



Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Computação



Lucas Borges Rondon

Protocolos Eficientes para Comunicação V2V em Redes Veiculares de Dados Nomeados

CAMPINAS
2020

Lucas Borges Rondon

**Protocolos Eficientes para Comunicação V2V em Redes
Veiculares de Dados Nomeados**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Computação da Universidade Estadual de
Campinas como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Ciência da
Computação.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Aparecido Villas
Coorientador: Prof. Dr. Geraldo Pereira Rocha Filho

Este exemplar corresponde à versão final da
Dissertação defendida por Lucas Borges
Rondon e orientada pelo Prof. Dr. Leandro
Aparecido Villas.

CAMPINAS
2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica
Ana Regina Machado - CRB 8/5467

R668p Rondon, Lucas Borges, 1989-
Protocolos eficientes para comunicação V2V em redes veiculares de dados nomeados / Lucas Borges Rondon. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Leandro Aparecido Villas.
Coorientador: Geraldo Pereira Rocha Filho.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação.

1. Redes ad hoc veiculares (Redes de computadores). I. Villas, Leandro Aparecido, 1983-. II. Rocha Filho, Geraldo Pereira. III. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Efficient protocols for V2V communication in vehicular named-data networks

Palavras-chave em inglês:

Vehicular ad hoc networks (Computer networks)

Área de concentração: Ciência da Computação

Titulação: Mestre em Ciência da Computação

Banca examinadora:

Leandro Aparecido Villas [Orientador]

João do Monte Gomes Duarte

Rodolfo Ipólito Meneguette

Data de defesa: 25-09-2020

Programa de Pós-Graduação: Ciência da Computação

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-0102-4242>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6151731484787990>



Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Computação



Lucas Borges Rondon

Protocolos Eficientes para Comunicação V2V em Redes Veiculares de Dados Nomeados

Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Leandro Aparecido Villas
Universidade Estadual de Campinas
- Prof. Dr. João do Monte Gomes Duarte
Universidade Técnica do Atlântico
- Prof. Dr. Rodolfo Ipólito Meneguette
Universidade de São Paulo

A ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 25 de setembro de 2020

Agradecimentos

A Deus por me capacitar e colocar as pessoas certas no meu caminho durante toda a etapa do mestrado vivenciada em Campinas. À minha família, especialmente à minha mãe Marina e aos meus irmãos Rafael e Larissa, por todo apoio. Ao meu orientador Leandro Aparecido Villas pela rica oportunidade de fazer mestrado na UNICAMP, pela paciência, contribuição na minha formação e pelos ensinamentos que levarei pelo resto da minha vida. Ao meu coorientador Geraldo Pereira Rocha Filho pelos valiosos ensinamentos, reuniões, conselhos, contribuições e por fazer parte da realização de um sonho. Obrigado por tudo.

Aos meus amigos do Instituto de Computação (IC), Beatriz, Rogério, Lucas Porto, Joahannes, Takeo, Napoli, João do Monte e Aissa, que são pessoas de bom coração e que estavam sempre dispostas a me ajudar nos momentos de dificuldade. Obrigado por tudo pessoal, sou grato a Deus por ter colocado pessoas especiais na minha vida. Agradeço a todos integrantes do Laboratório de Redes de Computadores (LRC) pelo acolhimento, especialmente ao grupo de pesquisa (discípulos) coordenado pelo meu orientador. Foi uma honra fazer parte deste grupo maravilhoso, acolhedor e sempre disposto a ajudar. Obrigado a todos que contribuíram para a realização deste sonho.

Resumo

A distribuição eficiente de conteúdo em larga escala em redes veiculares (VANETs) é uma tarefa desafiadora devido às características intrínsecas das VANETs, tais como topologia altamente dinâmica e conectividade intermitente. Nesse contexto, destacam-se as Redes Veiculares de Dados Nomeados (*Vehicular Named-Data Networks* - VNDN) que consiste na integração da arquitetura NDN (*Named Data Networking*) nas VANETs para superar as limitações na distribuição de conteúdo em larga escala nas VANETs. No entanto, a integração da arquitetura NDN nas VANETs gera o problema do *broadcast storm* no processo de descoberta de *cache*. Ressaltando que o *broadcast storm* é um problema característico das VANETs. Na literatura, vem surgindo protocolos para comunicação em VNDN que visam mitigar o problema do *broadcast storm*. Entretanto, em relação à recuperação de conteúdo, a maioria dos protocolos da literatura depende da informação da localização do veículo que contém o conteúdo, que é uma das limitações encontradas no paradigma de comunicação baseado em IP. Dado esse problema, nesta dissertação são propostos protocolos eficientes para comunicação entre veículos em VNDN, cujas estratégias de descoberta de *cache* adotadas maximizam a distribuição de conteúdo. Para isto, foram desenvolvidos os protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU para realizar uma comunicação V2V eficiente em cenários urbanos. Os protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU têm os mesmos objetivos: (i) maximizar a taxa de *cache hit* no processo de descoberta de *cache*; (ii) aumentar a taxa de entrega de conteúdo e (iii) reduzir o número de transmissões de pacotes de interesse. Com isso em mente, o protocolo CDP escolhe os veículos retransmissores utilizando o conceito de veículos melhores posicionados geograficamente. O protocolo CLYMENE escolhe os veículos retransmissores com maior centralidade de grau. E o protocolo PERSEU determina os veículos retransmissores usando o conceito de geometria computacional. Os protocolos propostos foram avaliados e comparados com os protocolos Vanilla VNDN e OIFP em uma região de *Ottawa*, Canada, por meio de simulações computacionais. Considerando um cenário crítico com apenas 5% de veículos produtores, os resultados de simulações mostram que os protocolos propostos possuem melhor desempenho que o Vanilla VNDN e OIFP em três pontos chaves: (i) taxa de *cache hit*; (ii) taxa de entrega de conteúdo e (iii) transmissão de pacotes de interesse. Em relação à taxa de *cache hit*, os protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU são 82,5%, 163,6% e 193,7% mais eficientes que o Vanilla VNDN e OIFP na média. Quanto à taxa de entrega de conteúdo, os protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU atingem um aumento de 36,45%, 38,35% e 49,1% em relação ao Vanilla VNDN e OIFP na média. E referente ao número de transmissões de pacotes de interesse, os protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU conseguem uma redução de 58%, 45% e 61,45% em comparação com o Vanilla VNDN e OIFP na média.

Abstract

The content distribution efficient on a large scale in vehicular networks (VANETs) is a challenging task due to the intrinsic characteristics of VANETs, such as highly dynamic topology and intermittent connectivity. In that context, the Vehicular Named-Data Networks (VNDN) stand out, consisting of the Named Data Networking (NDN) architecture integration on VANETs to overcome the limitations of the content distribution in large-scale on VANETs. However, the NDN architecture integration in VANETs generates the broadcast storm's problem in the caching discovery process. Emphasizing that the broadcast storm is a characteristic issue of VANETs. In the literature, VNDN communication protocols have been proposed to mitigate the broadcast storm problem. However, about content retrieval, most protocols in the literature depend on the location information of the vehicle containing the content, which is one of the limitations found in the IP-based communication paradigm. Given this problem, this dissertation proposes efficient protocols for communication among vehicles in VNDN, whose adopted caching discovery strategies maximize the content distribution. The CDP, CLYMENE and PERSEU protocols were developed to carry out efficient V2V communication in urban scenarios. The CDP, CLYMENE, and PERSEU protocols have the same objectives: (i) maximize the cache hit rate in the caching discovery process; (ii) increase the content delivery rate and (iii) reduce the number of interest packets transmission. With this in mind, the CDP protocol chooses relay vehicles using the better geographically positioned vehicles concept. The CLYMENE protocol chooses the relay vehicles with the highest degree centrality. Furthermore, the PERSEU protocol determines the relay vehicles using the computational geometry concept. The proposed protocols were evaluated and compared with the Vanilla VNDN and OIFP protocols in a region of Ottawa, Canada, using computer simulations. Considering a scenario with 5% of producing vehicles, the simulation results show that the proposed protocols perform better than Vanilla VNDN and OIFP in three key points: (i) cache hit rate; (ii) content delivery rate and (iii) interest packets transmission. Regarding the cache hit rate, the CDP, CLYMENE, and PERSEU protocols are 82.5%, 163.6% and 193.7% more efficient than Vanilla VNDN and OIFP on average. Concerning the content delivery rate, the CDP, CLYMENE, and PERSEU protocols reached an increase of 36.45%, 38.35% and 49.1% on average about Vanilla VNDN and OIFP. Moreover, regarding the number of interest packets transmission, the CDP, CLYMENE, and PERSEU protocols achieve a reduction of 58%, 45% and 61.45% compared to Vanilla VNDN and OIFP on average.

Lista de Figuras

1.1	<i>Broadcast Storm</i> no Processo de Descoberta de <i>Cache</i> em VNDN	16
2.1	Comunicação entre Veículos	21
2.2	Comunicação entre Veículos e Infraestruturas	22
2.3	Comunicação Híbrida	22
2.4	Diferenças entre as Arquiteturas <i>IP</i> e NDN [72]	25
2.5	Tipos de Pacotes da Arquitetura NDN [84]	25
2.6	Estruturas de Dados de um Nó NDN [35]	26
2.7	Integração da Arquitetura NDN nas VANETs [39]	28
2.8	Processamento dos Pacotes de Interesse e Dados	29
4.1	Estratégia de Descoberta de <i>Cache</i>	41
4.2	Cenário VNDN	43
4.3	Definição de Polígono Convexo e o Cálculo da Envoltória Convexa	46
4.4	Estratégia de Descoberta de <i>Cache</i>	49
5.1	Arquitetura Veins	52
5.2	Cidade de Ottawa, Canada [22]	53
5.3	Porcentagem de <i>Cache Hit</i>	55
5.4	Porcentagem de <i>Cache Hit</i>	56
5.5	Taxa de Entrega de Conteúdos	57
5.6	Taxa de Entrega de Conteúdos	58
5.7	Transmissão Média de Interesses	59
5.8	Transmissão Média de Interesses	61
5.9	Atraso Médio	61
5.10	Atraso Médio	63
5.11	Colisão Média de Pacotes	64
5.12	Colisões Média de Pacotes	65

Lista de Tabelas

3.1	Protocolos de Descoberta de <i>Cache</i> (1)	36
3.2	Protocolos de Descoberta de <i>Cache</i> (2)	37
5.1	Parâmetros de Simulação	54

Lista de Abreviações e Siglas

3G	3th Generation Mobile Networks
4G	4th Generation Mobile Networks
5G	5th Generation Mobile Networks
AoI	Area of Interest
CDP	Content Discovery Protocol
CLYMENE	Degree Centrality-based Caching Discovery Protocol for Vehicular Named-Data Networks
CS	Content Store
DSRC	Dedicate Short-Range Communications
FIB	Forwarding Information Base
GPS	Global Positioning System
HetVNETs	Heterogeneous Vehicular NETworks
ICN	Information-Centric Networks
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ITS	Intelligent Transport System
LTE	Long-Term Evolution
MAC	Media Access Control
MANETs	Mobile ad hoc Networks
OBU	On Board Unit
OMNeT++	Objective Modular Network Testbed
PERSEU	Protocolo Geométrico para Descoberta de Cache em Redes Veiculares de Dados Nomeados

PIT	Pending Interest Table
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RSU	Road Side Unit
SUMO	Simulation of Urban MObility
TCP	Transmission Control Protocol
TTL	Time to Live
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2N	Vehicle-to-Network
V2P	Vehicle-to-Pedestrian
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-Everything
VANETs	Vehicular ad hoc Networks
Veins	Vehicles in Network Simulation
VNDN	Vehicular Named-Data Networking
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Problema de Pesquisa	15
1.2	Objetivo	17
1.3	Contribuição	17
1.4	Estrutura da Dissertação	18
2	Fundamentação Teórica	20
2.1	Redes Veiculares (VANETs)	20
2.1.1	Arquitetura	21
2.1.2	Aplicações	23
2.2	Redes de Dados Nomeados (NDN)	23
2.3	Redes Veiculares de Dados Nomeados (VNDN)	27
2.3.1	Arquitetura VNDN Tradicional	28
2.3.2	Desafios	29
2.4	Resumo Conclusivo	30
3	Trabalhos Relacionados	31
3.1	Descoberta de <i>Cache</i> Baseado em Distância	31
3.2	Descoberta de <i>Cache</i> Baseado em Localização	32
3.3	Descoberta de <i>Cache</i> Baseado na Estabilidade do <i>Link</i>	33
3.4	Descoberta de <i>Cache</i> Baseado em Vizinhaça	33
3.5	Descoberta de <i>Cache</i> Baseado em Contexto	34
3.6	Discussão dos Trabalhos Relacionados em Relação aos Protocolos Propostos	35
3.7	Resumo Conclusivo	35
4	Protocolos para Comunicação V2V Propostos	38
4.1	CDP: <i>Content Discovery Protocol</i>	38
4.1.1	Processamento do Pacote de Interesse	39
4.1.2	Processamento do Pacote de Dados	40
4.1.3	Discussão Sobre o Protocolo Desenvolvido	40
4.2	CLYMENE: <i>Degree Centrality-based Caching Discovery Protocol</i>	42
4.2.1	Processamento do Pacote de Interesse	43
4.2.2	Processamento do Pacote de Dados	44
4.2.3	Discussão Sobre o Protocolo Desenvolvido	45
4.3	PERSEU: Protocolo Baseado em Geometria Computacional para Descoberta de <i>Cache</i>	45
4.3.1	Processamento do Pacote de Interesse	46
4.3.2	Processamento do Pacote de Dados	49
4.4	Resumo Conclusivo	50

5	Simulação e Avaliação dos Resultados	51
5.1	Ferramentas Utilizadas	51
5.2	Configuração do Cenário	52
5.3	Resultados	53
5.3.1	<i>Cache Hit</i>	54
5.3.2	Taxa de Entrega de Conteúdo	56
5.3.3	Transmissão Média de Interesses	59
5.3.4	Atraso Médio	61
5.3.5	Colisão Média de Pacotes	63
5.4	Aplicabilidade dos Protocolos Desenvolvidos	65
5.5	Resumo Conclusivo	66
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	67
	Referências Bibliográficas	69

Capítulo 1

Introdução

As Redes Veiculares de Dados Nomeados (*Vehicle Named-Data Networking - VNDN*) vêm se estabelecendo como uma arquitetura promissora, com potencial para superar os desafios de desempenho na distribuição de conteúdo em larga escala encontrados nas Redes *Ad hoc* Veiculares (*Vehicle Ad hoc Networks - VANETs*) centradas em *IP* [27]. O paradigma de comunicação baseado em *IP* vem se mostrando incapaz de oferecer aos usuários tanto entrega de conteúdo em larga escala quanto garantia de requisitos de aplicações distribuídas nas VANETs referentes à Qualidade de Serviço (*Quality of Service - QoS*) e Qualidade de Experiência (*Quality of Experience - QoE*) [39, 41]. Isso se dá em decorrência da dinamicidade topológica da rede e conectividade intermitente, que advém da alta taxa de mobilidade dos veículos. Neste contexto, a mobilidade dos veículos resulta em sobrecarga na rede para manter os requisitos específicos da pilha de protocolos *TCP/IP*, tais como manutenção da lista de vizinhos, realocação de endereços, e sessões orientadas à conexão [4, 8, 78].

Em Sistemas de Transporte Inteligentes (*Intelligent Transport System - ITS*), os atuais protocolos de disseminação de dados explorados nas VANETs [47, 49, 52, 67, 76, 83] são incapazes de lidar com a crescente demanda por distribuição de conteúdo, por exemplo, conteúdos de entretenimento. Visto que os protocolos de disseminação de dados desenvolvidos para VANETs são projetados, na maioria dos casos, para aplicações de segurança e controle de congestionamentos. Nesse contexto, o objetivo dessas aplicações é notificar veículos sobre eventos ocorridos em determinadas áreas de interesses (*Area of Interest - AoI*) como acidente de trânsito e áreas congestionadas [46, 65]. Portanto, esses protocolos não foram projetados para realizar distribuição de conteúdo em larga escala entre veículos.

