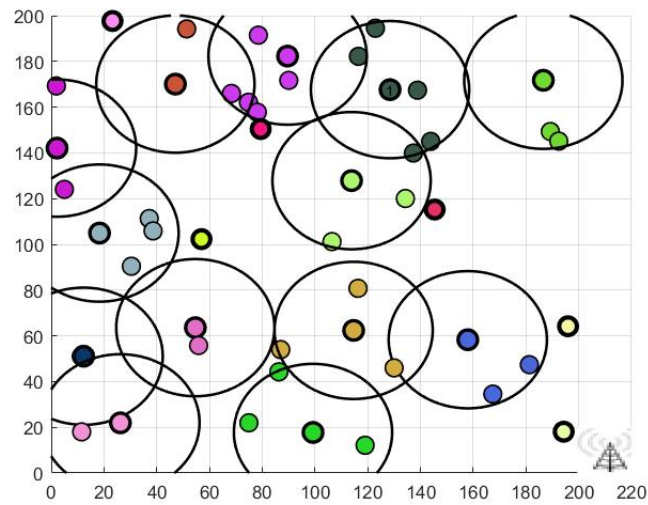
Figure 6 – Modelo de sistema para a metodologia proposta



Fonte: do autor

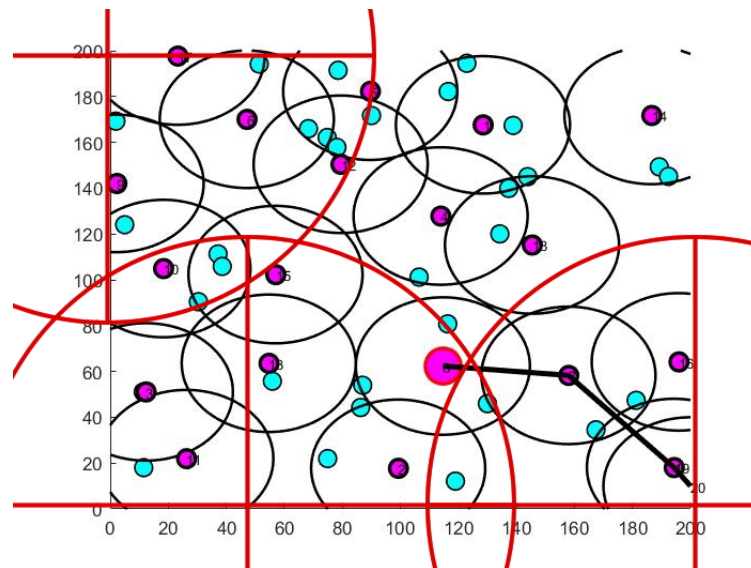
Os intervalos de tempo de partida para os veículos variam dependendo da densidade de veículos simulada. Em situações de alta densidade, o intervalo de tempo de partida é de 0,8 segundos; em situações de densidade média, é de 1,25 segundos; e em situações de baixa densidade, é de 2 segundos. Cada veículo parte de uma posição fixa e exibe comportamentos de condução aleatórios. Os veículos têm a opção de seguir pelas interseções de estrada disponíveis. Quando um veículo está na estrada, ele envia um relatório de contexto ao servidor MEC em intervalos regulares. Em situações normais, o relatório é transmitido a cada 2 segundos. No entanto, se o veículo faz parte de um caminho de descarregamento VVR, o relatório é transmitido a cada 1 segundo. O fluxo de dados entre uma entidade de infraestrutura na beira da estrada e o veículo fonte pode ser estabelecido por meio de uma RSU, utilizando uma rede IEEE 802.11p, ou uma BS (*Base Station* - Estação Base) de uma rede celular. Os dados são, então, transmitidos

Figure 7 – Seleção de nós pelo PE-MHMR



Fonte: do autor

Figure 8 – Caminho de roteamento pelo PE-MHMR



Fonte: do autor

pelo veículo fonte. A Tabela 4 fornece uma visão geral dos parâmetros do ambiente de simulação e seus respectivos valores.

4.3 Resultados

Esta subseção mostra o desempenho geral do algoritmo proposto para a transferência eficaz de nós, de um nó para outro e do nó base para o nó de destino.

Table 4 – Parâmetros usados no ambiente de simulação

Parâmetro	Valor
Duração do tempo de simulação	300s
Intervalo de tempo de partida do veículo (alto/médio/baixo)	0,8s / 1,25s / 2s
Limite de velocidade do veículo	60 km/h
Período de relatórios de contexto	1s / 2s
Alcance do sinal da RSU	300m

Fonte: próprio autor

4.3.1 Resultados *Cp*

Para avaliação do algoritmo *Cp*, as métricas escolhidas foram as mesmas utilizadas em (PANICHPAPIBOON; PATTARA-ATIKOM, 2012; PAULA et al., 2014; LIMA et al., 2015): taxa de entrega, número de transmissões e a taxa de redundância. A taxa de entrega de pacotes normalizada pertence ao intervalo $[0,1]$ em $\mathbb{R}$. Ela é a relação entre a quantidade de veículos receptores dos pacotes transmitidos e o número de veículos da rede. Busca-se entregar um pacote a todos os nós da rede. Assim, apresentam um melhor desempenho os algoritmos com as maiores taxas de entrega. O número de transmissões é uma média da quantidade máxima de transmissões que cada pacote realiza. Busca-se entregar o pacote ao maior número de veículos na rede com o menor número de transmissões possíveis, uma vez que o consumo de energia e de largura de banda se torna menor. Por último, a taxa de redundância indica a quantidade média de duplicações de cada pacote que é recebida pelos veículos. Apresentam um melhor desempenho, os algoritmos com menores taxas de duplicações. Os resultados são apresentados a seguir.

4.3.1.1 Taxa de entrega

A Figura 9 apresenta, através do eixo y, a taxa de entrega obtida pelo algoritmo *Cp* frente aos outros algoritmos com diferentes densidades de veículos, apresentadas pelo eixo x. Pelas simulações, o algoritmo *Cp* apresentou um comportamento constante, próximo a 90% de veículos que receberam o pacote, em todas as densidades de veículos, mesmo quando o trânsito está leve, dificultando a propagação dos pacotes. Os demais algoritmos possuem limitações em tráfego com poucos veículos. Considerando o intervalo de confiança de 95%, em cenários de baixa densidade de veículos (trânsito leve), o *Cp* foi superior aos outros algoritmos, apresentando ainda um ganho de 18% quando comparado ao algoritmo *E-Probt* (LIMA; JÚNIOR, 2016). Em cenários de trânsitos pesados ou congestionados, o *Cp* obteve um comportamento equivalente ao algoritmo *E-Probt*. O ganho apresentado pelo *Cp* é devido ao encaminhamento de pacotes associado ao uso de métricas de redes complexas, capazes de conhecerem os seus melhores vizinhos juntamente com as respectivas probabilidades de retransmissão.

Entre os algoritmos analisados, as piores taxas de entrega são apresentadas

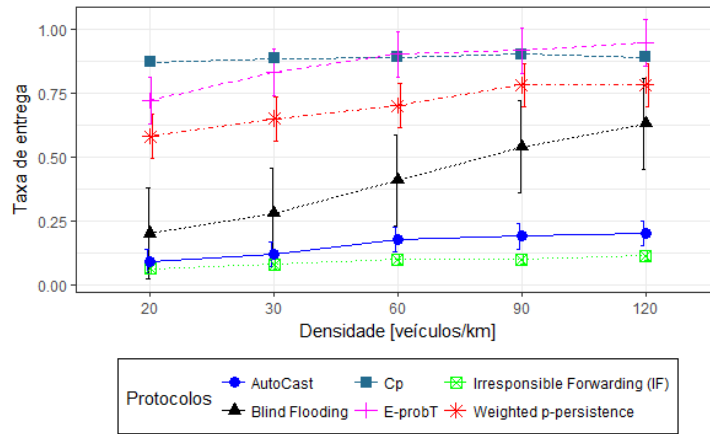


Figure 9 – Taxa de entrega

pelos algoritmos *Blind Flooding*, *AutoCast* e *Irresponsible Forwarding*. Este resultado é justificado pelo fato de que os mesmos não possuem quaisquer mecanismos sobre a verificação de encaminhamento por parte de outros veículos. A assertividade dos algoritmos é dependente de uma modelagem quase perfeita da tendência correta de encaminhamento. O algoritmo *Weighted p-persistence* apresentou uma taxa de entrega regular. O mesmo adota como técnica a verificação da distância para o possível emissor, sendo a sua principal variável durante o cálculo da probabilidade de retransmissão. Mesmo sendo uma abordagem mediana, diversos veículos da rede ainda ficam sem receber o pacote. A razão do não recebimento dos pacotes é explicado, primeiramente, pelo fato de que o algoritmo *Weighted p-persistence* considera um raio de transmissão preenchido por veículos, o que nem sempre se torna verdade. A segunda razão é a não verificação do encaminhamento de pacotes por outros veículos pelo algoritmo.