Em VNDN, a comunicação entre veículos é realizada por meio da arquitetura centrada no conteúdo (*Named Data Networking - NDN*) que é uma implementação do paradigma de comunicação centrado na informação (*Information-Centric Networks - ICN*) [51]. Com isso, a comunicação entre veículos ocorre por meio de trocas de pacotes de interesse e dados [42]. Ao contrário das arquiteturas atuais em que a troca de mensagens depende dos endereços de origem e destino, na arquitetura NDN os pacotes de interesse e dados usam o nome do conteúdo como identificação exclusiva na rede. Dessa forma, o plano de encaminhamento em NDN possui duas etapas no processo de comunicação entre os nós. Na primeira etapa, um nó consumidor envia um pacote de interesse determinando

o nome do conteúdo desejado. Já na segunda etapa, qualquer veículo que contenha o pacote de dados correspondente retorna ao nó consumidor o conteúdo solicitado. Além disso, cabe ressaltar que os nós intermediários operam como consumidores e produtores de conteúdo [28]. Além disso, os nós da rede podem atuar como mula de dados para atender às solicitações futuras e manter o conteúdo mais próximo dos nós consumidores quando não há conectividade entre os veículos.

Diante disso, VNDN possui potencial para garantir uma distribuição eficiente de conteúdo em larga escala, levando em consideração os requisitos de QoS e QoE das aplicações distribuídas em ITS. Isso ocorre porque o paradigma de comunicação ICN muda o modo como o conteúdo é solicitado e recuperado na rede, visto que o nome do conteúdo é o elemento principal da rede e deve ser globalmente exclusivo, persistente, seguro e independente de localização [21]. Ressalta-se que outro elemento fundamental em VNDN é o *cache* de conteúdo na rede que, por sua vez, aumenta a disponibilidade de conteúdo com múltiplos provedores. Desse modo, o conteúdo pode ser recuperado por qualquer nó da rede que possui o conteúdo na *cache*.

Salienta-se, no entanto, que a integração da arquitetura NDN nas VANETs (isto é, VNDN) apresenta vários desafios referentes à mobilidade dos veículos tais como segurança de acesso, nomeação e armazenamento de conteúdo [28]. No que diz respeito à entrega de conteúdo em larga escala em VNDN tradicional, o principal desafio crítico que esta pesquisa explora origina do problema do *broadcast storm* [17] durante o processo de descoberta de *cache*. *Broadcast storm* é um problema crítico em redes sem fio *ad hoc*, principalmente nas VANETs por conta da alta mobilidade dos veículos, pois não aproveita de maneira eficiente os recursos da rede, além de degradar o desempenho das aplicações.

Em VNDN, a propagação de interesse é uma tarefa desafiadora, uma vez que há uma implicação direta no desempenho da rede. Um dos principais desafios na comunicação entre veículos (*Vehicle-to-Vehicle - V2V*) é a colisão de pacotes. Diante disso, transmissões redundantes de interesse contribuem ainda mais para o aumento de colisões de pacotes, impactando em atrasos na entrega de conteúdo e perdas de pacotes, prejudicando o desempenho das aplicações em VNDN. Com o intuito de mitigar o problema do *broadcast storm*, é necessário o desenvolvimento de protocolos eficientes para comunicação V2V em VNDN, que reduzem transmissões redundantes de pacotes de interesse durante a busca pelo conteúdo. Portanto, o objetivo dos protocolos desenvolvidos é reduzir o excesso de transmissões de interesses e potencializar a eficiência na entrega de conteúdo, enquanto oferece garantias de QoS [23, 58].

1.1 Problema de Pesquisa

O *broadcast storm* é um problema crítico em redes sem fio *ad hoc*, uma vez que compromete diretamente a utilização dos recursos da rede, além de degradar o desempenho das aplicações. Em VNDN, a propagação de pacotes de interesse deve ser realizada de forma controlada na perspectiva de diminuir um dos principais desafios na comunicação entre veículos: a colisão de pacotes. Nesse caso, transmissões redundantes de pacotes de interesse contribuem ainda mais para o aumento da incidência de colisões, resultando em

atrasos na entrega de conteúdo, perdas de pacotes e prejuízo no desempenho das aplicações em VNDN. Para um melhor entendimento do problema, a Figura 1.1 apresenta a ocorrência do *broadcast storm* em um cenário VNDN.

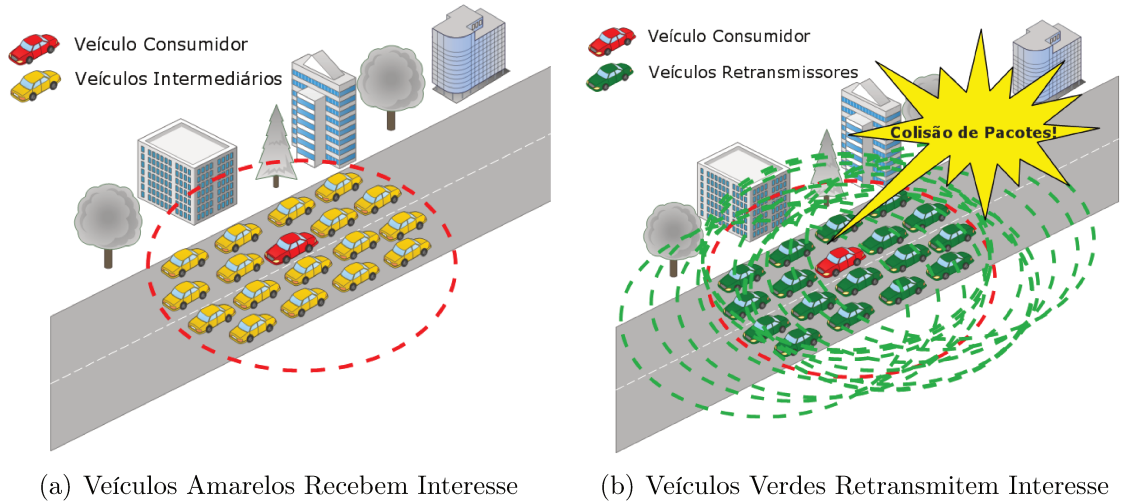


Figura 1.1: *Broadcast Storm* no Processo de Descoberta de *Cache* em VNDN

Conforme ilustrado na Figura 1.1(a), inicialmente o veículo consumidor (vermelho) transmite um pacote de interesse especificando o nome do conteúdo na rede. Em seguida, os veículos vizinhos (amarelos) do veículo solicitante recebem o pacote. Visto que os veículos vizinhos não possuem o pacote de dados correspondente na *cache*, todos veículos receptores (verdes) irão retransmitir o pacote de interesse na rede (Figura 1.1(b)). O resultado dessas retransmissões múltiplas é o que gera o problema do *broadcast storm*.

Como ressaltado anteriormente, a comunicação entre veículos utilizando a arquitetura NDN é uma tarefa desafiadora. Assim como os protocolos da literatura para disseminação de dados, a comunicação V2V usando a arquitetura NDN como meio de comunicação gera colisões de pacotes. Principalmente quando se trata de conteúdo grande como vídeo, que será necessário dividi-lo em *frames* para transmiti-lo na rede. Consequentemente, há muita transmissões de pacotes de interesse e dados na rede.

Na literatura, a problemática do *broadcast storm* na comunicação V2V em VNDN vem sendo investigada e inclusive vêm surgindo protocolos para comunicação V2V com intuito de reduzir o *boadcast storm* na etapa de descoberta de *cache*. Contudo, no que se refere à recuperação de conteúdo, a maioria dos protocolos da literatura depende da informação da localização do veículo que possui o conteúdo. Nesse contexto, esta dissertação desenvolve três protocolos eficientes para comunicação V2V em VNDN com objetivo de fornecer um bom desempenho no processo de descoberta de *cache*, garantindo uma boa taxa de entrega de conteúdo, com o número de transmissões de pacotes de interesse reduzido. Portanto, os protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU desenvolvidos garantem uma comunicação V2V eficiente em cenários urbanos, considerando as características intrínsecas das VANETs. Além disso, os protocolos propostos não dependem da informação da localização dos veículos produtores no processo de descoberta de *cache*.

1.2 Objetivo

Tendo em vista o desafio da integração da arquitetura NDN nas VANETs, no que diz respeito ao problema do *broadcast storm*, o principal objetivo desta dissertação é projetar, implementar e avaliar protocolos eficientes para comunicação V2V em VNDN, cujas estratégias de descoberta de *cache* implementadas visam alcançar: (i) alta taxa de *cache hit* no processo de descoberta de *cache*; e (ii) alta taxa de entrega de conteúdo com o menor número de transmissões de pacotes de interesse.

1.3 Contribuição

A principal contribuição desta dissertação é o desenvolvimento de três protocolos para descoberta de *cache* com o intuito de tornar a comunicação V2V em VNDN eficiente. Cada protocolo desenvolvido é uma evolução do protocolo anterior com objetivo de aumentar o *cache hit* e a taxa de entrega de conteúdo, com o menor número de transmissão. Consequentemente, os resultados dos protocolos desenvolvidos geraram as seguintes contribuições científicas:

- Primeiramente, foi projetado e implementado o protocolo de descoberta de conteúdo (*Content Discovery Protocol - CDP*) para minimizar o *broadcast storm* ocorrido durante a etapa de descoberta de *cache* em VNDN. Para isto, o CDP utiliza o conceito de veículos melhores posicionados geograficamente (*sweet spot*) para continuar a propagação do pacote de interesse pela rede. De acordo com os resultados das simulações, o CDP aumenta a taxa de entrega de conteúdo em 66%, reduz o número de transmissões de pacotes de interesse em 82% e diminui a quantidade de colisões em 68%, quando comparado com o Vanilla VNDN. Em relação ao OIFP, o CDP é 6,5% mais eficiente na entrega de conteúdo, transmitindo menos pacotes de interesse (35%) e com menor colisão de pacotes (26,7%) [58].
- Em segundo lugar, visando aumentar o *cache hit* e minimizar o *broadcast storm* ocorrido durante a comunicação V2V em VNDN, foi projetado e implementado o protocolo CLYMENE, baseado na centralidade de grau (*Degree Centrality-based Caching Discovery Protocol for Vehicular Named-Data Networks - CLYMENE*). A ideia básica do CLYMENE é escolher os veículos que contém o maior número de veículos vizinhos para continuar o processo de descoberta de *cache*. Segundo os resultados da simulação, o CLYMENE aumenta o *cache hit* no processo de descoberta de *cache* em 80,59% e reduz o número de transmissões de pacotes de interesse em 70,65%, quando comparado com o Vanilla VNDN. Em comparação com o OIFP, o CLYMENE é 38,98% mais eficiente no processo de descoberta de *cache*, transmitindo menos pacotes de interesse (11,37%) [56].
- E por fim, com o intuito de aumentar ainda mais o *cache hit* e maximizar a taxa de entrega de conteúdo, foi projetado e implementado o protocolo PRESEU, um Protocolo Geométrico para Descoberta de *Cache* em VNDN. O PERSEU foi modelado

utilizando o conceito de geometria computacional para escolher os veículos retransmissores mais adequados. Para escolher os veículos retransmissores, foi aplicado o problema de encontrar a envoltória convexa em um dado conjunto de pontos. Conforme os resultados obtidos, o PERSEU aumenta tanto o processo de descoberta de *cache* (337,7%) quanto à taxa de entrega de conteúdo (81,8%), ao mesmo tempo que reduz o número de transmissões de pacotes de interesse na rede (82,7%), quando comparado com o Vanilla VNDN. Em relação ao OIFP, o PERSEU possui melhor desempenho no processo de descoberta de *cache* (49,7%) e garantia de entrega de conteúdo (16,4%), com menos transmissões de pacotes de interesse (39,9%) [57, 59].

Os resultados dos protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU, foram publicados nos seguintes veículos de comunicação:

1. **Lucas B. Rondon**, Joahannes B. D. da Costa, Geraldo P. Rocha Filho, and Leandro A. Villas. *A distance and position-based caching discovery protocol for vehicular named-data networks*. In *2019 IEEE 11th Latin-American Conference on Communications*. LATINCOM-2019.
2. **Lucas B. Rondon**, Joahannes B. D. da Costa, Geraldo P. Rocha Filho, Denis Rosário, and Leandro A. Villas. *Degree centrality-based caching discovery protocol for vehicular named-data networks*. In *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference*. VTC2020-Spring.
3. **Rondon, L.B.**; Immich, R.; P. Rocha Filho, G.; Venâncio Neto, A.; Leone Maciel Peixoto, M.; Villas, L.A. *Towards Improved Vehicular Information-Centric Networks by Efficient Caching Discovery*. *Vehicles* 2020, 2, 453-467.
4. **Lucas B. Rondon**, Lucas P. Maziero, Geraldo P. Rocha Filho, Augusto V. Neto, Maycon M. L. Peixoto e Leandro A. Villas. Protocolo baseado em geometria computacional para descoberta de *cache* em redes veiculares de dados nomeados. Em XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos. SBRC-2020.

1.4 Estrutura da Dissertação

O restante desta dissertação segue a seguinte estrutura:

- Capítulo 2 apresenta o referencial teórico utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa. Primeiramente é dada uma introdução sobre redes veiculares, apresentando sua arquitetura e aplicações. Logo após, é exibida a arquitetura NDN, explicando a diferença do paradigma de comunicação centrado em informação do atual paradigma de comunicação centrado em *IP*. E por fim, é apresentada a integração da arquitetura NDN nas VANETs, que é o foco desta pesquisa, e o desafio da integração da arquitetura NDN nas VANETs.
- Capítulo 3 apresenta os protocolos da literatura que abordam o problema do *broadcast storm* durante no processo de descoberta de *cache*.

- Capítulo 4 apresenta os protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU, para reduzir o *broadcast storm* durante a comunicação entre veículos e garantir uma boa taxa de entrega de conteúdo. Desse modo, é apresentado de forma detalhada o fluxo de processamento dos pacotes de interesse e dados de cada protocolo.
- Capítulo 5 apresenta a configuração do cenário, os simuladores utilizados e as métricas escolhidas para avaliar o desempenho dos protocolos desenvolvidos. Logo após, é exibido os resultados obtidos dos protocolos desenvolvidos em comparação com os protocolos da literatura.
- Capítulo 6 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos sobre redes veiculares, a sua arquitetura e aplicações, Seção 2.1. Logos após, é apresentada a arquitetura NDN, explicando a diferença do paradigma centrado na informação do paradigma atual centrado no *IP*, Seção 2.2. Em seguida, é apresentada a integração da arquitetura NDN nas VANETs, e o desafio da integração, Seção 2.3. Por fim, na Seção 2.4 é descrita uma breve consideração final deste capítulo.

2.1 Redes Veiculares (VANETs)

Redes Veiculares, também intituladas por VANETs, são um subconjunto das redes *ad hoc* móveis (*Mobile ad hoc Networks - MANETs*) compostas por veículos em movimentos e infraestruturas fixas [60, 87]. Estas infraestruturas estáticas podem ser tanto (*Road Side Units - RSUs*) instaladas às margens de estradas quanto outros meios de comunicação: (*Long Term Evolution - LTE*), WiMax, 3G, 4G, 5G, etc. [66]; As VANETs são consideradas um elemento principal dos Sistemas de Transporte Inteligentes, por viabilizar a comunicação entre veículos e infraestruturas fixas às margens de rodovias e centros urbanos. Os ITS foram propostos com o objetivo de tornar o setor de transporte mais seguro, sustentável e eficiente, minimizando os problemas atuais relacionados ao congestionamento de tráfego nos seguintes pontos: o tempo desperdiçado no trânsito, consumo de combustível, emissões de CO_2 e perdas monetárias; segurança dos motoristas e passageiros [24, 5, 88].