4.3.1.2 Número de transmissões

Conseguir atingir o maior número de veículos na rede com o menor número de transmissões é o grande desafio das soluções propostas. Número de transmissões deve ser analisado juntamente com a taxa de entrega, uma vez que mantendo uma boa relação entre as duas, pode-se atingir um número alto de veículos sem comprometer a capacidade da largura de banda disponível. O número de transmissões é apresentado na Figura 10.

Os algoritmos *Weighted p-persistence*, *AutoCast* e *Irresponsible Forwarding* apresentaram valores consideravelmente baixos de transmissões. Estes algoritmos não verificam o encaminhamento de pacotes realizados por outros nós, o que deixa os veículos mais distantes do emissor sem receber muitos pacotes. Por não receberem os pacotes, estes não são contabilizados como transmissões realizadas. O *Blind Flooding* obtém uma quantidade de transmissões mediana. Muitos veículos distantes do emissor também não

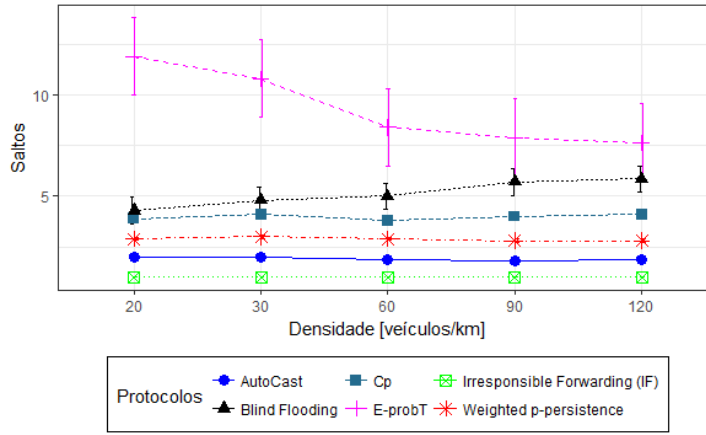


Figure 10 – Número de transmissões

recebem os pacotes devido a alta colisão que ocorre no processo de encaminhamento. O problema destes algoritmos ficam evidentes quando se analisa a relação entre veículos que receberam os pacotes e o número de transmissões realizadas durante a execução. Eles realizam poucas retransmissões, mas também possuem uma taxa de entrega baixa. Os algoritmos com as melhores taxas de entrega possuem comportamentos diferentes quando se analisa o número de transmissões. O *E-Probt* necessita de mais retransmissões para atingir a taxa de entrega próxima a 90%. Enquanto o *Cp* necessita de aproximadamente 50% das transmissões do *E-Probt* para se obter taxas similares e até melhores quando o trânsito está leve ou moderado.

4.3.1.3 Taxa de redundância

A taxa de redundância, definida pela equação 10, mostra o quão eficiente o algoritmo é para escolher corretamente os nós retransmissores de pacotes, evitando que um mesmo veículo receba mais de uma vez o mesmo pacote. Assim como a métrica número de transmissões, esta métrica deve ser avaliada em conjunto à taxa de entrega. Não adianta obter uma taxa de redundância baixa se a taxa de entrega também for baixa. A taxa de redundância obtida pelo *Cp* é exibida na Figura 11.

Os algoritmos *AutoCast* e *Irresponsible Forwarding* apresentaram taxas de redundância baixas, mas também as piores taxas de entrega. O algoritmo *Weighted p-persistence* possui uma taxa mediana de redundância. Entretanto, uma taxa considerável de veículos continua sem receber os pacotes devido a sua média taxa de entrega. *Blind Flooding* e *E-Probt* possuem as piores taxas de redundância. Importante destacar que o algoritmo *Blind Flooding* é o que mais produz pacotes. No entanto, as colisões existentes fazem com que muitos pacotes não sejam contabilizados pela métrica. O *E-Probt*, apesar de ter uma maior taxa de redundância entre os algoritmos avaliados, possui uma taxa de

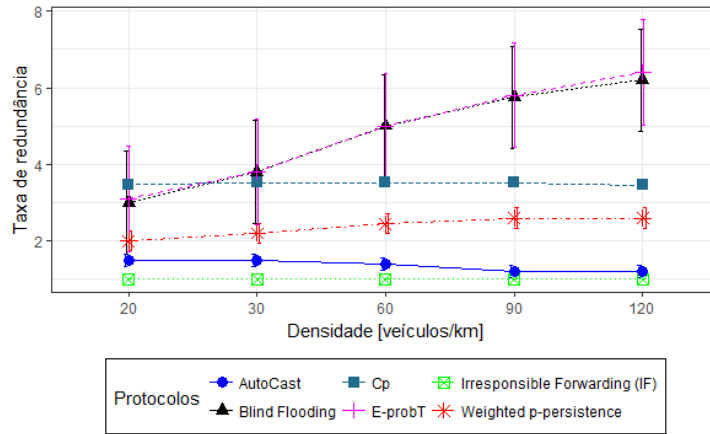


Figure 11 – Taxa de redundância

entrega média de 90%. A melhor relação entre a taxa de redundância e a taxa de entrega foi a do algoritmo *Cp* proposto, que apresentou uma redundância menor que os algoritmos *Blind Flooding* e *E-ProbT*. Ainda, o *Cp* se assemelha com o comportamento dos resultados obtidos do *Weighted p-persistence*, mas com a melhor taxa de entrega, principalmente em ambientes de baixo tráfego ou moderado.

Por fim, um fator importante do algoritmo *Cp* é a sua estabilidade em todas as métricas avaliadas independente da densidade de veículos, justificada pelo melhor conhecimento da rede. Como pode ser observado nas três métricas avaliadas, a densidade não foi o fator preponderante para a dispersão dos resultados obtidos.

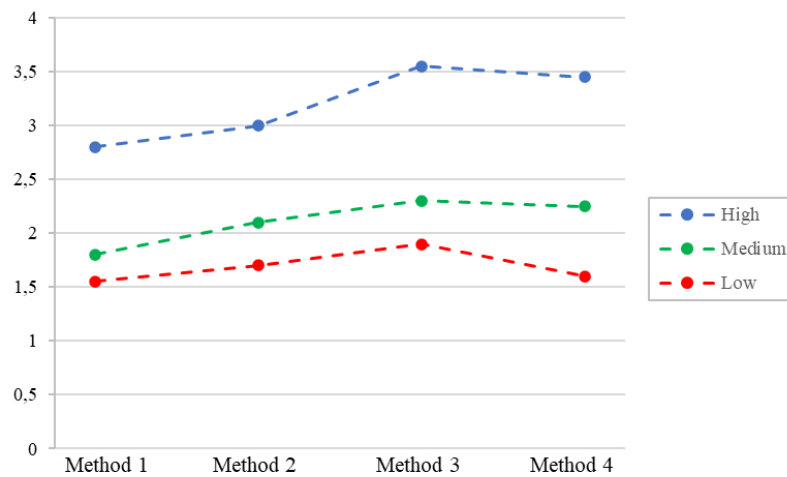
4.3.2 Resultados PE-MHMR

Esta subseção se baseia na representação da fração de níveis de descarregamento de dados em diferentes níveis de salto para o roteamento em comunicações sem fio. Quatro métodos de construção para o caminho de descarregamento de dados da rede veicular são avaliadas neste estudo. O primeiro, nossa proposta, é a abordagem de descarregamento de dados VVR multi-RSU com limitação de k saltos, considerando a qualidade do serviço, energia e o mecanismo de previsão estendida no tempo. O segundo possui as mesmas características, mas não considera a energia para o cálculo da rota e a probabilidade de entrega. O terceiro é uma abordagem de descarregamento de dados VVR multi-RSU com limitação de k saltos, considerando a qualidade do serviço, sem utilizar o mecanismo de previsão estendida no tempo. O quarto método de comparação não permite a troca de RSU se o link com a RSU for perdido.