Nesta perspectiva, as VANETs são compostas por veículos com grandes capacidades de processamento computacional, armazenamento e recursos energéticos. Logo, os veículos que compõem a rede, são equipados com *softwares* e *hardwares* embarcados tipo: (1) (*On-Board Units - OBUs*); (2) interfaces de comunicação sem fio; (3) diversos sensores integrados e interfaces para interação entre os usuários. As RSUs instaladas às margens de rodovias e centros urbanos estendem a comunicação entre os nós da rede, operando como nós intermediários e ampliando a conectividade da rede com o acesso à Internet [80].

Recentemente, vem surgindo o conceito de redes veiculares heterogêneas (*Heterogeneous Vehicular NETWORKS - HetVNETs*), consistindo da integração da comunicação de curto alcance (*Dedicate Short-Range Communications - DSRC*) com outros tipos de co-

municação, por exemplo, as redes de celulares: LTE, 3G, 4G e 5G. As HetVNETs, por sua vez, têm como objetivo atender aos requisitos de comunicação dos ITS [89, 90]. Assim, com este novo paradigma de compartilhamento de informação entre os veículos e infraestruturas estáticas, possibilitará uma variedade de serviços e aplicações voltadas à segurança dos motoristas e passageiros, gerenciamento de tráfego urbano e rodoviário com estratégia mais efetiva e aplicações de entretenimento e assistência ao condutor com o objetivo de proporcionar uma viagem mais segura e confortável [25].

Em VANETs, os veículos podem operar como fonte ou destino das informações ou roteador de rede. Estas redes são caracterizadas pela alta mobilidade dos veículos, a qual resulta em topologias altamente dinâmicas, *links* intermitentes, perda de conectividade durante as transmissões, fragmentação da rede e escalabilidade em termos de nós. Considerando tais características, os próprios nós se responsabilizam pelo modo como eles se organizam e comunicam entre si na rede [10].

2.1.1 Arquitetura

Nesta arquitetura, a comunicação entre veículos pode ser classificada do seguinte modo:

- **Veículo-Veículo (V2V):** possibilita a comunicação direta entre veículos sem a necessidade do auxílio de infraestrutura fixa, conforme exibido na Figura 2.1. Portanto, os próprios veículos se comunicam entre si na rede sobre condições de rodovias, presença de outros veículos, informações de veículos em movimentação insegura e encaminhamento de informações por múltiplos saltos. Embora esta estrutura de rede seja simples, a conectividade depende fortemente da densidade de veículos, velocidade relativa entre eles e do padrão de mobilidade veicular [5, 80].

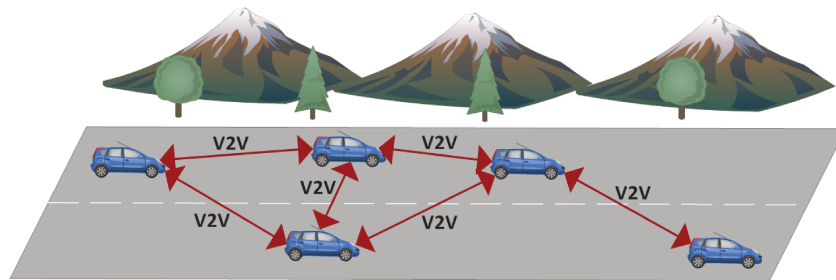


Figura 2.1: Comunicação entre Veículos

- **Veículo-Infraestrutura (V2I):** permite aos veículos se comunicarem com infraestruturas de comunicação distribuídas e estáticas (RSUs) às margens de ruas e rodovias, conforme ilustrado na Figura 2.2. As RSUs centralizam todo o tráfego da rede, operando como nós intermediários nas comunicações entre veículos. Assim, o veículo pode receber da RSU informações sobre obstáculos e presença de pedestres; informações pertinentes às condições da rodovia; diversos anúncios e propagandas e também informações de segurança a auxiliarem numa condução mais segura. O grande benefício da arquitetura V2I está na extensão da conectividade, permitindo comunicação com outros tipos de redes, como a Internet. Entretanto, para estes

privilégios serem realmente alcançados, são necessárias inúmeras RSUs instaladas às margens de rodovias e centros urbanos, podendo gerar grandes custos de implantação [5, 25, 87].

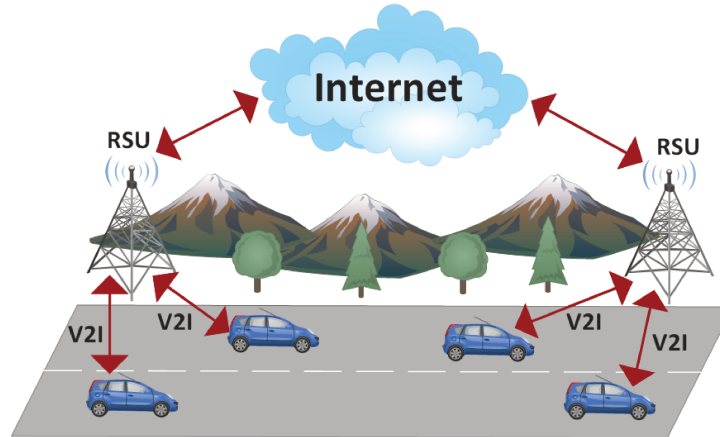


Figura 2.2: Comunicação entre Veículos e Infraestruturas

- **Comunicação Híbrida:** consiste da combinação das arquiteturas V2V e V2I, conforme exibido na Figura 2.3. Dessa forma, infraestruturas fixas são utilizadas para ampliar a conectividade da rede, possibilitando ao veículo comunicar-se com infraestruturas fixas em um único salto ou por múltiplos saltos por meio de outros veículos. Cabe ressaltar que atualmente vem surgindo um novo conceito de comunicação, no qual os veículos podem comunicar-se com diversas entidades (*Vehicle-to-Everything* - *V2X*), tais como 3G, 4G, 5G, com pedestres (*Vehicle-to-Pedestrian* - *V2P*), com rede (*Vehicle-to-Network* - *V2N*) e demais objetos inteligentes possuidores de conectividade com a Internet, dado o avanço na Internet das coisas (*Internet of Things* - *IoT*). Logo, a comunicação V2X tem potencial para viabilizar o conceito de carros autônomos, provendo cobertura ubíqua, aprimorando a qualidade dos serviços e aplicações nas VANETs com latência extremamente baixa no acesso aos dados [2, 11, 20, 33, 44, 63, 64, 71, 73, 89].

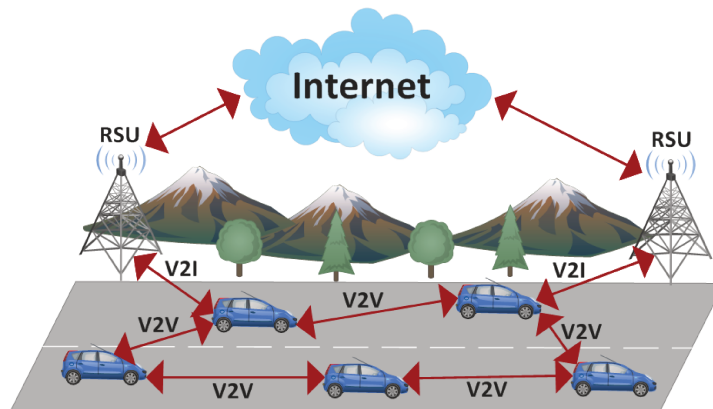


Figura 2.3: Comunicação Híbrida

2.1.2 Aplicações

Inúmeras aplicações em uso (WAZE, *Tom Tom Go*, *Uber*, etc.) têm por objetivo auxiliar condutores e passageiros durante suas trajetórias, tornando o gerenciamento do tráfego de veículos mais eficiente, seguro e confortável. Em redes veiculares, as aplicações são classificadas na seguinte tipologia [36, 50, 74]:

- **Aplicações de Segurança:** conhecidas por aplicações críticas, este conjunto de aplicações tem o objetivo de avisar o condutor sobre probabilidades de colisões iminentes com outro veículo ou com algum obstáculo à frente ou algum evento a colocar em risco a segurança dos motoristas e passageiros. Alguns tipos de aplicações existentes são: alerta de colisões iminentes; encaminhamento cooperativo de alertas de colisões; alerta de veículos de emergência, avisos de obras à frente e previsão de acidentes. Portanto, esses tipos de mensagens são sensíveis à atraso [15, 54, 69, 68].
- **Aplicações de Gerenciamento de Tráfego:** consistem em aplicações projetadas intentando reduzir e gerenciar o congestionamento de tráfego veicular, causado pelo aumento exponencial da quantidade de veículos fabricados diariamente. Estas aplicações visam a melhoria do fluxo dos veículos circulando em vias e centros urbanos. Gerenciamento de velocidade e navegação cooperativa são dois outros grupos típicos pertencentes a estes tipos de aplicações. As aplicações relacionadas ao gerenciamento de velocidade têm por objetivo tornar o tráfego mais contínuo, reduzindo acelerações e frenagens desnecessárias. Enquanto às aplicações relacionadas à navegação cooperativa têm por alvo aumentar a eficiência do trânsito, gerenciando a navegação dos veículos através da cooperação entre eles e infraestruturas fixas [32, 85].
- **Aplicações de Entretenimento e Conforto:** são aplicações projetadas visando proporcionar aos motoristas e passageiros uma viagem mais confortável e divertida. As montadoras de veículos já vêm integrando diversas aplicações de conforto e entretenimento com o intuito de auxiliar o motorista em uma direção mais confortável, segura e ao mesmo tempo prazerosa. As aplicações de conforto necessitam de conectividade com a Internet constantemente para o fornecimento de serviços de conforto tais como: pontos de interesse presentes no percurso a ser realizado (ex. postos de gasolina, restaurantes, conveniências e jogos *on-line*); compartilhamento de músicas, imagens e vídeos [5, 55].

2.2 Redes de Dados Nomeados (NDN)

Redes de Dados Nomeados (*Named-Data Networking* - *NDN*) consiste numa arquitetura de rede, em que toda comunicação é centrada na informação (ICN) [79]. Diferente das arquiteturas de redes centradas em *IP*, na arquitetura NDN, o conteúdo é o elemento principal da rede. Ressaltando que a arquitetura atual centrada em *IP* foi projetada para comunicação entre dois sistemas finais. E com o crescimento explosivo de comércio eletrônico, *big data*, IoT, mídias digitais, redes sociais e diversos aplicativos para *smartphones*,

a Internet vem sendo utilizada como uma rede distribuição e recuperação de conteúdo. Com isso, o conteúdo vem se tornando o elemento principal na Internet, e não o endereço *IP* do hospedeiro que contém o conteúdo. Além disso, as pessoas estão mais interessadas no conteúdo e não na localização do mesmo [62]. Portanto, com o aumento exponencial da produção e consumo de conteúdos gerados pelos usuários, a Internet vem mostrando limitações em oferecer suporte ao novo modelo de distribuição de conteúdo.

Na arquitetura NDN, qualquer entidade da rede é identificada por um nome exclusivo e o conteúdo é desacoplado dos produtores originais do conteúdo. Além disso, os roteadores NDN podem encaminhar conteúdo por vários caminhos, podendo atender uma solicitação de usuário por meio de múltiplas interfaces de comunicação ao mesmo tempo. Outras características fundamentais em NDN são: (i) segurança; (ii) armazenamento de conteúdo na rede e (iii) suporte à mobilidade do consumidor [86, 72, 18]. Desse modo, o nó consumidor pode obter o conteúdo pelo nó mais próximo que possui o conteúdo na *cache*. Isso diminui o atraso na entrega de conteúdo e aumenta a disponibilidade de conteúdo na rede através de múltiplos provedores [70].

A Internet e NDN compartilham a mesma arquitetura de ampulheta em camadas com diferenças funcionais entre as camadas correspondentes, conforme exibido na Figura 2.4. A arquitetura NDN oferece suporte à transferência de dados de forma segura, em que todos os mecanismos de segurança são empregados no próprio pacote de dados. Além disso, os roteadores NDN salvam o estado dos pacotes encaminhados recentemente, permitindo balanceamento de fluxo, detecção de *loop*, encaminhamento inteligente e armazenamento em *cache*. A arquitetura NDN modifica as funcionalidades da camada de rede, de modo que haja suporte a criação de redes de distribuição de conteúdos [1]. Desse modo, com o paradigma de comunicação centrado no conteúdo, a camada de rede da arquitetura NDN tem potencial para oferecer: (1) escalabilidade, suportando uma grande quantidade de prefixos de nomes, que é uma das limitações da comunicação centrada em *IP*; (2) segurança, oferecendo integridade e autenticação à nível de conteúdo; (3) maior eficiência na entrega de conteúdo por múltiplos caminhos e (4) *cache* de conteúdo na rede para disseminação eficiente de dados [72].

Conforme a ilustração da Figura 2.4, segurança e estratégia são duas novas camadas adicionadas à pilha de protocolos NDN. A camada de segurança provê segurança no próprio conteúdo, não necessitando proteger todo o canal de comunicação na Internet. Enquanto a camada de estratégia é usada no plano de encaminhamento da arquitetura NDN, para tomar decisão de encaminhamento quando há solicitação de conteúdo. Além disso, a arquitetura NDN não mantém a camada de transporte separada. Todas as funções da camada de transporte da Internet são incorporadas ao plano de encaminhamento da arquitetura NDN [62].

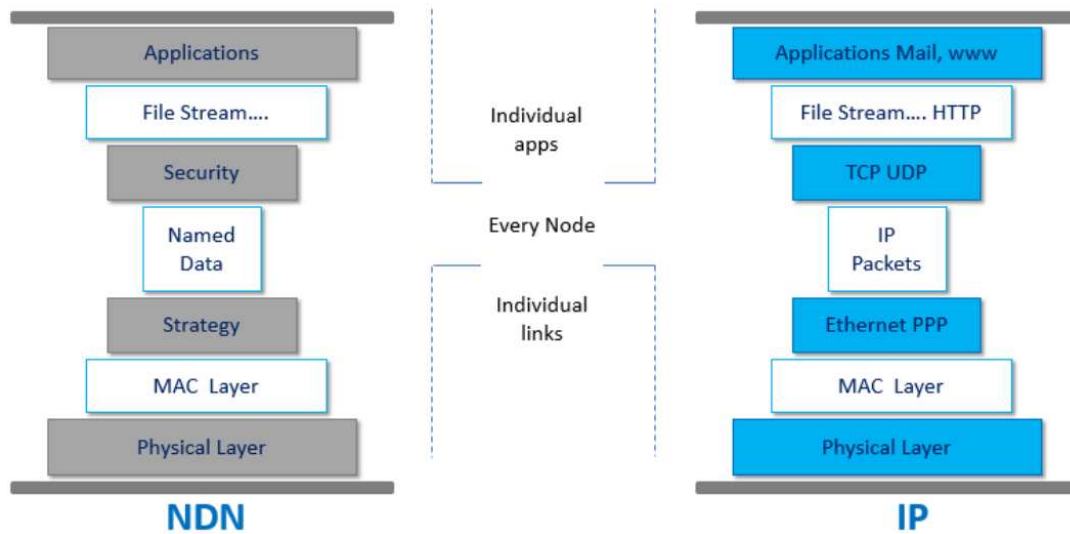


Figura 2.4: Diferenças entre as Arquiteturas *IP* e NDN [72]

A comunicação em NDN é realizada por meio de trocas de pacotes de interesse e dados. Ambos pacotes têm como identificação exclusiva o prefixo de nome do conteúdo ao invés de endereços de origem e destino, como pode ser observado na Figura 2.5. Dessa forma, o pacote de interesse é utilizado pelos nós consumidores para solicitar conteúdo na rede, de acordo com o prefixo de nome do conteúdo. Enquanto o pacote de dados é utilizado pelos nós produtores para enviar o conteúdo aos nós consumidores, em resposta ao pacote de interesse recebido, pelo caminho inverso percorrido pelo pacote de interesse. Em NDN, os pacotes de dados são assinados pelo produtor e verificados pelo consumidor [6].