Sobre os quatro métodos, quatro métricas de desempenho foram avaliadas: (I) Taxa de perda de dados: Esta métrica quantifica a proporção de dados perdidos no caminho de descarregamento de dados VVR, dividida pela quantidade total de dados transmitidos

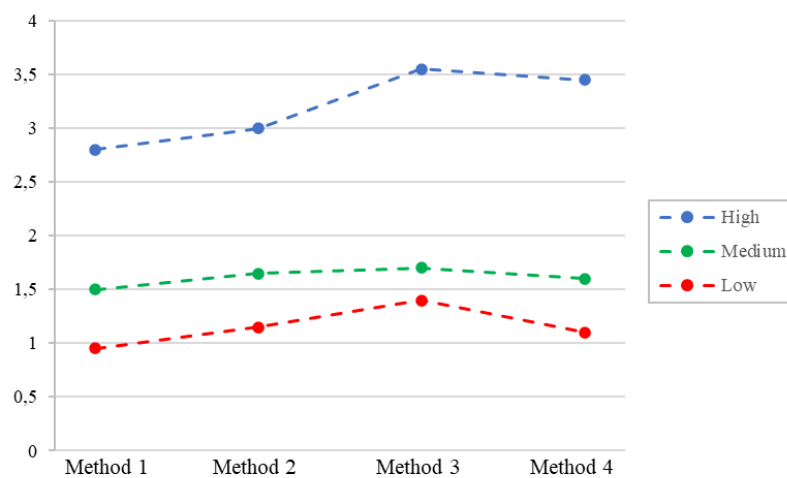
através das RSUs. (II) Fração de descarregamento de dados: Esta métrica representa a proporção de dados descarregados que foram direcionados através das RSUs, dividida pela quantidade total de dados direcionados tanto pela BS quanto pelas RSUs. (III) Fração de descarregamento de dados bem-sucedida: Esta métrica indica a proporção de dados que foram recebidos com sucesso pelo veículo fonte através do caminho de descarregamento de dados VVR, dividida pela quantidade total de dados transmitidos tanto pela BS quanto pelas RSUs. (IV) Número de sessões de descarregamento de dados: Esta métrica representa o número médio de sessões de descarregamento de dados que existiram durante a simulação.

Figure 12 – Taxa de Perda de Dados *10-hop*



Fonte: do autor

Figure 13 – Taxa de Perda de Dados *8-hop*

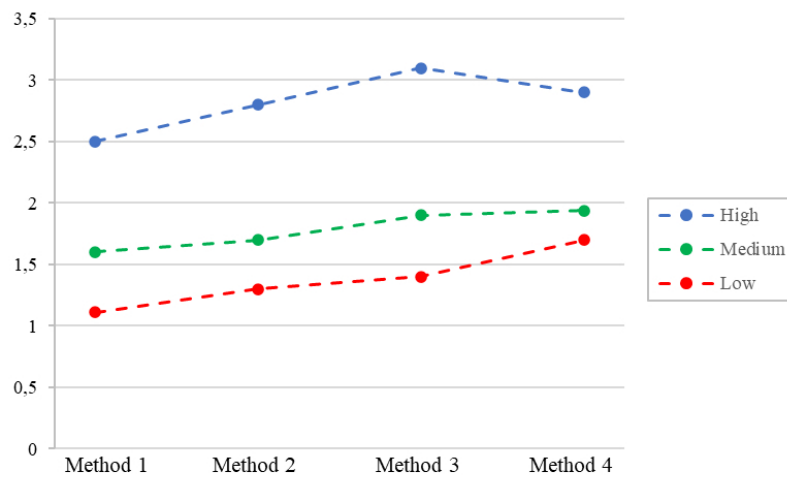


Fonte: do autor

Os gráficos das Figuras 12, 13, 14 e 15 ilustram como a taxa de perda de

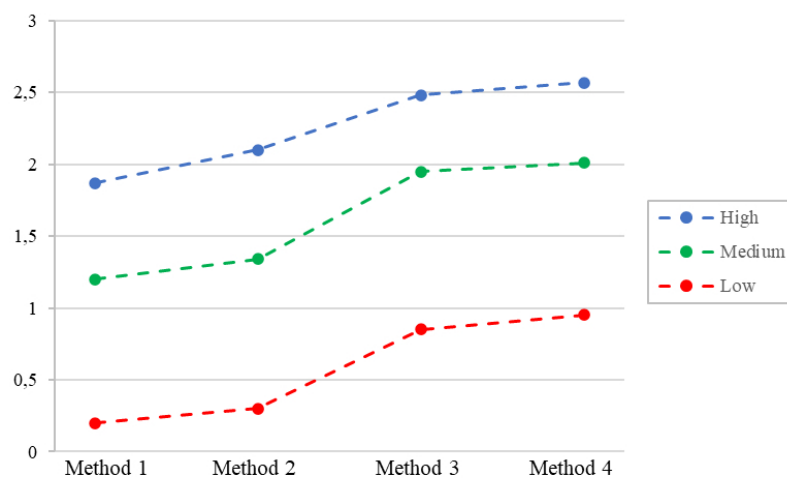
dados varia com o número de saltos. Vários fatores contribuem para a perda de dados. Primeiro, quando há veículos na estrada, a taxa de perda de dados tende a aumentar. Isso acontece porque uma maior densidade de veículos leva à transmissão de dados entre veículos, o que pode resultar em colisões se os dados forem enviados através do caminho de descarregamento de dados VVR. Esse efeito de colisão contribui para a taxa de perda de dados. Em segundo lugar, à medida que o número de saltos aumenta, a taxa de perda de dados também aumenta. Isso ocorre porque um caminho de descarregamento de dados VVR mais longo significa que os dados transmitidos precisam passar por links VV, tornando-os mais vulneráveis a perdas.

Figure 14 – Taxa de Perda de Dados 4-hop



Fonte: do autor

Figure 15 – Taxa de Perda de Dados 2-hop

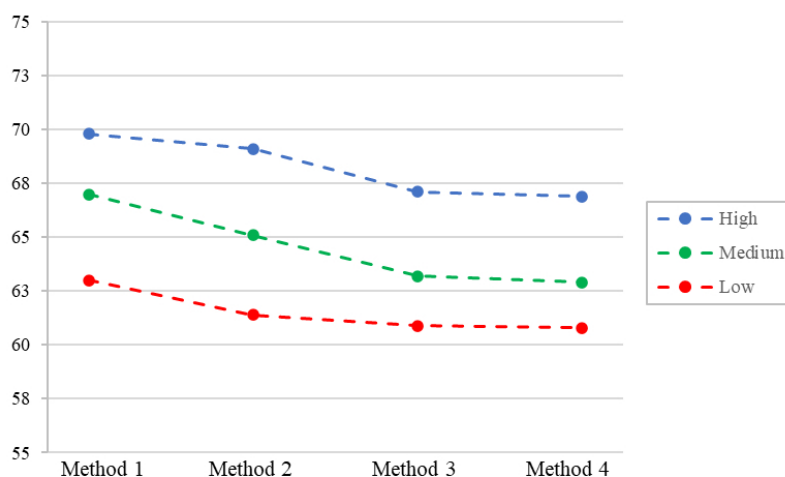


Fonte: do autor

No gráfico, a taxa de perda de dados no método I é apresenta melhor desempenho

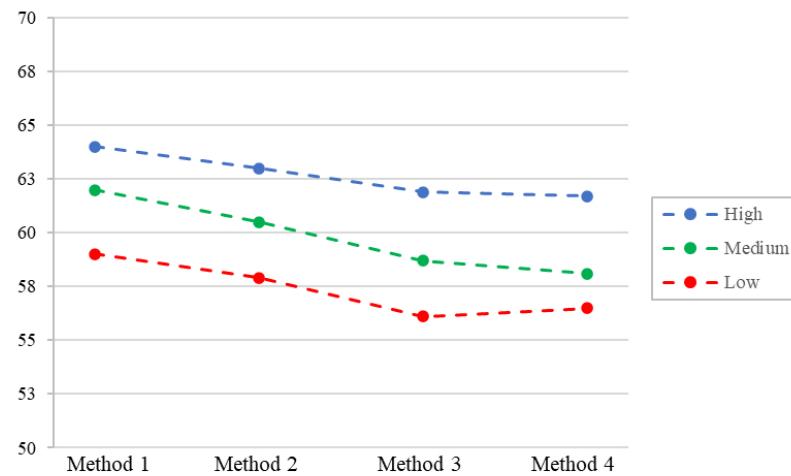
que os demais. Isso significa que os métodos que adotam o mecanismo de previsão estendida no tempo em conjunto com a otimização de energia têm uma taxa de perda de dados mais baixa. Isso ocorre porque o mecanismo de previsão estendida ajuda o servidor MEC a encontrar mais caminhos candidatos. Além disso, um caminho candidato que utilize um caminho energeticamente melhor diminui os riscos de perda de comunicação devido a desconexões, aumentando a probabilidade de entrega bem-sucedida. Portanto, o caminho de descarregamento de dados VVR selecionado pode fornecer uma melhor qualidade de serviço (QoS), resultando em uma menor taxa de perda de dados. Por fim, a taxa de perda de dados nos métodos I e II é ligeiramente menor do que nos métodos III e IV. Isso significa que métodos que permitem ao (Agente de Descarregamento) realizar a troca de RSU em regiões com sinais de RSU sobrepostos, ou seja, em ambientes com múltiplos RSUs, têm uma taxa de perda de dados mais baixa.

Figure 16 – Fração de Descarregamento de Dados 10-hop

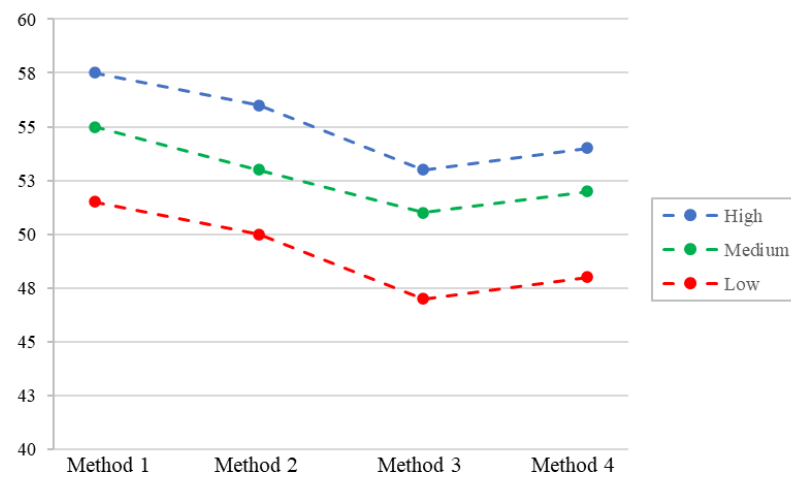


Fonte: do autor

Os gráficos das Figuras 19, 18, 17 e 16 ilustram a fração de descarregamento dados, que corresponde à quantidade de dados descarregados que foram direcionados através de RSUs dividida pela quantidade de dados que foram direcionados através de BSs e RSUs. Existem quatro fatores que afetam a fração de descarregamento de dados. Primeiramente, uma maior densidade de veículos leva a uma maior fração de descarregamento de dados. Isso ocorre porque um caminho de descarregamento de dados VVR é mais provável de ser estabelecido em situações com maior densidade de veículos. Em segundo lugar, a fração de descarregamento de dados é maior quando o sistema tem um limite de contagem de saltos maior. Isso ocorre porque um limite de contagem de saltos maior permite que o veículo fonte inicie o descarregamento de dados mais cedo, possibilitando o estabelecimento de uma sessão de descarregamento de dados em uma fase inicial. Como resultado, o tempo total para descarregar o tráfego de dados é mais longo, levando a uma maior fração de

Figure 17 – Fração de Descarregamento de Dados 8-hop

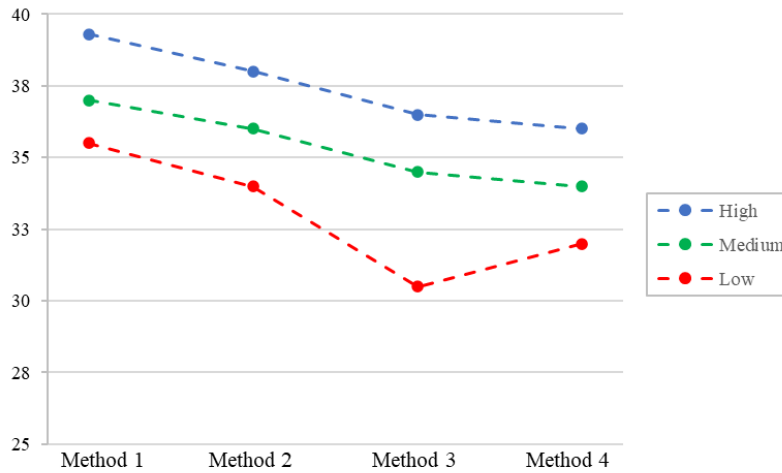
Fonte: do autor

Figure 18 – Fração de Descarregamento de Dados 4-hop

Fonte: do autor

descarregamento de dados.

Em terceiro lugar, a fração de descarregamento de dados dos em métodos que utilizam o mecanismo de previsão estendida no tempo associado a caminhos energeticamente eficientes, é sempre maior. Essa relação se deve ao fato de o mecanismo de previsão estendida no tempo oferecer duas vantagens. A primeira vantagem é a utilização potencial de caminhos de descarregamento de dados VVR com vidas úteis mais curtas. Outra vantagem do mecanismo de previsão estendida no tempo é a capacidade de iniciar um caminho de descarregamento de dados mais cedo. Essa vantagem decorre da detecção de possíveis caminhos de descarregamento de dados VVR que podem não existir no momento em que o servidor MEC recebe o relatório de contexto periódico do veículo

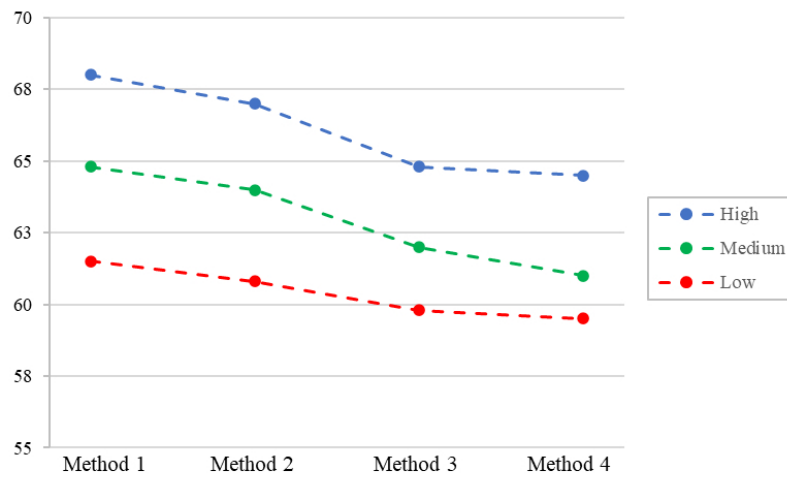
Figure 19 – Fração de Descarregamento de Dados 2-hop

Fonte: do autor

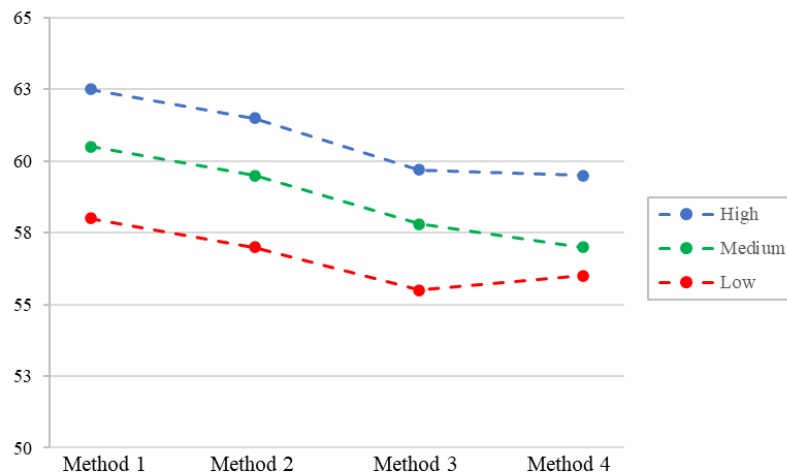
fonte, mas que se tornarão disponíveis no futuro, especificamente entre dois pontos de tempo consecutivos de relatórios de contexto.

O quarto fator que afeta a fração de descarregamento de dados é a implantação de múltiplos RSUs e a troca de RSU. Nos métodos I e II, onde tanto o AD (Agente de Descarregamento) quanto o veículo fonte podem utilizar a troca de RSU em regiões onde múltiplos RSUs têm sinais sobrepostos, a fração de descarregamento de dados em um ambiente de múltiplos RSUs é maior em comparação a outras nos métodos, onde o AD não realiza a troca de RSU. Essa relação ocorre porque, se o servidor MEC não consegue encontrar um caminho alternativo de descarregamento de dados VVR usando o esquema de re-seleção de AD, o método que incorpora a troca de RSU pode manter a sessão de descarregamento de dados VVR ao transitar para RSUs subsequentes ao longo do caminho original. Como resultado, permitir que tanto o AD quanto o veículo fonte realizem a troca de RSU estende a duração da sessão de descarregamento de dados VVR, resultando em uma maior fração de descarregamento de dados.