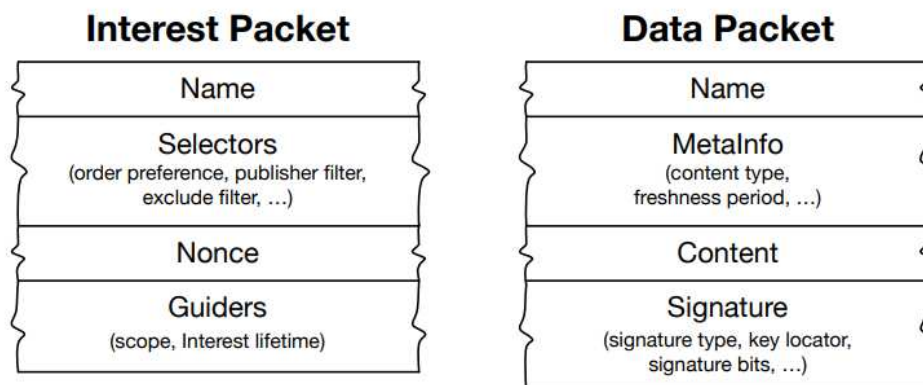


Figura 2.5: Tipos de Pacotes da Arquitetura NDN [84]

Em NDN, cada nó possui três estruturas de dados essenciais que são: (i) tabela de interesses pendentes (*Pending Interest Table - PIT*); (ii) *cache* de conteúdos (*Content Store - CS*) e (iii) tabela de encaminhamento de conteúdo (*Forwarding Information Base - FIB*), conforme exibido na Figura 2.6.

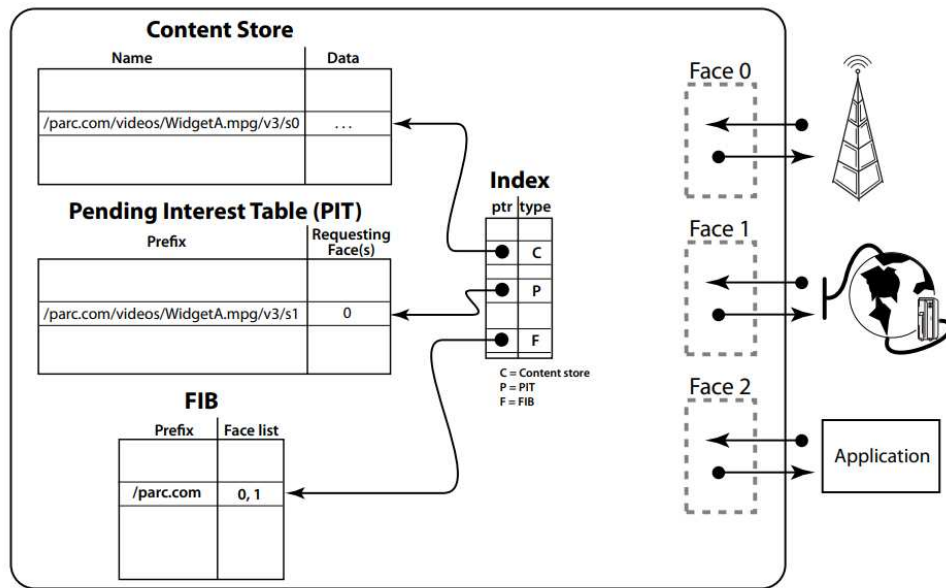


Figura 2.6: Estruturas de Dados de um Nó NDN [35]

- PIT: é usada para registrar solicitações de interesses realizadas pelo nó consumidor para que o pacote de dados possa ser enviado de volta ao nó consumidor que solicitou o conteúdo. Portanto, todos pacotes de interesse que ainda não foram atendidos com os pacotes de dados correspondentes, ficam armazenados na PIT, conforme o tempo de vida (*Time-to-Live - TTL*) de cada interesse. Além disso, todas as interfaces de comunicação pelas quais os pacotes de interesses são enviados também ficam armazenadas. Para evitar transmissões redundantes de pacotes de interesse na rede, quando há várias transmissões de pacotes de interesse solicitando o mesmo conteúdo, apenas uma transmissão é feita na rede. Dessa forma, se um determinado nó recebe um pacote de interesse e já contém o mesmo armazenado na PIT, uma agregação é realizada na PIT para que não haja sobrecarga na rede [39].
- CS: é um espaço de memória usado para armazenar conteúdo com base em uma política *cache*. Os conteúdos são armazenados em *cache* de acordo com o TTL de cada conteúdo, para satisfazer interesses futuros. Como os pacotes de interesse e dados possuem nomeação exclusiva e são independente de endereço *IP*, então os pacotes de interesse podem ser satisfeitos por qualquer nó da rede que possua o pacote de dados correspondente. Como mencionado anteriormente, em NDN, a importância é dada ao conteúdo ao invés da sua localização. Portanto, o *cache* de conteúdo na rede é um elemento fundamental da arquitetura NDN, visto que a disponibilidade de conteúdo aumenta na rede por meio de múltiplos produtores [81].
- FIB: é uma tabela que contém informações e interfaces sobre os próximos saltos a serem realizados para alcançar potenciais nós que possuem o conteúdo em *cache*. O roteamento de pacotes é feito com base no prefixo de nome do conteúdo ao invés do endereço *IP* [72].

2.3 Redes Veiculares de Dados Nomeados (VNDN)

Redes centradas em informação (ICN) vêm sendo propostas como arquitetura de Internet do futuro. Neste contexto, a arquitetura NDN é uma das recentes implementações de ICN que provê um modelo simples de comunicação, cujo foco principal é o conteúdo [31]. Dessa forma, a arquitetura NDN vem sendo integrada nas VANETs com o objetivo de atender os requisitos dos Sistemas de Transporte Inteligentes, realizando a distribuição confiável de conteúdo em larga escala, que é um dos maiores desafios das VANETs. Visto que o modelo de comunicação baseado no *IP*, a mobilidade dos veículos, conectividade intermitente e topologia altamente dinâmica, são características que inviabilizam as VANETs de atender os requisitos complexos das diversas aplicações distribuídas e a provisão de QoS [39].

Como mencionado no Capítulo 2.2, atualmente vem surgindo uma variedade de aplicações centradas no conteúdo. Com essa mudança de paradigma, surge a necessidade de uma nova arquitetura de Internet que prioriza o conteúdo em vez do endereço do provedor do conteúdo. Desse modo, espera-se que a Internet do futuro seja orientada pelo conteúdo em vez de Internet orientada à conexão. Levando isso em consideração, a grande motivação de utilizar a arquitetura NDN para prover a comunicação entre veículos, se dá em virtude da arquitetura NDN ser centrada no conteúdo, suportar mobilidade, o armazenamento de conteúdo na rede e o encaminhamento de conteúdo por múltiplas interfaces de comunicação, o que torna mais rápida e eficiente a recuperação de conteúdo nas VANETs [19].

Outra característica da integração da arquitetura NDN nas VANETs que difere das arquiteturas atuais baseadas no *IP*, diz respeito à descoberta e entrega de conteúdo orientado pelo nome do conteúdo. Em NDN, o conteúdo é desacoplado da localização do provedor original do mesmo. Desse modo, os veículos podem armazenar o conteúdo na *cache* para atender solicitações futuras. Consequentemente, o conteúdo tende a ficar mais próximo dos veículos consumidores, aumentando a disponibilidade de conteúdo por múltiplos provedores. Além disso, aplicando políticas robustas de substituição de conteúdo, pode melhorar ainda mais a entrega de conteúdo, mantendo apenas os conteúdos mais populares e solicitados com mais frequência. Logo, a latência no acesso ao dado é reduzida e os recursos da rede são utilizados com maior eficiência [53].

A Figura 2.7 apresenta uma visão geral da integração da arquitetura NDN nas VANETs. Como pode-se notar na Figura 2.7, a arquitetura NDN é dividida em camadas, módulos e suas respectivas funcionalidades. Na perspectiva VNDN, a camada física diz respeito ao padrão IEEE 802.11p utilizado para comunicação entre veículos. A camada de estratégia é o núcleo da arquitetura VNDN, uma vez que a camada de estratégia é responsável pelo gerenciamento e encaminhamento dos pacotes de interesse e dados entre os veículos, de acordo com o prefixo de nome do conteúdo. A camada de segurança fornece os mecanismos de segurança e confiabilidade no próprio conteúdo. E por fim, a camada de aplicação compõe o conjunto de aplicações distribuídas voltadas para VANETs.

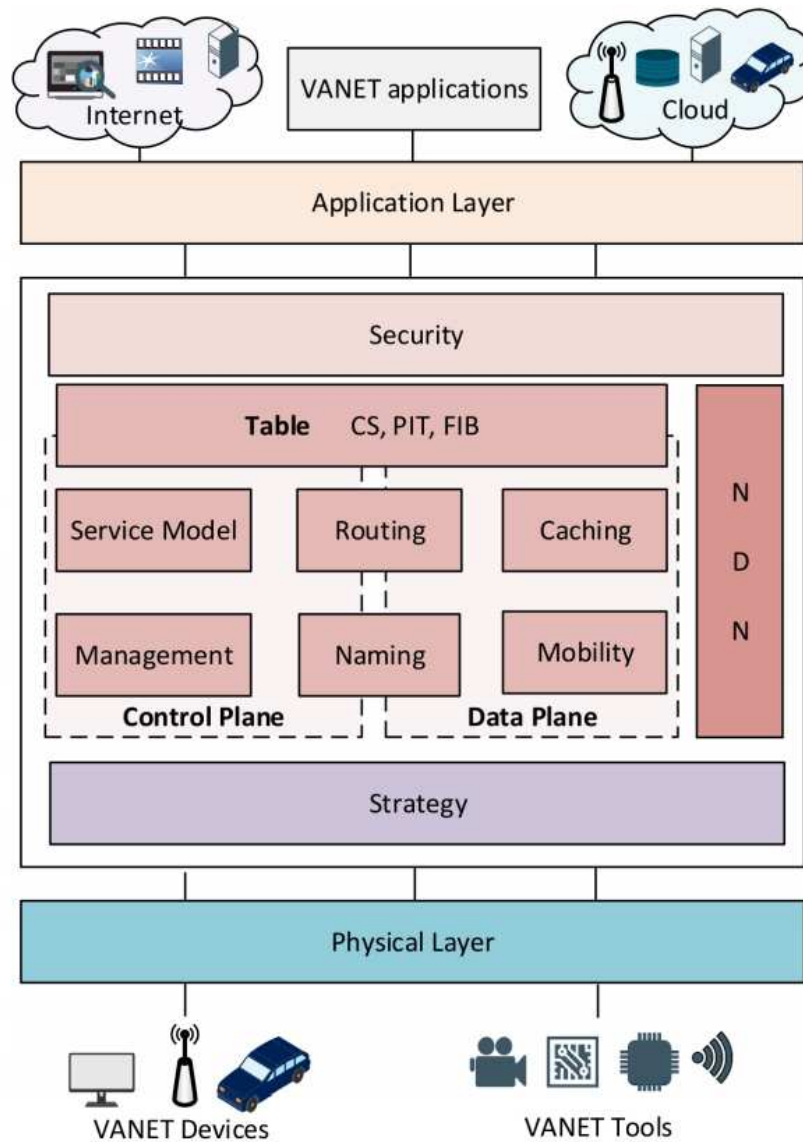


Figura 2.7: Integração da Arquitetura NDN nas VANETs [39]

2.3.1 Arquitetura VNDN Tradicional

Em VNDN, a comunicação entre veículos ocorre por meio da troca de pacotes de interesse e dados. Portanto, a comunicação entre veículos é feita em duas etapas. Na primeira etapa, um veículo consumidor transmite um pacote de interesse especificando o nome do conteúdo desejado. Na segunda etapa, um veículo produtor atende o interesse do veículo consumidor enviando o pacote de dados correspondente. Além disso, cabe ressaltar que qualquer veículo em VNDN pode operar como: (i) consumidor de dados; (ii) produtor de dados, (iii) encaminhador de dados e (iv) mula de dados [8]. A Figura 2.8 exibe a comunicação V2V em um cenário VNDN tradicional.

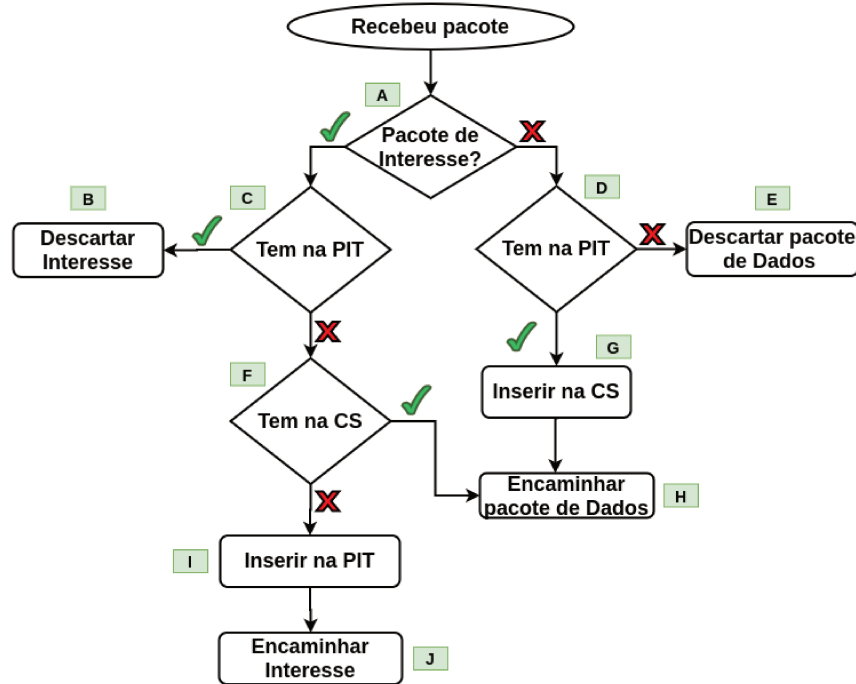


Figura 2.8: Processamento dos Pacotes de Interesse e Dados

O fluxo de processamento dos pacotes de interesse e dados exibido na Figura 2.8, funciona do seguinte modo:

- **Pacote de interesse:** sempre que um veículo recebe um pacote de interesse (Letra A), ele realiza uma consulta na PIT (Letra C) para verificar se ele contém esse interesse registrado. Se o veículo já possui o interesse registrado na PIT, então ele rejeita o pacote de interesse recebido (Letra B), visto que o pacote de interesse é duplicado. Entretanto, se for a primeira vez que o veículo recebe o pacote de interesse, ele faz uma consulta na CS para verificar se ele contém o conteúdo correspondente (Letra F). Se o veículo contém o conteúdo na CS, significa que houve *cache hit* e portanto o pacote de dados é encaminhado para os veículos que solicitaram o conteúdo (Letra H). Caso contrário, o veículo não possui o conteúdo na CS (*cache miss*). Quando ocorre *cache miss*, o veículo adiciona o interesse na PIT (Letra I) e o transmite na rede (Letra J).
- **Pacote de dados:** quando um veículo recebe um pacote de dados (Letra A), o primeiro passo é verificar na PIT se existe algum interesse pendente em relação ao conteúdo recebido (Letra D). Se não houver interesses registrados na PIT, então o pacote de dados é descartado (Letra E). Caso contrário, o veículo armazena o conteúdo na CS (Letra G), encaminha o pacote de dados aos veículos que solicitaram o conteúdo e remove tais interesses da PIT (Letra H).