Os mesmos níveis de descarregamento de dados bem sucedidos usando diferentes densidades de nós são ilustrados nos gráficos das Figuras 23, 22, 21 e 20. A fração de descarregamento de dados bem sucedidos é influenciada tanto pela fração de descarregamento de dados quanto pela taxa de perda de dados. Observando os resultados da avaliação, pode-se ver que a fração de descarregamento de dados bem sucedidos é proporcional à densidade de veículos. Essa relação ocorre porque uma maior densidade de veículos leva a uma maior fração de descarregamento de dados, superando o impacto do aumento da taxa de perda de dados. Além disso, aumentar o limite de contagem de saltos em cada situação de densidade de veículos aumenta a fração de descarregamento de dados bem-sucedidos. Isso se deve ao fato de que os efeitos de permitir que o AD realize a troca

Figure 20 – Fração de Descarregamento de Dados Bem-Sucedida 10-hop

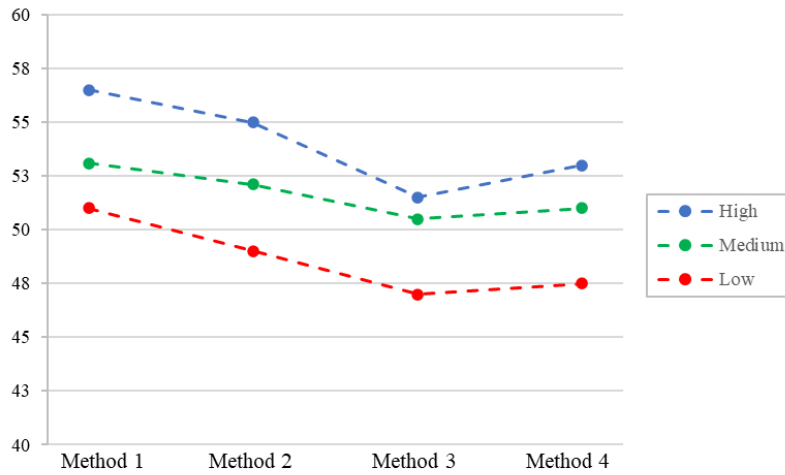
Fonte: do autor

Figure 21 – Fração de Descarregamento de Dados Bem-Sucedida 8-hop

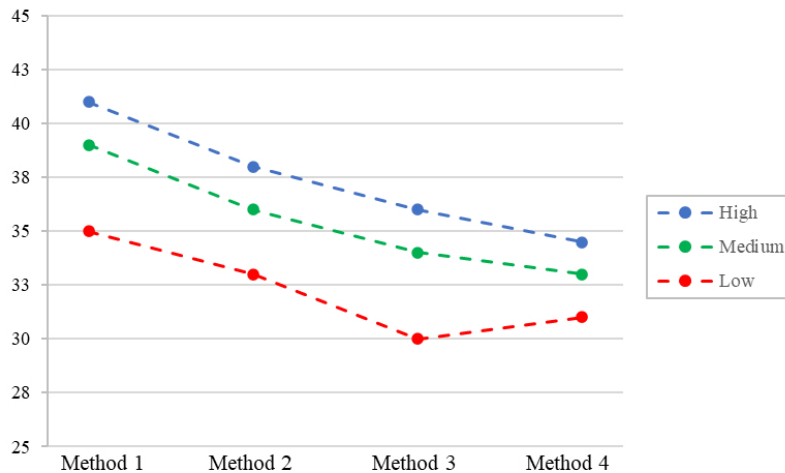
Fonte: do autor

de RSU em um ambiente de múltiplos RSUs e utilize o mecanismo de previsão estendida no tempo têm um impacto mais significativo do que a taxa de perda de dados. Como resultado, a fração de descarregamento de dados bem sucedidos é maior em situações de alta densidade de veículos em comparação com situações de baixa densidade de veículos.

Os resultados da avaliação ilustrados nos gráficos das Figuras 27, 26, 25 e 24 mostram que o número de sessões de descarregamento de dados varia com base tanto no limite de contagem de saltos quanto na densidade de veículos. Ao considerar um limite de contagem de saltos (2 saltos ou 4 saltos), observa-se que o cenário de densidade média de veículos exibe o maior número de sessões em comparação com situações de baixa e alta densidade de veículos. Isso pode ser atribuído às oportunidades que o servidor MEC tem

Figure 22 – Fração de Descarregamento de Dados Bem-Sucedida 4-hop

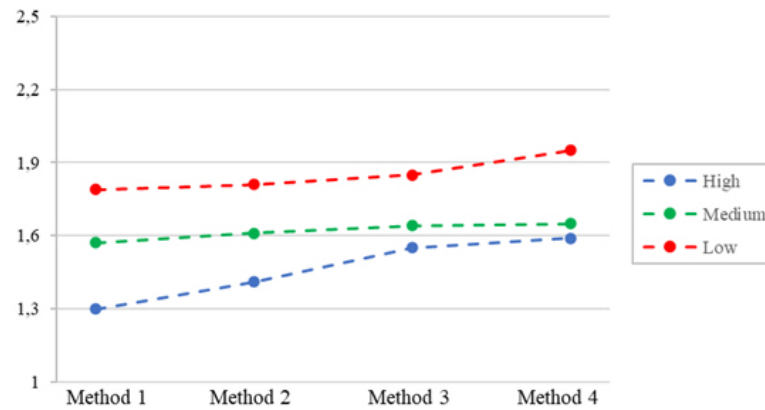
Fonte: do autor

Figure 23 – Fração de Descarregamento de Dados Bem-Sucedida 2-hop

Fonte: do autor

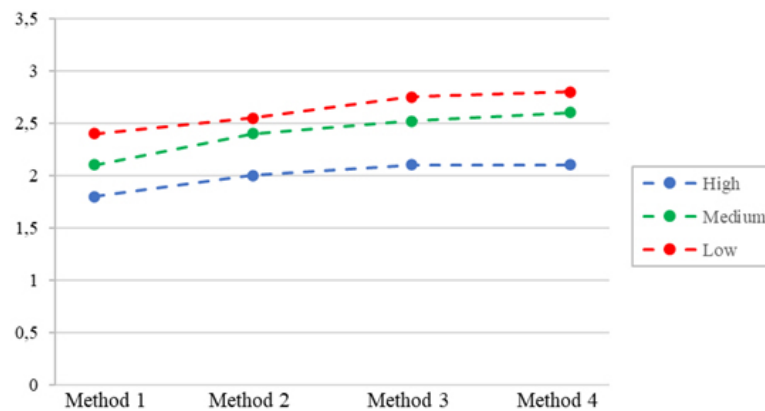
de encontrar caminhos de descarregamento de dados VVR em cenários com densidade média de veículos, resultando em caminhos com vidas mais curtas e, conseqüentemente, levando a um maior número de sessões. Por outro lado, ao lidar com um limite de contagem de saltos (8 saltos e 10 saltos), o número de sessões mostra uma relação inversa com a densidade de veículos. À medida que a densidade de veículos aumenta, há uma diminuição no número de sessões de descarregamento de dados. Isso pode ser explicado pelo fato de que em cenários com um limite de contagem de saltos há possibilidades de selecionar caminhos de descarregamento de dados VVR com maior duração em vez de caminhos mais curtos. Conseqüentemente, isso prolonga a vida útil de uma sessão enquanto reduz o número total de sessões.