2.3.2 Desafios

Com a integração da arquitetura NDN nas VANETs, os principais desafios de pesquisa em aberto são:

- **Nomeação de Conteúdo:** a nomeação de conteúdo é um dos elementos principais da arquitetura VNDN. Visto que a comunicação centrada em conteúdo é mais simples e amigável que a comunicação entre veículos baseada em IP. Entretanto, um dos maiores desafios em VNDN é o desenvolvimento de esquemas de nomeação de conteúdo flexível. Esse esquema de nomenclatura deve ser escalável, levar em consideração o tamanho do prefixo de nome do conteúdo, considerar a privacidade e segurança do conteúdo e garantir pesquisas eficientes com o menor consumo de memória. Com isso, diversos serviços e aplicações para VANETs tais como: aplicações de segurança, informações de tráfego, entretenimento, podem ser facilmente solicitados, recuperados e armazenados usando nomes legíveis por humanos [37].
- **Descoberta e Entrega de Conteúdo:** desenvolver estratégias eficientes para encaminhamento de pacotes de interesse e dados, com objetivo de mitigar o *broadcast storm* na etapa de descoberta de *cache*, que é um dos maiores desafios da comunicação entre veículos. Essas estratégias devem levar em consideração QoS, garantia de entrega de conteúdo, topologias altamente dinâmicas, conectividade intermitente e a mobilidade dos veículos, que são características intrínsecas das VANETs [13, 48].
- **Armazenamento de Conteúdo na Rede:** refere-se ao desenvolvimento de políticas de *cache* robustas para maximizar *cache hit* no processo de descoberta de *cache*. As políticas de inserção e substituição de conteúdo devem levar em consideração aspectos temporal/espacial do conteúdo, popularidade do conteúdo e a mobilidade veicular [19, 34].
- **Qualidade de Serviço:** desenvolver protocolos que levem em consideração à QoS na entrega de conteúdo em VNDN. Baixa latência, escalabilidade e confiabilidade são métricas essenciais para garantir QoS na entrega de conteúdo em VNDN [38].
- **Segurança e Privacidade:** criar mecanismos que asseguram a privacidade do usuário e a segurança do conteúdo [45, 61].

Dentre os desafios supracitados, esta dissertação explora o problema do *broadcast storm* ocorrido durante o processo de descoberta de *cache* na comunicação entre veículos em VNDN.

2.4 Resumo Conclusivo

Neste capítulo, foi apresentada a comunicação entre veículos por meio da arquitetura NDN. Para isto, inicialmente foi dado um apanhado geral sobre redes veiculares, mostrando os meios tradicionais de comunicação (V2V, V2I e V2X) e aplicações. Posteriormente, foi apresentado o paradigma de comunicação centrado no conteúdo mediante a arquitetura NDN. E por fim, foi apresentada a integração da arquitetura NDN nas VANETs, a motivação em trabalhar com VNDN e os desafios da integração da arquitetura NDN nas VANETs.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Neste capítulo são apresentados os protocolos da literatura com suas respectivas estratégias de descoberta de *cache* para mitigar o problema do *broadcast storm* durante a comunicação entre os veículos. Para um melhor entendimento, as estratégias de descoberta de *cache* dos protocolos da literatura são fundamentadas em: (i) distância, Seção 3.1; (ii) localização, Seção 3.2; (iii) estabilidade do *link*, Seção 3.3; (iv) vizinhança, Seção 3.4 e (v) contexto, Seção 3.5.

3.1 Descoberta de *Cache* Baseado em Distância

Yu et al. [82] propõem um protocolo de encaminhamento oportunista para abordar o problema do *broadcast storm* em VNDN, nomeado como OIFP (*Opportunistic Interest Forwarding Protocol*). OIFP depende da distância entre os veículos vizinhos para priorizar as transmissões de interesse entre eles por meio de temporizadores para continuar o processo de descoberta de *cache*. Com isso, os veículos destinatários que estiverem mais distantes do veículo solicitante têm maior prioridade para continuar propagando o interesse pela rede, enquanto os outros veículos com menor prioridade irão cancelar suas transmissões agendadas, assim que perceberem que algum veículo vizinho com maior prioridade já realizou a transmissão do pacote de interesse previamente. Entretanto, esse protocolo depende da informação do raio de comunicação dos veículos, limitando-o no processo de descoberta de *cache*.

Arsalan et al. [9] desenvolveram um protocolo de encaminhamento de interesse baseado em distância para controlar transmissões redundantes em redes veiculares definidas por *software* (*Named Software Defined Vehicular Networks - NSDVN*). A estratégia para controlar o problema do *broadcast storm* é conhecida por (BSAM). Em BSAM, sempre que um veículo recebe um pacote de interesse e não possui o conteúdo na CS, ele agenda a retransmissão do interesse de acordo com um valor calculado por uma função linear. O objetivo da função é priorizar os veículos mais distantes do veículo solicitante para continuar propagando o pacote de interesse pela rede. Enquanto que os veículos com menor prioridade cancelam suas transmissões agendadas. Este protocolo utiliza um controlador centralizado para possuir uma visão global da rede. Por este motivo, o protocolo proposto não funciona de modo eficiente em um cenário V2V puramente distribuído. E semelhante

ao OIFP, NSDVN também depende da informação do raio de comunicação do veículos em sua função linear.

Semelhante ao OIFP e BSAM, Burhan e Rehman [17] propuseram o BSMS (*Broadcast Storm Mitigation Strategy*) para reduzir o problema do *broadcast storm* no processo de descoberta de *cache*. O objetivo do BSMS é priorizar os veículos destinatários mais distantes do veículo solicitante. Diferente do OIFP e BSAM, BSMS considera a distância e a velocidade relativa entre os veículos em sua função para priorizar os veículos retransmissores por meio de temporizadores. No entanto, o BSMS depende da informação da velocidade relativa dos veículos, o que acaba limitando-o na etapa de descoberta de *cache*.

3.2 Descoberta de *Cache* Baseado em Localização

Coutinho et al. [22] propuseram um protocolo de descoberta e distribuição de conteúdo baseado em localização (LOCOS) para VNDN. O LOCOS reduz o problema do *broadcast storm* durante a etapa de descoberta de *cache*, orientando a propagação dos pacotes de interesse em direção ao local onde contém veículos produtores. O objetivo do LOCOS é dar maior prioridade aos veículos que conhecem a localização do veículo que possui o conteúdo por meio de temporizadores. Enquanto que os veículos com menor prioridade cancelam suas transmissões agendadas ao perceberem que algum veículo já transmitiu o pacote de interesse previamente. Na operação do LOCOS, antes do veículo produtor transmitir o pacote de dados, ele insere a localização do conteúdo no pacote. Assim, quando um veículo intermediário recebe um pacote de dados, ele atualiza a FIB com a nova localização. Portanto, quando um veículo recebe um pacote de interesse e não contém o pacote de dados correspondente, primeiro ele verifica na FIB a localização do veículo produtor. Se o veículo encontrar alguma correspondência na FIB, ele encaminha o pacote de interesse em direção ao veículo produtor. Caso contrário, um *flooding* controlado é aplicado para continuar o processo de descoberta de *cache*. Como os veículos intermediários armazenam a localização dos veículos que possuem o conteúdo na FIB e, devido à mobilidade dos veículos, a informação da localização do conteúdo tende a ficar desatualizada rapidamente.

Boukerche et al. [16] desenvolveram uma arquitetura centrada em informação e baseada em localização para VANETs, chamada LoICen, para reduzir o *broadcast storm* durante processo de descoberta de *cache* e garantir uma boa taxa de entrega de conteúdo. No processamento do pacote de interesse em LoICen, existem dois tipos de descoberta de *cache*: (i) descoberta de *cache* baseado na localização do conteúdo e (ii) descoberta de *cache* agnóstica. Na descoberta de *cache* baseada em localização, os veículos continuam encaminhando o pacote de interesse com base na localização do conteúdo contido na FIB. As informações da localização dos veículos que possuem o conteúdo na *cache* são obtidas oportunisticamente, por meio de trocas de pacotes de interesse e dados. Já a descoberta de *cache* agnóstica é realizada quando os veículos não possuem a localização do conteúdo na FIB. Quando isso ocorre, os veículos selecionados para continuar encaminhando o pacote de interesse são aqueles que possuem *links* de comunicação mais estáveis. O LOCOS e LoICen utilizam temporizadores para priorizar os veículos mais adequados para continuar o processo de descoberta de *cache*. Uma vez que o objetivo dos protocolos é evitar

múltiplas transmissões de pacotes de interesses. Dessa forma, os veículos com menores prioridades cancelam suas transmissões ao notarem que algum veículo com maior prioridade já transmitiu o interesse previamente. Do mesmo modo que o LOCOS, no protocolo LoICen os veículos intermediários armazenam a localização dos veículos produtores. Entretanto, a informação da localização do conteúdo tende a ficar desatualizada rapidamente por conta da alta mobilidade dos veículos.

3.3 Descoberta de *Cache* Baseado na Estabilidade do *Link*

Boukerche et al. [14] desenvolveram um protocolo para comunicação V2V em VNDN, chamado LISIC, para reduzir o *broadcast storm*. No processo de descoberta de *cache*, o LISIC escolhe os veículos com *links* de comunicação mais estáveis para continuar propagando o pacote de interesse pela rede. Enquanto que os veículos com *links* menos estáveis cancelam suas transmissões agendadas. Para isto, o LISIC utiliza temporizadores no processo de priorização. Logo, quando um veículo recebe um pacote de interesse, ele estima o tempo de conectividade em relação ao veículo emissor. Visto que o objetivo do LISIC é priorizar veículos com *links* mais estáveis por causa que o pacote de dados tende a voltar pelo caminho inverso percorrido pelo pacote de interesse. A fórmula de priorização do LISIC depende da informação da velocidade e direção relativa dos veículos, o que acaba limitando o protocolo em um cenário altamente dinâmico.

Semelhante ao LISIC, Sousa et al. [26] desenvolveram um protocolo para comunicação V2V em VNDN baseado na estabilidade do *link* (*Link Stability-Based Interest Forwarding - LSIF*). Desse modo, os veículos destinatários com *links* mais estáveis em relação ao veículo solicitante têm maior prioridade de transmissão. Enquanto os veículos com *links* menos estáveis cancelam suas transmissões programadas ao notarem que algum veículo vizinho já fez a transmissão. A diferença do LISIC em relação ao LSIF é a metodologia de avaliação. O LISIC proposto por [14] é avaliado em um cenário denso com 300 veículos. Enquanto o LSIF proposto por [26] é avaliado num cenário esparsa, variando a densidade de veículos em 25, 50, 75 e 100. No entanto, a fórmula usada para priorizar os veículos retransmissores necessita das informações da velocidade relativa, direção relativa e a informação do raio de comunicação dos veículos, o que acaba limitando-o no processo de descoberta de *cache*.

3.4 Descoberta de *Cache* Baseado em Vizinhança

Kuai et al. [40] propuseram um esquema de priorização de vizinhança chamado *Density-Aware Delay-Tolerant (DADT)*. O objetivo do DADT é melhorar a taxa de entrega de conteúdo. Para atenuar o *broadcast storm*, o DADT utiliza temporizadores para priorizar os veículos na etapa de descoberta de *cache*. Para isto, o DADT considera dois aspectos: (i) os veículos vizinhos destinatários mais distantes do veículo solicitante; e (ii) os veículos destinatários mais próximos do local do conteúdo. Desse modo, o DADT depende do conhecimento da sua vizinhança e da localização dos veículos produtores. Devido ao

último aspecto, os veículos consumidores dependem da localização do conteúdo, que é uma das desvantagens encontradas nas soluções atuais baseadas em IP.

Alowish et al. [7] propuseram um protocolo para comunicação V2V chamado NDN-SDVN, em que os veículos que irão transmitir os pacotes de dados são escolhidos por um veículo *cluster*. Os veículos *clusters* são escolhidos com base na estabilidade do *link*, velocidade e direção relativa do veículo *cluster* em relação à sua vizinhança e a quantidade de veículos vizinhos. Para reduzir o *broadcast storm*, o veículo *cluster* que decide qual veículo vizinho irá transmitir os pacotes de dados ao veículo consumidor. Na operação do protocolo NDN-SDVN, quando um veículo consumidor deseja um conteúdo, ele faz uma solicitação ao veículo *cluster*. Em seguida, o veículo *cluster* determina dentre seus veículos vizinhos, qual veículo irá atender essa solicitação com o pacote de dados correspondente. No entanto, a criação e a manutenção dos veículos *clusters* demandam bastante recursos computacionais.

3.5 Descoberta de *Cache* Baseado em Contexto

Ahmed et al. [3] desenvolveram um protocolo chamado CODIE para controlar colisões de pacotes durante a comunicação entre veículos em VNDN. O objetivo do CODIE é controlar transmissões redundantes de pacotes de dados. Para controlar múltiplas transmissões de conteúdos, o CODIE utiliza um contador de saltos embutido no pacote de interesse e um campo extra chamado DDL no pacote de dados. Desse modo, quando um veículo que possui o conteúdo na *cache* recebe um pacote de interesse, ele prepara o pacote de dados, adiciona o valor do contador de saltos no campo DDL e envia o pacote de dados ao veículo consumidor. Assim, quando um veículo intermediário recebe o pacote de dados e contém interesse na PIT, ele verifica se o valor do contador de saltos contido na sua PIT é maior ou igual ao valor do DDL contido na pacote de ados recebido. Se o valor do contador de saltos for menor que o DDL, ele decrementa o valor do DDL e envia o pacote de dados. Caso contrário, o veículo descarta o pacote de dados. Dessa forma, o CODIE diminui a quantidade de transmissões na rede. No entanto, o CODIE não possui uma estratégia eficiente para reduzir transmissões múltiplas de pacotes de interesse na etapa de descoberta de *cache*, o que acaba resultando em maior colisão de pacotes.

Li et al. [43] desenvolveram um protocolo de encaminhamento de pacotes de interesse e dados sensível ao contexto (*Context-Aware Vehicular* NDN - CA-VNDN). O protocolo minimiza o *broadcast storm* no processo de descoberta de *cache* e garante uma boa taxa de entrega de conteúdo. Para isto, CA-VNDN considera o posicionamento geográfico, a quantidade de veículos vizinhos e a prioridade do conteúdo durante o encaminhamento de pacotes. Desse modo, o CA-VNDN reduz a quantidade de transmissões redundantes de pacotes no processo de descoberta de *cache*. Entretanto, CA-VNDN depende da informação do posicionamento geográfico dos veículos que contém o conteúdo. Visto que a informação da localização dos veículos tende a ficar desatualizada rapidamente por conta da alta mobilidade dos veículos.

3.6 Discussão dos Trabalhos Relacionados em Relação aos Protocolos Propostos

As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam um resumo das estratégias de descoberta de *cache* adotadas pelos protocolos da literatura. Nessa direção, as Tabelas 3.1 e 3.2 descrevem o modo como os protocolos escolhem os veículos retransmissores e as limitações identificadas em cada protocolo, que serviram de motivação para a proposição dos protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU. Semelhante aos protocolos da literatura que utilizam a distância para escolher os veículos retransmissores, os protocolos CDP e PERSEU também fundamentam-se na distância entre os veículos receptores e o veículo solicitante no processo de descoberta de *cache*. Entretanto, salienta-se que diferente dos protocolos da literatura, o CDP utiliza o conceito de veículos melhores posicionados geograficamente para continuar propagando o pacote de interesse pela rede. Enquanto o protocolo PERSEU utiliza o conceito de geometria computacional para selecionar os veículos mais distantes do veículo solicitante dinamicamente, aplicando o problema de encontrar a envoltória convexa em um dado conjunto de pontos. Com isso, somente aqueles veículos que pertencem à envoltória convexa irão continuar propagando o pacote de interesse pela rede. Quanto ao protocolo CLYMENE, a escolha dos veículos retransmissores é feita com base na centralidade de grau dos veículos para continuar o processo de descoberta de *cache*. Diferente dos protocolos da literatura que usam a informação da vizinhança para escolher os veículos retransmissores, o CLYMENE utiliza a centralidade de grau com o intuito de escolher os veículos com maior número de vizinhos para continuar propagando o pacote de interesse pela rede. Visto que os veículos com maior centralidade de grau são considerados os nós mais importantes da rede e, portanto, têm maior probabilidade de encontrar potenciais veículos que possuem o conteúdo na *cache*. Cabe ressaltar que diferente da maioria dos protocolos da literatura, os protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU não dependem da informação da localização dos veículos que contêm o conteúdo no processo de descoberta de *cache*.