Figure 24 – Número de sessões de descarregamento de dados *10-hop*



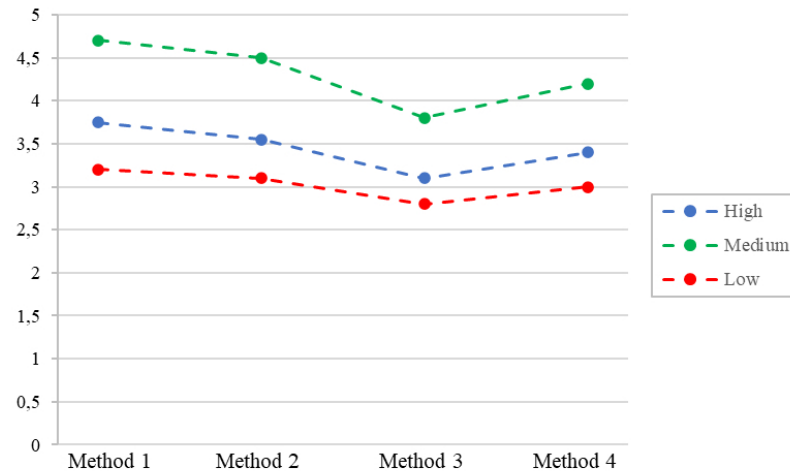
Fonte: do autor

Figure 25 – Número de sessões de descarregamento de dados *8-hop*

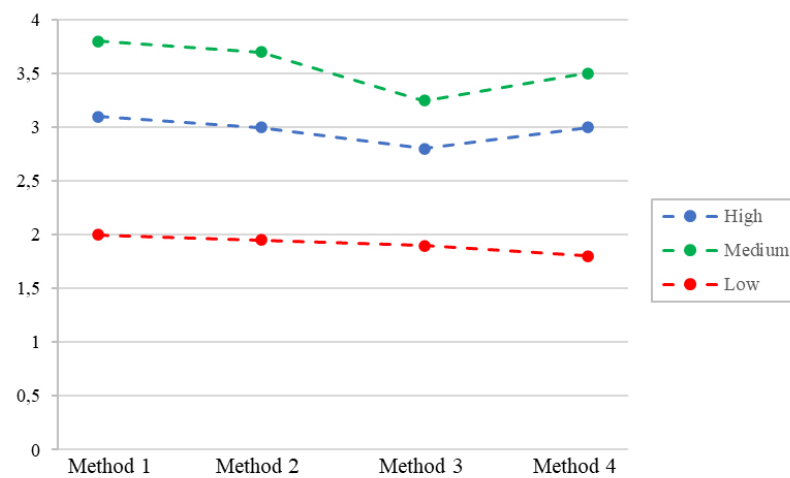


Fonte: do autor

Para resumir, ao aumentar o limite de contagem de saltos de 2 para 4, há um aumento no número de sessões de descarregamento em cenários com esse limite. Por outro lado, aumentar o limite de contagem de saltos de 8 para 10 resulta em uma diminuição das sessões em situações com esse limite.

Figure 26 – Número de sessões de descarregamento de dados *4-hop*

Fonte: do autor

Figure 27 – Número de sessões de descarregamento de dados *2-hop*

Fonte: do autor

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este Capítulo resume esta pesquisa em duas seções: a primeira conclui o trabalho e a segunda apresenta trabalhos futuros.

5.1 Considerações Finais e Contribuições

Em um ambiente com múltiplas RSUs e veículos, a necessidade de soluções eficazes para reduzir a perda de pacotes e o tráfego de dados da rede é crucial.

O algoritmo Cp emprega técnicas avançadas, como a seleção de veículos vizinhos retransmissores baseada em métricas de redes complexas, para aumentar a probabilidade de sucesso de transmissão em um enlace de redes veiculares. Os resultados obtidos por meio de simulações evidenciam que o Cp promove melhorias significativas na taxa de entrega em cenários de baixa densidade veicular. Além disso, o algoritmo mantém uma elevada taxa de entrega geral, ao mesmo tempo em que reduz a redundância de mensagens, destacando sua eficiência no contexto de redes veiculares.

O PE-MHMR demonstrou ser uma abordagem inovadora e eficiente, mostrando que a consideração de parâmetros relacionados à qualidade do link entre veículos e ao fator de energia como entradas para a seleção do melhor caminho de tráfego de dados é essencial para o sucesso da comunicação. Até o momento, essas métricas haviam sido negligenciadas na maioria das abordagens existentes.

A comparação do PE-MHMR com soluções apresentadas na literatura revelou avanços significativos. O método não apenas reduziu a taxa de perda de pacotes, mas também aumentou a taxa de sucesso no descarregamento de dados e manteve um número estável de sessões. Estes resultados destacam a eficiência do PE-MHMR em ambientes dinâmicos e complexos, onde as condições de tráfego e a qualidade dos links podem variar consideravelmente.

Quando comparado com soluções genéricas bem estabelecidas, o PE-MHMR mostrou melhorias substanciais em todas as métricas analisadas, incluindo taxa de entrega de pacotes, eficiência energética e longevidade da rede. Estes avanços são particularmente importantes em cenários de alta demanda e alta densidade de veículos, onde a otimização do tráfego de dados e a minimização da perda de pacotes são desafios críticos.

Para o futuro, há várias direções promissoras para expandir e aprimorar o PE-

MHMR. A integração de novos modelos de mobilidade poderia fornecer uma compreensão mais profunda do comportamento dos veículos em diferentes cenários e melhorar a adaptação do método a novas condições de tráfego. Além disso, a adoção de tecnologias emergentes, como redes celulares 6G, poderia oferecer maior largura de banda e menores latências, beneficiando ainda mais o desempenho do PE-MHMR.

Adicionalmente, o desenvolvimento de novos métodos para calcular a probabilidade de entrega bem-sucedida poderia refinar a função de ajuste do PE-MHMR, aprimorar a qualidade do link e aumentar a eficiência do link. Essas melhorias poderiam contribuir para a criação de redes veiculares mais robustas e confiáveis, capazes de suportar uma comunicação mais eficiente e uma maior qualidade de serviço.

Em resumo, o PE-MHMR representa um avanço significativo em relação às soluções existentes, oferecendo uma abordagem mais integrada e eficaz para a gestão de dados em redes veiculares. O contínuo desenvolvimento e a inovação em métodos relacionados ao PE-MHMR têm o potencial de transformar significativamente a comunicação em ambientes complexos e dinâmicos, promovendo um futuro mais conectado e eficiente para as redes veiculares.

5.2 Trabalhos Futuros

O PE-MHMR apresenta uma base sólida para futuras investigações e aprimoramentos. As seguintes direções são recomendadas para expandir e aprofundar o trabalho atual:

- **Integração de Novos Modelos de Mobilidade:** A introdução de novos modelos de mobilidade que melhor representem a dinâmica dos veículos em diferentes cenários poderia fornecer insights mais detalhados sobre o comportamento dos veículos e melhorar a eficácia do PE-MHMR em situações variadas. Modelos que considerem diferentes padrões de movimento e interações entre veículos podem otimizar ainda mais a seleção de caminhos e a eficiência da rede.
- **Adaptação a Tecnologias Emergentes:** A implementação do PE-MHMR em redes celulares 6G e outras tecnologias emergentes pode oferecer maiores larguras de banda, menores latências e capacidades significativamente ampliadas. Estudar a integração do PE-MHMR com a infraestrutura 6G permitirá avaliar como essas tecnologias avançadas podem aprimorar a comunicação veicular, proporcionando uma rede mais robusta e eficiente.
- **Aprimoramento dos Métodos de Cálculo de Probabilidade de Entrega:** Desenvolver e testar novos métodos para calcular a probabilidade de entrega bem-sucedida pode

refinar a função de ajuste do PE-MHMR. Isso pode incluir a consideração de fatores adicionais como variações na qualidade do sinal e a capacidade de processamento dos veículos, o que pode resultar em uma melhor previsão da eficiência do caminho de dados.

- **Avaliação de Impactos Ambientais e Energéticos:** Investigar como o PE-MHMR pode ser ajustado para minimizar o impacto ambiental e energético das redes veiculares pode ser uma área importante para pesquisas futuras. Isso pode envolver o desenvolvimento de algoritmos que otimizem o consumo de energia sem comprometer a qualidade do serviço, especialmente em contextos com restrições de recursos.
- **Expansão para Ambientes de Grande Escala:** Realizar simulações e implementações em ambientes de grande escala para avaliar o desempenho do PE-MHMR em redes veiculares com alta densidade de veículos e múltiplas RSUs. Isso permitirá verificar a escalabilidade do método e identificar possíveis limitações ou áreas de melhoria.
- **Integração com Sistemas de Inteligência Artificial:** Explorar o uso de técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina para melhorar a previsão e a tomada de decisão no PE-MHMR. Algoritmos inteligentes podem otimizar a seleção de caminhos e a gestão de tráfego com base em dados em tempo real e padrões históricos.
- **Desenvolvimento de Protocolos de Segurança:** Considerar a implementação de protocolos de segurança para proteger os dados durante o processo de offloading e garantir a privacidade e integridade das informações trocadas entre veículos e RSUs.
- **Avaliação de Desempenho em Cenários Reais:** Conduzir testes e validações em cenários reais para verificar a eficácia do PE-MHMR fora do ambiente simulado. Isso pode fornecer uma visão prática sobre o desempenho do método em condições reais de operação.

Esses trabalhos futuros não só podem melhorar a eficácia e a aplicabilidade do PE-MHMR, mas também contribuir para o avanço geral das redes veiculares e das tecnologias de comunicação associadas.