3.7 Resumo Conclusivo

Neste capítulo, foram apresentados os protocolos da literatura que abordam o problema do *broadcast storm* no processo de descoberta de *cache*, utilizando o paradigma de comunicação centrado na informação como meio de comunicação. Além disso, foram apresentadas as limitações encontradas nos trabalhos relacionados que serviram de motivação para o desenvolvimento dos protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU. Em relação à descoberta de *cache*, as estratégias de seleção dos veículos retransmissores foram classificadas em cinco tipos: (i) distância, Seção 3.1; (ii) localização, Seção 3.2; (iii) estabilidade do *link* de comunicação, Seção 3.3; (iv) vizinhança, Seção 3.4 e (v) contexto, Seção 3.5. Por fim, foi apresentada a diferença dos protocolos propostos em relação aos protocolos da literatura. No próximo capítulo, será apresentado de forma detalhada o funcionamento dos protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU com suas respectivas estratégias de descoberta de *cache* implementadas.

Tabela 3.1: Protocolos de Descoberta de *Cache* (1)

Protocolos	Tipo Estratégia	Características	Limitação
VANILLA VNDN [30]	<i>Naive</i>	Todos veículos retransmitem o pacote de interesse no processo de descoberta de <i>cache</i>	<i>Broadcast storm</i> elevado. Não há coordenação entre os veículos no processo de descoberta de <i>cache</i>
OIFP [82]	Distância	Escolhe os veículos destinatários mais distantes do veículo remetente	Depende da informação do raio de comunicação dos veículos
NSDVN [9]	Distância	Utiliza BSAM para mitigar o <i>broadcast storm</i> usando NDN e SDN nas VANETs	Necessita de um controlador centralizado para obter o conhecimento global da rede
BSMS [17]	Distância	Usa a distância e a velocidade relativa entre os veículos para escolher os veículos retransmissores	Depende da informação da velocidade relativa do veículo remetente
LOCOS [22]	Localização	Orienta a propagação do pacote de interesse em direção ao local onde está o conteúdo	Utiliza a informação da localização dos veículos produtores que tende a ficar desatualizada rapidamente
LoICen [16]	Localização	A informação da localização dos veículos é oportunisticamente obtida	A tabela FIB que contém a localização do veículo que possui o conteúdo tende a ficar desatualizada rapidamente
LISIC [14]	Estabilidade do <i>Link</i>	Escolhe os veículos com <i>links</i> mais estáveis como nós retransmissores	Necessita da informação da velocidade e direção relativa e do raio de comunicação dos veículos
LSIF [26]	Estabilidade do <i>Link</i>	Controla múltiplas transmissões de pacotes	Necessita da informação da velocidade e direção relativa e do raio de comunicação dos veículos
DADT [40]	Vizinhança	Considera a distância entre veículos e aqueles veículos mais próximos do veículo produtor	Depende da localização do veículo que possui o conteúdo

Tabela 3.2: Protocolos de Descoberta de *Cache* (2)

Protocolos	Tipo Estratégia	Características	Limitação
NDN-SDVN [7]	Vizinhança	Os veículos <i>clusters</i> que determinam os veículos retransmissores	Alto custo computacional para criação e manutenção do <i>cluster</i>
CODIE [3]	Contexto	Controla transmissões redundantes de pacotes de dados	Não controla as transmissões de pacotes de interesse
CA-VNDN [43]	Contexto	Controla transmissões redundantes de pacotes	Depende da informação do posicionamento relativo dos veículos
CDP [58]	Distância e Angulação	Seleciona os veículos melhores posicionados geograficamente como nós retransmissores	Projetado para cenários matriciais. E a forma como o <i>sweet spot</i> determina sua angulação é fixa
CLYMENE [56]	Centralidade de Grau	Escolhe os veículos com maior número de vizinhos para retransmissão do pacote de interesse	Alto custo computacional para manutenção do conhecimento da vizinhança
PERSEU [59]	Geometria Computacional	Seleciona os veículos que compõem o polígono mínimo convexo como nós retransmissores dinamicamente e independente do cenário	Alto custo computacional para manutenção do conhecimento da vizinhança

Capítulo 4

Protocolos para Comunicação V2V Propostos

Neste capítulo, é apresentado um conjunto de três protocolos para comunicação V2V em VNDN. Como mencionado no Capítulo 3, existem diversos modos para decidir o encaminhamento do pacote de interesse. Desse modo, o principal objetivo dos protocolos propostos é reduzir o *broadcast storm* durante a etapa de descoberta de *cache* e aumentar a taxa de entrega de conteúdo, que são um dos principais desafios da integração da arquitetura NDN nas VANETs. Cabe ressaltar que os protocolos desenvolvidos se diferenciam no modo como os veículos retransmissores são escolhidos. Este capítulo está organizado do seguinte modo: (i) a Seção 4.1 apresenta o protocolo CDP, que usa o conceito de veículos melhores posicionados geograficamente para escolher os veículos retransmissores; (ii) a Seção 4.2 apresenta o protocolo CLYMENE, que se fundamenta na centralidade de grau para selecionar os veículos retransmissores e (iii) a Seção 4.3 apresenta o protocolo PERSEU que escolhe os veículos retransmissores dinamicamente e independente do cenário, utilizando o conceito de geometria computacional.

4.1 CDP: *Content Discovery Protocol*

CDP é um protocolo de encaminhamento de interesse baseado na distância e angulação do veículo remetente em relação aos veículos destinatários. CDP utiliza o posicionamento geográfico dos veículos para escolher os melhores nós para continuar o processo de descoberta de *cache*, ou seja, a propagação do pacote de interesse pela rede. Para obter o posicionamento, cada veículo possui um sistema de posicionamento global (*Global Positioning System* - *GPS*) integrado. Dessa forma, as coordenadas geográficas do veículo remetente e seus veículos vizinhos (*receiver nodes*) são usadas para calcular a prioridade de transmissão de cada veículo receptor. A prioridade de cada veículo retransmissor é feita por meio de temporizadores. Desse modo, quando um veículo recebe um pacote de interesse e não contém o conteúdo em *cache*, ele agenda a retransmissão do interesse recebido. O tempo que cada veículo aguarda para retransmitir o pacote de interesse é calculado levando dois fatores em consideração: (i) a distância de cada veículo receptor em relação ao veículo remetente e (ii) se o veículo receptor está dentro do *sweet spot*. Dessa forma,

aqueles veículos receptores que estiverem mais distantes do veículo remetente e dentro do *sweet spot*, terão maior prioridade para retransmitir o pacote de interesse. O CDP possui as seguintes características: (1) baseado em distância; (2) o encaminhamento de interesse é baseado no veículo receptor; (3) não utiliza trocas de *beacons* entre os veículos e (4) *Multi-hop*.

4.1.1 Processamento do Pacote de Interesse

O algoritmo 1 mostra o processamento do pacote de interesse do CDP. Conforme o algoritmo 1, quando o veículo recebe um pacote de interesse, ele realiza uma pesquisa na PIT (Linha 2) para verificar se o pacote de interesse é duplicado. Se o pacote de interesse for duplicado, significa que já existe algum interesse pendente na PIT e, portanto, o pacote de interesse recebido é descartado (Linha 18). Se houver alguma transmissão agendada sobre o interesse armazenado na PIT (Linha 16), a transmissão é cancelada (Linha 17), pois algum veículo vizinho já transmitiu esse interesse anteriormente. Agora, se for a primeira vez que o veículo recebe o pacote de interesse, ele realiza uma consulta na CS (Linha 3) para verificar se possui o pacote de dados correspondente. Se o veículo possui o conteúdo na CS, significa que houve *cache hit*, então o veículo envia o pacote de dados ao veículo que solicitou o conteúdo (Linha 14). Caso contrário, o veículo não possui o conteúdo na CS (*cache miss*). Quando ocorre *cache miss*, o veículo precisa retransmitir o pacote de interesse. Então, o interesse é inserido na PIT (Linha 4) e agendado para retransmissão de acordo com a sua prioridade.

Algoritmo 1: Recebeu um Pacote de Interesse

```

Entrada: [Nome,  $(x_s, y_s)$ ]
1 início
2   se Nome  $\notin$  PIT então
3     se Nome  $\notin$  CS então
4       PIT.insert(interesse);
5        $d \leftarrow \sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2}$ ;
6        $tempo\_espera \leftarrow 0.01 \times \frac{R}{d}$ ;
7       // Os dois argumentos da função atan2 são as variações do arco
8       tangente
9        $angle \leftarrow atan2(x_s - x_r, y_s - y_r)$ ;
10      se dentroSweetSpot(angulo) então
11         $tempo\_espera \leftarrow tempo\_espera + random(0, 0.01)$ ;
12      senão
13         $tempo\_espera \leftarrow tempo\_espera + random(0.02, 0.05)$ ;
14      scheduleAt(tempo_espera, sendMessage(interesse));
15    senão
16      scheduleAt(simTime(), sendMessage(Dado));
17    senão
18      se interesse.isScheduled() então
19        cancela sendMessage(interesse);
20      descarta interesse;

```

A principal contribuição do CDP é a estratégia de descoberta de *cache* (Figura 4.1)

baseada no *sweet spot* (Figura 4.1(b)), na qual os veículos melhores posicionados geograficamente são escolhidos para continuar propagando o pacote de interesse em VNDN. Dessa forma, o cálculo do tempo de agendamento do pacote de interesse funciona do seguinte modo:

- Primeiramente, o veículo calcula um atraso padrão de acordo com a sua distância em relação ao veículo remetente (Linha 6). A informação do posicionamento geográfico do veículo remetente é inserida no pacote de interesse. A função que calcula o atraso padrão considera a distância d entre os veículos receptores em relação ao veículo remetente (Linha 5) e o raio de comunicação R do veículo receptor. Conforme a função (Linha 6), quanto maior for a distância do veículo receptor do veículo remetente, menor será o valor do atraso padrão.
- Após o cálculo do atraso padrão, o veículo verifica se está dentro do *sweet spot*. Como pode ser observado na Figura 4.1(b), *sweet spot* consiste de uma área onde os veículos melhores posicionados geograficamente são escolhidos para continuar o processo de descoberta de *cache*. Visto que os veículos dentro do *sweet spot* podem alcançar um número maior de vizinhos do que os veículos que estão fora do *sweet spot* [77]. Consequentemente, se o veículo estiver dentro do *sweet spot*, um curto período de tempo é adicionado ao atraso padrão (Linha 9). Caso contrário, um tempo maior será adicionado ao atraso padrão (Linha 11). Nesse contexto, conforme ilustrado na Figura 4.1(a), os veículos verdes continuarão propagando o pacote de interesse pela rede, enquanto os veículos amarelos cancelam suas transmissões agendadas. Desse modo, o CDP garante uma boa taxa de entrega do conteúdo, diminuindo o *broadcast storm* na etapa de descoberta de *cache*.

4.1.2 Processamento do Pacote de Dados

O Algoritmo 2 apresenta o processamento do pacote de dados do CDP. Quando um veículo recebe um pacote de dados, ele verifica se existe algum interesse relacionado àquele conteúdo na PIT (Linha 2). Caso haja interesses pendentes em sua PIT, o veículo verifica se existe algum agendamento de transmissão desses interesses. Caso haja, o veículo cancela tais agendamentos (Linhas 3 e 4). Em seguida, o veículo transmite o pacote de dados aos veículos interessados por aquele conteúdo e remove tais interesses de sua PIT (Linhas 5 e 6). Ainda no processamento do pacote de dados, sempre que um veículo recebe um pacote de dados ele o armazena na CS (Linha 7). Com isso, os veículos operam como mulas de dados, transportando o conteúdo para outra região com o intuito de atender solicitações futuras e manter o conteúdo mais próximo de potenciais veículos interessados por aquele conteúdo. Esta abordagem também é conhecida como *store-carry-forwarding*.

4.1.3 Discussão Sobre o Protocolo Desenvolvido

Nesta seção, foi apresentado o protocolo CDP para minimizar o *broadcast storm* na etapa de descoberta de *cache* em VNDN. Para isto, o CDP aplica o conceito de *sweet spot* com

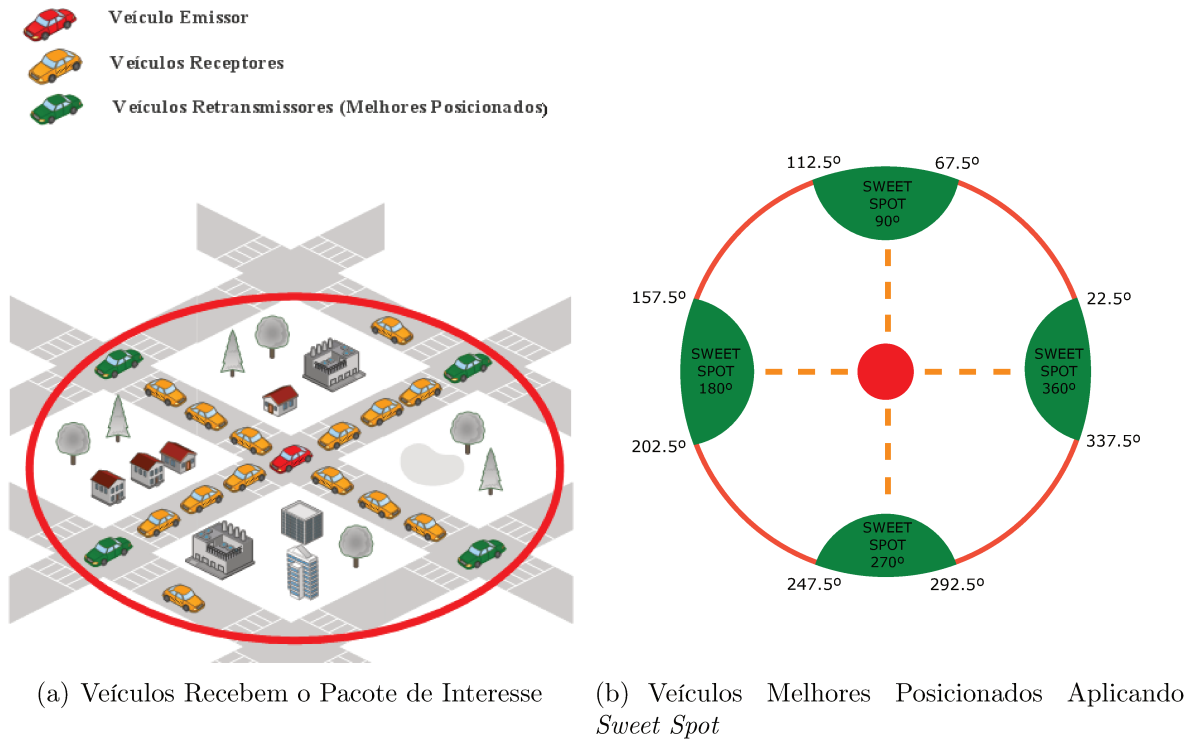


Figura 4.1: Estratégia de Descoberta de *Cache*

Algoritmo 2: Recebeu um Pacote de Dados

```

Entrada: Dado =  $\langle \text{Nome}, \text{conteudo} \rangle$ 
1 início
2   se Nome  $\in$  PIT então
3     se Nome == interesse.isScheduled() então
4        $\perp$  cancela sendMessage(interesse);
5     sendMessage(Dado);
6     PIT.remove(Nome);
7   CS.insert( $\langle$  Nome, conteudo  $\rangle$ );

```

o intuito de priorizar os veículos melhores posicionados geograficamente, para continuar propagando o pacote de interesse pela rede. Enquanto os veículos com menor prioridade cancelam suas transmissões de interesse agendadas. Apesar do CDP ser eficiente em um cenário topológico matricial, tal protocolo tende a perder desempenho no processo de descoberta de *cache* em cenários radiais, visto que a angulação realizada no *sweet spot* foi modelada para cenários matriciais. Além disso, por ter sido projetado para cenários matriciais, a estratégia de escolha dos veículos retransmissores é fixa devido à maneira como *sweet spot* foi angulado. Com isso, a taxa de *cache hit* e a garantia de entrega de conteúdo podem ser prejudicadas. Visando superar esta limitação, este trabalho propõe mais dois protocolos (CLYMENE e PERSEU), em que a estratégia de escolha dos veículos retransmissores de cada protocolo é realizada dinamicamente e independente do cenário. A seguir, será apresentado o fluxo de processamento dos pacotes de interesse e dados dos protocolos CLYMENE e PERSEU, respectivamente.