BIBLIOGRAFIA

- AGIWAL, M.; ROY, A.; SAXENA, N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS TUTORIALS*, v. 18, n. 3, p. 1617–1655, 2016. ISSN 1553-877X.
- AHMAD, I. et al. A cooperative heterogeneous vehicular clustering framework for efficiency improvement. *FRONTIERS OF INFORMATION TECHNOLOGY & ELECTRONIC ENGINEERING*, Springer, v. 22, n. 9, p. 1247–1259, 2021.
- AHMED, M. et al. Vehicular communication network enabled cav data offloading: A review. *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, IEEE, v. 24, n. 8, p. 7869–7897, 2023.
- AHMED, M.; SERAJ, R.; ISLAM, S. M. S. The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation. *ELECTRONICS*, MDPI, v. 9, n. 8, p. 1295, 2020.
- AL-SHAREEDA, M. A.; MANICKAM, S. A systematic literature review on security of vehicular ad-hoc network (vanet) based on veins framework. *IEEE ACCESS*, IEEE, v. 11, p. 46218–46228, 2023.
- ALSHAER, H.; HORLAIT, E. An optimized adaptive broadcast scheme for intervehicle communication. In: *VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 5, p. 2840–2844.
- AMARAL, I. Complex networks. In: *ENCYCLOPEDIA OF BIG DATA*. [S.l.]: Springer, 2022. p. 198–201.
- APOSTOLOPOULOS, P. A. et al. Data offloading in uav-assisted multi-access edge computing systems under resource uncertainty. *IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING*, IEEE, v. 22, n. 1, p. 175–190, 2021.
- BAYAN, S.; MOHAMMAD, U. A survey of data dissemination schemes in secure inter-vehicle communications. In: *IEEE. 2023 IEEE 13TH ANNUAL COMPUTING AND COMMUNICATION WORKSHOP AND CONFERENCE (CCWC)*. [S.l.], 2023. p. 1224–1230.
- BEHRISCH, M. et al. Sumo–simulation of urban mobility: an overview. In: *THINKMIND. PROCEEDINGS OF SIMUL 2011, THE THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN SYSTEM SIMULATION*. [S.l.], 2011.
- BHARANY, S. et al. Energy-efficient clustering protocol for underwater wireless sensor networks using optimized glowworm swarm optimization. *FRONTIERS IN MARINE SCIENCE*, Frontiers Media SA, v. 10, p. 1117787, 2023.
- BOCCALETTI, S. et al. Complex networks: Structure and dynamics. *PHYSICS REPORTS*, Elsevier, v. 424, n. 4-5, p. 175–308, 2006.

CAO, B. et al. Intelligent offloading in multi-access edge computing: A state-of-the-art review and framework. *IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE*, IEEE, v. 57, n. 3, p. 56–62, 2019.

CHAVHAN, S. et al. Shift to 6g: Exploration on trends, vision, requirements, technologies, research, and standardization efforts. *SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES AND ASSESSMENTS*, Elsevier, v. 54, p. 102666, 2022.

CHEN, Y.-R. et al. Rl-routing: An sdn routing algorithm based on deep reinforcement learning. *IEEE TRANSACTIONS ON NETWORK SCIENCE AND ENGINEERING*, IEEE, v. 7, n. 4, p. 3185–3199, 2020.

CHOI, Y.; LIM, Y. Deep reinforcement learning for edge caching with mobility prediction in vehicular networks. *SENSORS*, MDPI, v. 23, n. 3, p. 1732, 2023.

DAI, W. Joint task offloading, resource allocation and data caching in mec-assisted vehicular network. In: IEEE. 2023 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER ENGINEERING AND APPLICATION (ICCEA). [S.l.], 2023. p. 70–76.

DUAN, X.; LIU, Y.; WANG, X. SDN Enabled 5G-VANET: Adaptive Vehicle Clustering and Beamformed Transmission for Aggregated Traffic. *IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE*, v. 55, n. 7, p. 120–127, 2017. Available on: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7981536/>>.

FENG, C. et al. Computation offloading in mobile edge computing networks: A survey. *JOURNAL OF NETWORK AND COMPUTER APPLICATIONS*, Elsevier, v. 202, p. 103366, 2022.

GUPTA, A.; JHA, R. K. A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. *IEEE ACCESS*, v. 3, p. 1206–1232, 2015.

HAGBERG, A.; CONWAY, D. Networkx: Network analysis with python. URL: [HTTPS://NETWORKX.GITHUB.IO](https://networkx.github.io/), 2020.

HAMDI, M. M. et al. An overview of challenges for data dissemination and routing protocols in vanets. In: IEEE. 2021 3RD INTERNATIONAL CONGRESS ON HUMAN-COMPUTER INTERACTION, OPTIMIZATION AND ROBOTIC APPLICATIONS (HORA). [S.l.], 2021. p. 1–6.

HAMDI, M. M. et al. A review of applications, characteristics and challenges in vehicular ad hoc networks (vanets). In: IEEE. 2020 INTERNATIONAL CONGRESS ON HUMAN-COMPUTER INTERACTION, OPTIMIZATION AND ROBOTIC APPLICATIONS (HORA). [S.l.], 2020. p. 1–7.

HASSAN, S.-U. et al. Leveraging deep learning and sna approaches for smart city policing in the developing world. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION MANAGEMENT*, Elsevier, v. 56, p. 102045, 2021.

HEMMATI, A.; ZAREI, M.; RAHMANI, A. M. A systematic review of congestion control in internet of vehicles and vehicular ad hoc networks: techniques, challenges, and open issues. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATION SYSTEMS*, Wiley Online Library, v. 37, n. 1, p. e5625, 2024.

- HENDERSON, T. R. et al. Network simulations with the ns-3 simulator. *SIGCOMM DEMONSTRATION*, v. 14, n. 14, p. 527, 2008.
- HOFSTAD, R. V. D. *RANDOM GRAPHS AND COMPLEX NETWORKS*. [S.l.]: Cambridge university press, 2024.
- HOZOURI, A. et al. An overview of vanet vehicular networks. *ARXIV PREPRINT ARXIV:2309.06555*, 2023.
- HSIEH, H.-C.; CHEN, J.-L.; BENSLIMANE, A. 5g virtualized multi-access edge computing platform for iot applications. *JOURNAL OF NETWORK AND COMPUTER APPLICATIONS*, Elsevier, v. 115, p. 94–102, 2018.
- HUANG, C.-M. et al. V2v data offloading for cellular network based on the software defined network (sdn) inside mobile edge computing (mec) architecture. *IEEE ACCESS*, IEEE, v. 6, p. 17741–17755, 2018.
- HUANG, C.-M.; LAI, C.-F. The delay-constrained and network-situation-aware v2v2i vanet data offloading based on the multi-access edge computing (mec) architecture. *IEEE OPEN JOURNAL OF VEHICULAR TECHNOLOGY*, IEEE, v. 1, p. 331–347, 2020.
- HUANG, C.-M.; LIN, S.-Y.; WU, Z.-Y. The k-hop-limited v2v2i vanet data offloading using the mobile edge computing (mec) mechanism. *VEHICULAR COMMUNICATIONS*, Elsevier, v. 26, p. 100268, 2020.
- HUSNAIN, G.; ANWAR, S.; SHAHZAD, F. An enhanced ai-enabled routing optimization algorithm for internet of vehicles (ioV). *WIRELESS PERSONAL COMMUNICATIONS*, Springer, v. 130, n. 4, p. 2623–2643, 2023.
- HUSSEIN, A. et al. SDN VANETs in 5G: An architecture for resilient security services. *2017 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE DEFINED SYSTEMS, SDS 2017*, p. 67–74, 2017.
- HUSSEIN, A. A.; MAHMOOD, D. A. Connectivity analysis in vehicular ad-hoc network based on vdtN. *JOURNAL OF COMMUNICATIONS SOFTWARE AND SYSTEMS*, Udruga za komunikacijske i informacijske tehnologije, v. 19, n. 2, p. 147–157, 2023.
- HUSSEIN, N. H. et al. Sdn-based vanet routing: A comprehensive survey on architectures, protocols, analysis, and future challenges. *IEEE ACCESS*, IEEE, 2024.
- ISLAM, A. et al. A survey on task offloading in multi-access edge computing. *JOURNAL OF SYSTEMS ARCHITECTURE*, Elsevier, v. 118, p. 102225, 2021.
- ISLAM, M. M. et al. Connected autonomous vehicles: State of practice. *APPLIED STOCHASTIC MODELS IN BUSINESS AND INDUSTRY*, Wiley Online Library, v. 39, n. 5, p. 684–700, 2023.
- JACOBSON, V. Congestion avoidance and control. In: *ACM SIGCOMM COMPUTER COMMUNICATION REVIEW*. [S.l.: s.n.], 1988. v. 18, p. 14–329.
- KARABULUT, M. A. et al. Inspecting vanet with various critical aspects—a systematic review. *AD HOC NETWORKS*, Elsevier, p. 103281, 2023.