4.2 CLYMENE: *Degree Centrality-based Caching Discovery Protocol*

Esta seção descreve a operação do protocolo CLYMENE, que visa melhorar o *cache hit* no processo de descoberta de *cache* e garantir uma boa taxa de entrega de conteúdo com o mínimo de transmissões. No CLYMENE, é o veículo receptor que decide se irá continuar propagando o pacote de interesse pela rede. Para isto, cada veículo receptor deve ter o conhecimento da sua vizinhança de um salto. Com o intuito de garantir uma boa taxa de entrega de conteúdo na etapa de descoberta de *cache*, o protocolo CLYMENE prioriza o veículo receptor mais distante do veículo remetente e com maior número de vizinhos.

Modelagem do Sistema

Considere um cenário VNDN urbano consistindo de n veículos, no qual cada veículo possui uma identificação exclusiva ($i \in [1, n]$). Esses veículos podem ser representados por um grafo dinâmico $G = (V, E)$, em que os vértices $V(G)$ representam um conjunto finito de veículos, enquanto as arestas $E(G)$ representam um conjunto finito de *links* sem fio assimétricos entre veículos. Cada veículo v_i está equipado com um rádio compatível com o padrão IEEE 802.11p e conhece sua posição atual p usando um sistema de posicionamento, como GPS. Além disso, cada veículo v_i possui um subconjunto $S \subseteq V(G)$ que representa sua vizinhança de um salto.

Um determinado veículo v_i deve ter o conhecimento contextual sobre seus vizinhos de um salto S . O número de vizinhos é calculado por meio de trocas de *beacons* realizadas naturalmente entre os veículos. Dessa forma, cada veículo v_i pode obter sua centralidade de grau g para escolher os veículos mais adequados para continuar o processo de descoberta de *cache*. Além disso, cada veículo v_i adiciona seu posicionamento geográfico atual p no pacote de interesse.

A Figura 4.2 mostra o processo de descoberta de *cache* do protocolo CLYMENE. O veículo vermelho representa o veículo consumidor, o veículo azul representa o veículo produtor e os veículos amarelo e verde representam os veículos intermediários. Especificamente, o veículo produtor contém o conteúdo na *cache*, o veículo consumidor deseja algum conteúdo e os veículos intermediários são encaminhadores de pacotes de interesse e dados. De acordo com a Figura 4.2, os veículos verde continuarão o processo de descoberta de *cache*, visto que eles estão mais distantes do veículo consumidor e contém um maior número de veículos vizinhos.

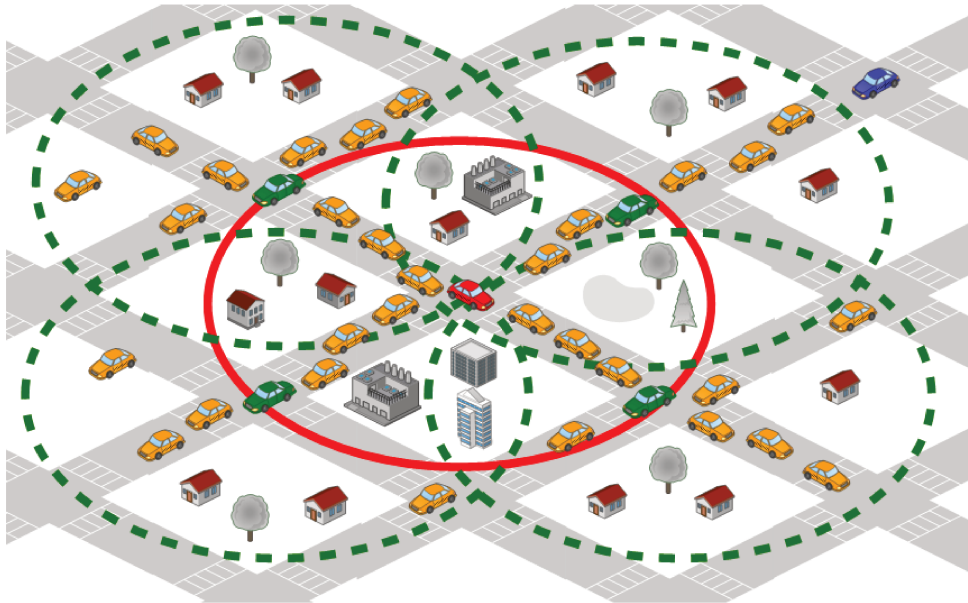


Figura 4.2: Cenário VNDN

4.2.1 Processamento do Pacote de Interesse

O CLYMENE determina a prioridade de transmissão de cada veículo v_i que recebeu um pacote de interesse, através de um tempo de espera T . Especificamente, cada veículo receptor v_i aguarda um tempo T antes de encaminhar o pacote de interesse recebido. Para evitar o *broadcast storm*, o veículo receptor v_i cancela suas transmissões agendadas quando percebe que o mesmo pacote de interesse já foi transmitido por outro veículo. Nesse contexto, o CLYMENE calcula o tempo de espera T considerando dois fatores: (i) a distância entre os veículos receptores e emissor e (ii) a centralidade de grau g do veículo receptor v_i , referente ao número de veículos vizinhos S que o veículo receptor v_i contém naquele momento. A centralidade de grau g é essencial para quantificar a importância de um determinado veículo v_i na rede. Pois um veículo retransmissor com maior quantidade de veículos vizinhos tem maior probabilidade de encontrar veículos produtores e, conseqüentemente, garantir uma boa taxa de entrega de conteúdo. Portanto, o tempo de espera T será menor se o veículo receptor v_i estiver mais próximo do limite do raio comunicação do veículo emissor e possuir um maior número de veículos vizinhos.

O Algoritmo 3 descreve o processamento do pacote de interesse do protocolo CLYMENE, em que o veículo receptor v_i decide se descarta ou envia o pacote de interesse, ou se envia o pacote de dados ao veículo consumidor. Inicialmente, quando um veículo recebe um pacote de interesse, ele faz uma pesquisa na PIT para verificar se o interesse recebido é duplicado (Linha 2). Se o pacote de interesse for duplicado, o veículo descarta. E se houver alguma transmissão agendada em relação ao pacote de interesse recebido, o veículo cancela a transmissão porque algum veículo já transmitiu esse pacote de interesse previamente (Linhas 12 e 13). Caso contrário, significa que é a primeira vez que o veículo v_i recebe o pacote de interesse e, portanto, ele faz uma consulta na CS para verificar se possui o pacote de dados correspondente (Linha 3). Se o veículo v_i possui o conteúdo na CS, ele envia o pacote de dados ao veículo que solicitou o conteúdo (Linha 10).

Por outro lado, quando ocorre *cache miss*, ou seja, o veículo não possui o conteúdo na CS, o veículo v_i agenda a transmissão do pacote de interesse de acordo com sua prioridade através do tempo de espera T . Dessa forma, o veículo receptor v_i calcula sua distância do veículo emissor (Linha 5). Ressaltando que o posicionado geográfico p do veículo emissor é inserido no pacote de interesse. Logo após, o veículo receptor v_i obtém a centralidade de grau g naquele momento (Linha 6). E por fim, o veículo receptor v_i calcula o tempo de espera T e agenda a retransmissão do pacote de interesse conforme o tempo T (Linhas 7 e 8). O tempo de espera T é calculado com base em uma função inversamente proporcional, cujo objetivo é priorizar os veículos receptores que estão mais distantes do veículo emissor e com maior número de vizinhos, resultando em um tempo de espera T menor.

Algoritmo 3: Recebeu um Pacote de Interesse

```

Input: Interest [Name, Selector(s), NONCE]

1 begin
2   if Name  $\notin$  PIT then
3     if Name  $\notin$  CS then
4       PIT.insert(Interest);
5        $d \leftarrow \text{distance}(\text{receiver}, \text{sender})$ ;
6        $g \leftarrow \text{degree}()$ ;
7        $T \leftarrow \frac{1}{d + g}$ ;
8       scheduleAt [Interest, T];
9     else
10      Send DATA;
11  else
12    if Interest is scheduled then
13      Cancel Interest transmission;
14    Discard Interest;

```

4.2.2 Processamento do Pacote de Dados

O Algoritmo 4 apresenta o processamento do pacote de dados do CLYMENE. Quando um veículo v_i recebe um pacote de dados, ele verifica se existe algum interesse relacionado àquele conteúdo na PIT (Linha 2). Caso haja interesses pendentes na PIT, o veículo v_i verifica se existe algum agendamento de transmissão desses interesses. Caso haja, o veículo v_i cancela tais agendamentos (Linhas 3 e 4). Em seguida, o veículo v_i transmite o pacote de dados aos veículos interessados pelo conteúdo e remove tais interesses de sua PIT (Linhas 5 e 6). Ainda no processamento do pacote de dados, sempre que um veículo v_i recebe um pacote de dados ele o armazena na CS (Linha 7). Com isso, os veículos operam como mulas de dados transportando o conteúdo para outra região afim de atender solicitações futuras e manter o conteúdo mais próximo dos veículos consumidores. Esta abordagem também é conhecida como *store-carry-forwarding*.

Algoritmo 4: Recebeu um Pacote de Dados

Entrada: Dado = $\langle \text{Nome}, \text{conteudo} \rangle$

```

1 início
2   se Nome ∈ PIT então
3     se Nome == interesse.isScheduled() então
4       └─ cancela sendMessage(interesse);
5       sendMessage(Dado);
6       PIT.remove(Nome);
7   └─ CS.insert( $\langle \text{Nome}, \text{conteudo} \rangle$ );

```

4.2.3 Discussão Sobre o Protocolo Desenvolvido

Nesta seção, foi apresentado o protocolo CLYMENE com o intuito aumentar a taxa de *cache hit* no processo de descoberta de *cache* e garantir uma boa taxa de entrega de conteúdo, com o menor número de transmissões de pacote de interesse. Para isto, o protocolo CLYMENE escolhe os veículos com maior centralidade de grau para continuar propagando o pacote de interesse pela rede. Enquanto os veículos com baixa centralidade de grau cancelam suas transmissões agendadas. Entretanto, com o propósito de maximizar a taxa de *cache hit* e aumentar a taxa de entrega de conteúdo, a seguir é apresentado o protocolo PERSEU.

4.3 PERSEU: Protocolo Baseado em Geometria Computacional para Descoberta de *Cache*

Nesta seção é apresentado o PERSEU, um protocolo geométrico para descoberta de *cache* em VNDN, capaz de minimizar o *broadcast storm* durante a comunicação entre veículos e garantir um ótimo desempenho na descoberta e entrega de conteúdo. O PERSEU tem seu modelo baseado no conceito de geometria computacional para escolher os veículos retransmissores de pacotes de interesse. Desse modo, foi aplicado o problema de encontrar a envoltória convexa em um dado conjunto de pontos Q , visto que a aplicação da envoltória convexa pode ser feita dinamicamente sobre os veículos vizinhos do veículo solicitante. Com isso em mente, a seguinte definição foi formulada:

Definição I: Considere um cenário VANET composto por n veículos. Cada veículo v_i possui uma identificação exclusiva ($i \in [1, n]$) e contém um rádio compatível ao padrão IEEE 802.11p integrado. Tais veículos foram modelados por um grafo dinâmico $G = (V(G), E(G))$ que representa os enlaces sem fio assimétricos entre eles, em que $V(G)$ representa o conjunto de veículos e $E(G)$ representa o enlace de comunicação entre os veículos vizinhos de v_i . Cada veículo $v_i \in V(G)$ conhece sua posição atual p_v usando GPS e o conjunto de veículos vizinhos $N_v \subseteq V(G)$ composto por vizinhos a um salto de v_i . O conjunto $E'_v \subseteq E(G)$ representa o enlace de comunicação entre v_i e seus vizinhos. Finalmente, seja $Q = V(G)$ o conjunto de pontos contendo os vértices de G .

O PERSEU parte da premissa de reduzir a quantidade de transmissões de pacotes de interesse, ao mesmo tempo que mantém uma alta taxa de *cache hit* com um aumento na taxa de entrega de conteúdos. Para um melhor entendimento, o PERSEU será descrito em

duas etapas: (i) processamento do pacote de interesse, Subseção 4.3.1 e (ii) processamento do pacote de dados, Subseção 4.3.2.

4.3.1 Processamento do Pacote de Interesse

Na operação do protocolo PERSEU, cada veículo v deve transmitir *beacons* periódicos contendo sua identificação ID e sua posição atual p_v para que cada veículo v possa construir o conhecimento contextual sobre seus vizinhos. Ao receber um *beacon*, o veículo v salva essa informação em sua lista de vizinhos N_v e, no momento que necessita transmitir o pacote de interesse, cria um conjunto Q de pontos. Em seguida, calcula a envoltória convexa $CH(Q)$ conforme ilustrado na Figura 4.3, passando como parâmetro o conjunto Q de pontos ao algoritmo de *Graham Scan* [29], cuja a complexidade de tempo no pior caso é $O(n \log n)$. Após o cálculo da envoltória convexa, o veículo solicitante insere o $CH(Q)$ no pacote de interesse. Assim, quando os veículos vizinhos receberem o pacote de interesse, eles verificam se são veículos retransmissores certificando se seus IDs estão contidos em $CH(Q)$. Caso verdadeiro, o protocolo PERSEU seleciona tais veículos para continuar a retransmissão dos pacotes de interesse. Caso contrário, eles descartarão os pacotes de interesse.

O PERSEU identifica cada veículo que irá continuar o processo de propagação do pacote de interesse como um ponto pertencente à envoltória convexa do conjunto Q . Sendo assim, considere um conjunto Q de pontos no plano euclidiano. Um polígono é convexo quando não há um segmento de reta entre dois pontos internos ao polígono que atinge o exterior do polígono, conforme mostrado na Figura 4.3(a). A envoltória convexa do conjunto Q de pontos consiste no menor polígono convexo $CH(Q)$ tal que todo ponto pertencente à Q está no interior ou na borda de $CH(Q)$. A Figura 4.3(b) exemplifica a envoltória convexa de um conjunto Q de pontos. O problema de encontrar a envoltória convexa de um conjunto de pontos Q pode ser resolvido pelo algoritmo de *Graham Scan*, cuja complexidade de tempo é $O(n \log n)$, em que n é o tamanho do conjunto Q .