- KHAN, A. A.; ABOLHASAN, M.; NI, W. 5G next generation VANETs using SDN and fog computing framework. In: 2018 15TH IEEE ANNUAL CONSUMER COMMUNICATIONS & NETWORKING CONFERENCE (CCNC). IEEE, 2018. v. 2018-Janua, p. 1–6. Available on: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8319192/>>.
- LIANG, B.; GREGORY, M. A.; LI, S. Multi-access edge computing fundamentals, services, enablers and challenges: A complete survey. JOURNAL OF NETWORK AND COMPUTER APPLICATIONS, Elsevier, v. 199, p. 103308, 2022.
- LIMA, D. S.; JÚNIOR, J. C. E-probT: A New Approach to Mitigate the Broadcast Storm Problem in VANETs. In: PROCEEDINGS OF THE 31ST ANNUAL ACM SYMPOSIUM ON APPLIED COMPUTING. New York, NY, USA: ACM, 2016. (SAC '16), p. 709–715. ISBN 978-1-4503-3739-7.
- LIMA, D. S. et al. ProbT: A temporal probabilistic protocol to mitigate the broadcast storm problem in VANETs. In: 2015 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION NETWORKING (ICOIN). [S.l.: s.n.], 2015. p. 7–12. ISSN 1550-445X.
- LIN, S.-Y.; HUANG, C.-M.; WU, T.-Y. Multi-access edge computing-based vehicle-vehicle-rsu data offloading over the multi-rsu-overlapped environment. IEEE OPEN JOURNAL OF INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, IEEE, v. 3, p. 7–32, 2022.
- LOUSADA, E. E. et al. Using complex networks metrics to mitigate the broadcast storm problem. In: IEEE. 2019 IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATIONS (ISCC). [S.l.], 2019. p. 1–6.
- MITRA, R. N.; AGRAWAL, D. P. 5G mobile technology: A survey. ICT EXPRESS, Elsevier B.V., v. 1, n. 3, p. 132–137, 2015. Available on: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ict.2016.01.003>>.
- PANICHPAPIBOON, S.; PATTARA-ATIKOM, W. A Review of Information Dissemination Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS TUTORIALS, v. 14, n. 3, p. 784–798, 2012. ISSN 1553-877X.
- PATIL, A. N.; MALLAPUR, S. V. A review on security-based routing protocols for vehicular ad hoc networks. In: IEEE. 2022 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTEMPORARY COMPUTING AND INFORMATICS (IC3I). [S.l.], 2022. p. 399–405.
- PAULA, M. R. P. et al. A Technique to Mitigate the Broadcast Storm Problem in VANETs. ICN 2014, p. 253, 2014.
- PORAMBAGE, P. et al. Survey on multi-access edge computing for internet of things realization. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, IEEE, v. 20, n. 4, p. 2961–2991, 2018.
- RAMESH, A.; PUNNIAKODI, S. A comprehensive study on qos enhancement in sdn based vanet. In: IEEE. 2024 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING, COMPUTATION, ELECTRONICS, POWER AND TELECOMMUNICATION (ICONSCPT). [S.l.], 2024. p. 1–6.
- RANAWEERA, P.; JURCUT, A. D.; LIYANAGE, M. Survey on multi-access edge computing security and privacy. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, IEEE, v. 23, n. 2, p. 1078–1124, 2021.

- RASHID, S. A. et al. Centralized rsu deployment strategy for effective communication in multi-hop vehicular adhoc networks (vanets). In: SPRINGER. INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE COMPUTING AND COMMUNICATION. [S.l.], 2023. p. 53–65.
- RILEY, G. F.; HENDERSON, T. R. The ns-3 network simulator. In: MODELING AND TOOLS FOR NETWORK SIMULATION. [S.l.]: Springer, 2010. p. 15–34.
- ROSELE, N. et al. Digital transformation in wireless networks: A comprehensive analysis of mobile data offloading techniques, challenges, and future prospects. JOURNAL OF KING SAUD UNIVERSITY-COMPUTER AND INFORMATION SCIENCES, Elsevier, v. 36, n. 5, p. 102071, 2024.
- SAEED, T. et al. Modeling Probabilistic Flooding in VANETs for Optimal Rebroadcast Probabilities. IEEE TRANS. ON INT. TRANSP. SYSTEMS, IEEE, n. 99, p. 1–15, 2018.
- SAOUD, B. et al. Artificial intelligence, internet of things and 6g methodologies in the context of vehicular ad-hoc networks (vanets): Survey. ICT EXPRESS, Elsevier, 2024.
- SEHAR, N. u. et al. Blockchain enabled data security in vehicular networks. SCIENTIFIC REPORTS, Nature Publishing Group UK London, v. 13, n. 1, p. 4412, 2023.
- SHAH, P.; KASBE, T. A review on specification evaluation of broadcasting routing protocols in vanet. COMPUTER SCIENCE REVIEW, Elsevier, v. 41, p. 100418, 2021.
- SHARSHEMBIEV, K.; YOO, S.-M.; ELMAHDI, E. Broadcast storm mitigation from unintentional misbehavior in vehicular ad hoc networks. In: IEEE. 2018 IEEE 8TH ANNUAL COMPUTING AND COMMUNICATION WORKSHOP AND CONFERENCE (CCWC). [S.l.], 2018. p. 925–930.
- SI, P. et al. Dave: Offloading delay-tolerant data traffic to connected vehicle networks. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, IEEE, v. 65, n. 6, p. 3941–3953, 2016.
- SONG, X. et al. Dingo-optimization-based task-offloading algorithm in multihop v2v/v2i-enabled networks. TRANSACTIONS ON EMERGING TELECOMMUNICATIONS TECHNOLOGIES, Wiley Online Library, v. 34, n. 9, p. e4823, 2023.
- SONG, X. et al. Incentive mechanism design for two-layer mobile data offloading networks: a contract theory approach. AD HOC NETWORKS, Elsevier, v. 144, p. 103154, 2023.
- SOUZA, A. M. D. et al. An interest-based approach for reducing network contentions in vehicular transportation systems. SENSORS, MDPI, v. 19, n. 10, p. 2325, 2019.
- SULTANA, R.; GROVER, J.; TRIPATHI, M. Security of sdn-based vehicular ad hoc networks: State-of-the-art and challenges. VEHICULAR COMMUNICATIONS, Elsevier, v. 27, p. 100284, 2021.
- TALEB, T. et al. On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5g network edge cloud architecture and orchestration. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, IEEE, v. 19, n. 3, p. 1657–1681, 2017.

TAMBAWAL, A. B. et al. Enhanced weight-based clustering algorithm to provide reliable delivery for vanet safety applications. *PLOS ONE*, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 14, n. 4, p. e0214664, 2019.

WANG, L. Vanet toolbox: A vehicular network simulator based on discrete event simulation. *MATLAB CENTRAL FILE EXCHANGE*, MATLAB, 2024.

WANG, M. et al. Smart city transportation: A vanet edge computing model to minimize latency and delay utilizing 5g network. *JOURNAL OF GRID COMPUTING*, Springer, v. 22, n. 1, p. 25, 2024.

WANG, P. et al. Traffic-aware optimization of task offloading and content caching in the internet of vehicles. *APPLIED SCIENCES*, MDPI, v. 13, n. 24, p. 13069, 2023.

WEI, D. et al. Privacy-aware multiagent deep reinforcement learning for task offloading in vanet. *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, IEEE, v. 24, n. 11, p. 13108–13122, 2022.

WISITPONGPHAN, N. et al. Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks. *IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS*, v. 14, n. 6, p. 84–94, December 2007. ISSN 1536-1284.

XUE, J.; AN, Y. Joint task offloading and resource allocation for multi-task multi-server noma-mec networks. *IEEE ACCESS*, IEEE, v. 9, p. 16152–16163, 2021.

YEFERNY, T.; HAMAD, S. Vehicular ad-hoc networks: architecture, applications and challenges. *ARXIV PREPRINT ARXIV:2101.04539*, 2021.

YOGARAYAN, S. et al. A review of routing protocols for vehicular ad-hoc networks (vanets). In: *IEEE. 2020 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY (ICoICT)*. [S.l.], 2020. p. 1–7.

YU, T.-Y. et al. Hetcast: Cooperative data delivery on cellular and road side network. In: *IEEE. 2017 IEEE 28TH ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PERSONAL, INDOOR, AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS (PIMRC)*. [S.l.], 2017. p. 1–6.

ZENG, F.; ZHANG, Z.; WU, J. Task offloading delay minimization in vehicular edge computing based on vehicle trajectory prediction. *DIGITAL COMMUNICATIONS AND NETWORKS*, Elsevier, 2024.

ZHANG, H. et al. Security defense decision method based on potential differential game for complex networks. *COMPUTERS & SECURITY*, Elsevier, v. 129, p. 103187, 2023.

ZHU, H. et al. Intersection-based unicast routing using ant colony optimization in software-defined vehicular networks. *ELECTRONICS*, MDPI, v. 12, n. 7, p. 1620, 2023.