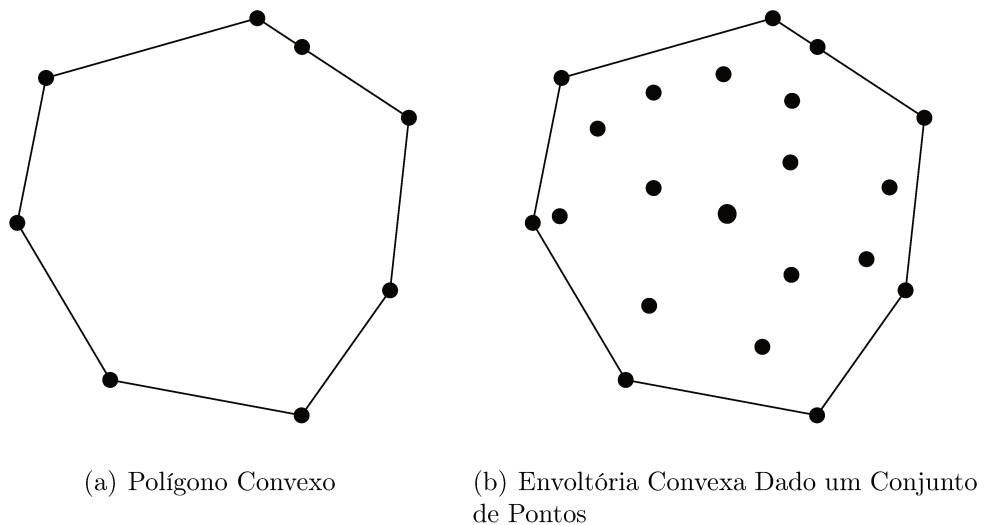


Figura 4.3: Definição de Polígono Convexo e o Cálculo da Envoltória Convexa

Na etapa de descoberta de *cache* em uma rede VNDN, o processo de seleção dos veículos retransmissores pode ser modelado através do problema de encontrar a envoltória convexa $CH(Q)$ de um conjunto Q de pontos. Suponha que cada veículo de uma rede VNDN é representado por um ponto p em Q . Portanto, aplicando o algoritmo de *Graham Scan*, os veículos selecionados para propagar o pacote de interesse na rede serão aqueles que compõem a borda da envoltória convexa $CH(Q)$, que são os veículos mais distantes do veículo solicitante. Uma vez que o objetivo é maximizar a propagação de interesse na rede, mantendo um alto índice de *cache hit* no processo de descoberta de *cache*, com o menor número de transmissões desses pacotes de interesse. O Algoritmo 5 exibe o fluxo de processamento do pacote de interesse do PERSEU.

Algoritmo 5: Recebeu um Pacote de Interesse

Entrada: [Nome, veiculosRetransmissores, (x_s, y_s)]

```

1 início
2   relays  $\leftarrow \emptyset$ ;
3   se Nome  $\notin$  PIT então
4     se Nome  $\notin$  CS então
5       PIT.insert(interesse);
6       se myId  $\in$  interesse.veiculosRetransmissores então
7         // Q representa os veículos vizinhos
8         relays  $\leftarrow$  calculaEnvoltoriaConvexa(Q);
9          $d \leftarrow \sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2}$ ;
10        adiciona relays em interesse.veiculosRetransmissores;
11        tempo_espera  $\leftarrow$  date() + 0.01  $\times \frac{R}{d}$ ;
12        scheduleAt(tempo_espera, sendMessage(interesse));
13      senão
14        descarta interesse;
15    senão
16      scheduleAt(simTime(), sendMessage(Dado));
17  senão
18    se nteresse.isScheduled() então
19      cancela sendMessage(interesse);
20  descarta interesse;
```

Como mencionado anteriormente, para o funcionamento do PERSEU, assume-se que cada veículo possui GPS integrado. A etapa de descoberta de *cache* se baseia no veículo solicitante para continuar a transmissão do pacote interesse, cujo veículo que irá transmitir o pacote interesse decide quem são os próximos veículos que continuarão propagando tal interesse pela rede.

Com base nas definições do Algoritmo 5, quando o pacote recebido é um interesse por um determinado conteúdo, o primeiro passo é realizar uma busca na PIT ¹ (Linha 3) para verificar se tal interesse é duplicado. Se o interesse for duplicado, significa que já existe o mesmo interesse pendente na PIT, e portanto, o interesse recebido é descartado (Linha 20). Se houver alguma transmissão agendada em relação ao interesse armazenado

¹ A PIT é utilizada para manter os interesses que ainda não foram atendidos com os pacotes de dados correspondentes.

na PIT, a transmissão será cancelada, uma vez que algum veículo vizinho já transmitiu o pacote de interesse previamente (Linhas 17 e 18). Se por outro lado for a primeira vez que o veículo recebe um pacote de interesse, ele faz uma consulta na CS ² (Linha 4) pelo pacote de dados correspondente. Se o veículo tiver o pacote de dados, significa que houve *cache hit* e, conseqüentemente, ele envia o pacote de dados ao veículo que solicitou o conteúdo (Linha 15). Caso contrário, o veículo não possui o conteúdo na CS e, portanto, houve *cache miss*. Com isso, o veículo insere o interesse na PIT (Linha 5). No próximo passo, o veículo verifica se ele é um nó retransmissor (Linha 6), verificando no pacote de interesse recebido se seu *ID* consta no conjunto $CH(Q)$ correspondente aos veículos retransmissores. Caso seu *ID* esteja contido em $CH(Q)$, significa que o veículo faz parte da envoltória convexa e, portanto, irá transmitir o pacote de interesse.

A principal contribuição do protocolo PERSEU se dá pela estratégia de descoberta de *cache* desenvolvida, que se baseia na envoltória convexa para escolher os veículos retransmissores mais adequados, visto que a escolha dos veículos retransmissores é feita dinamicamente e independente do cenário em questão. Desse modo, conforme o Algoritmo 5 e a Figura 4.4, sempre que um veículo solicitante for retransmitir um pacote de interesse, ele: (i) obtém a lista de vizinhos $N_v \subseteq V(G)$ que ele possui naquele momento; (ii) cria um conjunto Q de pontos; e (iii) passa esse conjunto Q de pontos ao algoritmo de *Graham Scan* (Linha 7), que tem por objetivo encontrar a envoltória convexa, conforme exibido na Figura 4.4(b). Caso contrário, é assumido que o veículo não faz parte da envoltória convexa, e portanto, o pacote de interesse recebido é descartado (Linha 13).

Como pode ser notado no Algoritmo 5, ao aplicar o algoritmo de *Graham Scan*, os veículos que continuarão propagando o pacote de interesse são aqueles que estão mais distantes do veículo solicitante. Assim, a propagação do pacote de interesse na etapa de descoberta de *cache* se torna bastante efetiva, visto que os veículos mais distantes do veículo solicitante são aqueles que formam a envoltória convexa e estão mais próximos do limite do raio de comunicação do veículo solicitante. Conseqüentemente, os veículos escolhidos para retransmitir o pacote de interesse têm mais chances de alcançar potenciais veículos produtores, que são aqueles veículos que contêm o conteúdo na CS. Enquanto que, aqueles veículos que não fazem parte da envoltória convexa, não retransmitem o pacote de interesse na rede. Logo após a escolha dos veículos retransmissores, tais veículos agendam suas transmissões através de temporizadores, tendo como base suas distâncias em relação ao veículo solicitante (Linhas 8-11). O intuito do agendamento de transmissão é priorizar, dentre os veículos que compõem a envoltória convexa, aqueles que estão mais próximos do limite do raio de comunicação do veículo solicitante, buscando minimizar ainda mais a quantidade de transmissões de pacotes de interesse na rede.

Dessa forma, o PERSEU potencializa o processo de descoberta de *cache*, pois atenua o problema de *broadcast storm* durante a comunicação entre veículos e maximiza a taxa de entrega de conteúdo em larga escala na rede VNDN. Ressaltando que um dos maiores desafios na entrega de conteúdo em VNDN é a dinamicidade topológica da rede por conta da mobilidade dos veículos.

²A CS é utilizada para armazenar os pacotes de dados por um certo período de tempo, de acordo com a validade temporal de cada conteúdo (*Time-To-Live - TTL*).

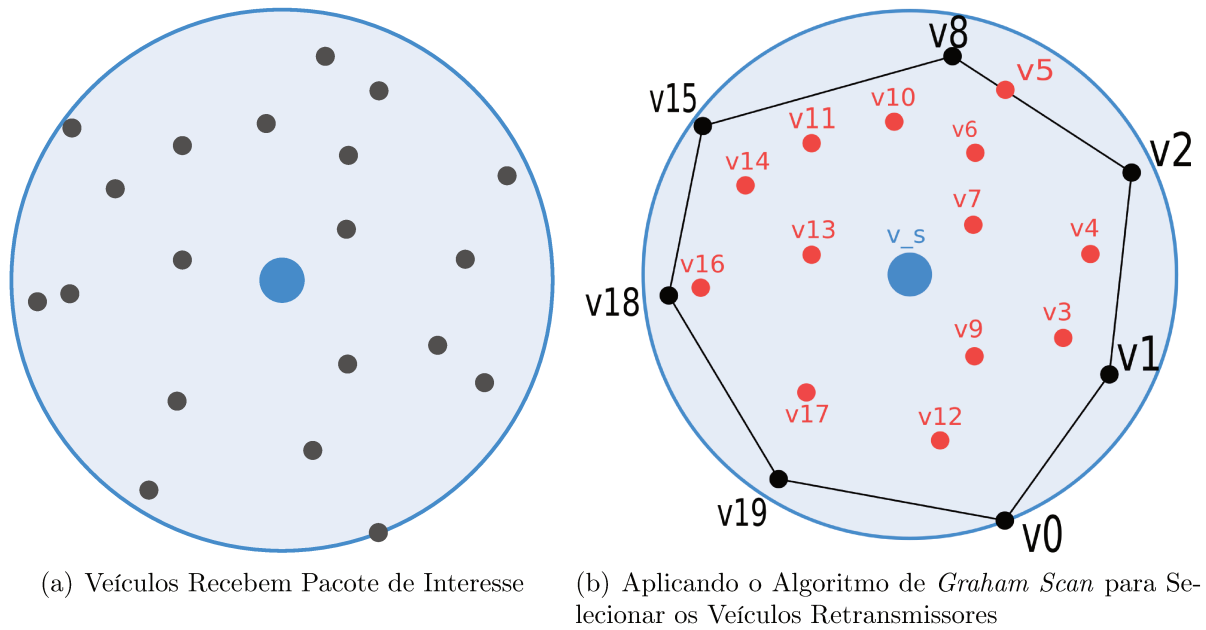


Figura 4.4: Estratégia de Descoberta de *Cache*

4.3.2 Processamento do Pacote de Dados

O Algoritmo 6 apresenta o processamento do pacote de dados do PERSEU. Quando um veículo recebe um pacote de dados, ele verifica se existe algum interesse relacionado àquele conteúdo na PIT (Linha 2). Caso contenha interesses pendentes em sua PIT, o veículo verifica se existe algum agendamento de transmissão desses interesses. Caso haja, o veículo cancela esses agendamentos (Linhas 3 e 4). Em seguida, o veículo transmite o pacote de dados aos veículos interessados por aquele conteúdo e remove tais interesses de sua PIT (Linhas 5 e 6). Ainda no processamento do pacote de dados, sempre que um veículo recebe um pacote de dados ele o armazena na CS (Linha 7). Com isso, os veículos operam como mulas de dados transportando o conteúdo para outra região afim de atender solicitações futuras e manter o conteúdo mais próximo de potenciais veículos interessados por aquele conteúdo. Esta abordagem também é conhecida como *store-carry-forwarding*.

Algoritmo 6: Recebeu um Pacote de Dados

Entrada: Dado = $\langle \text{Nome}, \text{conteudo} \rangle$

```

1 início
2   se Nome ∈ PIT então
3     se Nome == interesse.isScheduled() então
4       | cancela sendMessage(interesse);
5     | sendMessage(Dado);
6     | PIT.remove(Nome);
7   | CS.insert( $\langle \text{Nome}, \text{conteudo} \rangle$ );

```

4.4 Resumo Conclusivo

Neste capítulo foi apresentado um conjunto de três protocolos (CDP, CLYMENE e PERSEU), para mitigar o *broadcast storm* durante a etapa de descoberta de *cache* e manter uma boa taxa de entrega de conteúdo. Para reduzir colisões de pacotes na rede, primeiramente foi proposto o protocolo CDP. A estratégia para escolher os veículos retransmissores no CDP leva em consideração dois fatores: (i) a distância entre os veículos receptores e emissor e (ii) o conceito de veículos melhores posicionados geograficamente (*sweet spot*). Porém, como mencionado anteriormente, o CDP foi projetado para um cenário específico (matricial). Por esta razão, este trabalho propõem os protocolos CLYMENE e PERSEU, com o intuito de aumentar o *cache hit* e a taxa de entrega do conteúdo. O protocolo CLYMENE se baseia na centralidade de grau. Priorizando os veículos com maior número de vizinhos para continuar propagando o pacote de interesse pela rede. Já o protocolo PERSEU utiliza o conceito de geometria computacional para selecionar os veículos retransmissores, aplicando o problema encontrar a envoltória convexa em um determinado conjunto de pontos Q . Dessa forma, os veículos que formam o polígono mínimo convexo são escolhidos para continuar o processo de descoberta de *cache*. Diferente do CDP, os protocolos CLYMENE e PERSEU necessitam da informação de suas vizinhas a 1 salto para escolher os veículos retransmissores. A informação da vizinha é obtida por meio de troca de *beacons* entre os veículos. A seguir, é apresentado os resultados obtidos.

Capítulo 5

Simulação e Avaliação dos Resultados

Este capítulo apresenta o desempenho dos protocolos desenvolvidos por meio de simulações computacionais. Dessa forma, este capítulo foi dividido em quatro frentes: (i) são apresentados os simuladores utilizados para simular o comportamento dos protocolos, Seção 5.1; (ii) é apresentada a configuração do cenário, os parâmetros de simulação e as métricas escolhidas, Seção 5.2; (iii) os resultados obtidos da simulação, Seção 5.3 e (iv) é apresentada a aplicabilidade dos protocolos desenvolvidos, Seção 5.4.

5.1 Ferramentas Utilizadas

A avaliação dos protocolos foi realizada por meio de simulação computacional. Os protocolos propostos foram comparados com o Vanilla VNDN e OIFP, em um cenário urbano que será detalhado na seção subsequente. Para realização das simulações, foram utilizados os seguintes simuladores:

- Veins (*Vehicles in Network Simulation*)¹, é um *framework* de código aberto, que permite de forma estruturada a simulação de redes veiculares, por meio do padrão IEEE 802.11p, que provém comunicação inter-veículos (*Inter-Vehicular Communication - IVC*);
- OMNet++ (*Modular Network Testbed*)², é um simulador de eventos discretos geralmente empregado para a construção de simuladores de rede. Este simulador possui código aberto e não foi projetado para ser um simulador de domínio específico. Deste modo, ele tem sido utilizado para simular diversos estados diferentes: rede de sensores, rede sem fio, modelagem de performance, dentre outros domínios [75].
- SUMO (*Simulation of Urban Mobility*) [12] é um simulador de mobilidade veicular de código aberto e altamente portátil. SUMO possibilita a simulação de redes veiculares em cenários mais próximos possíveis da realidade. Possibilitando a geração de mapas de forma manual ou automática ou por meio de importação de mapas do mundo real. O SUMO permite ao usuário definir todos os parâmetros de mobilidade

¹<http://veins.car2x.org/>

²<https://omnetpp.org/>

veicular necessários para sua simulação: velocidade mínima e máxima, acelerações e desacelerações, tempos de espera do veículo, configuração da rota de cada veículo, quantidade de faixas por vias, uso de semáforos. Além das configurações dos parâmetros de mobilidade, também é possível analisar emissão de gases poluentes e consumo de combustível.

A figura 5.1 apresenta a arquitetura Veins, que permite a integração do OMNet++ para simulação do comportamento dos protocolos desenvolvidos e o SUMO para simulação da mobilidade veicular. Na execução de simulações, ambos simuladores (OMNet++ e SUMO) são executados em paralelo e conectados via TCP.

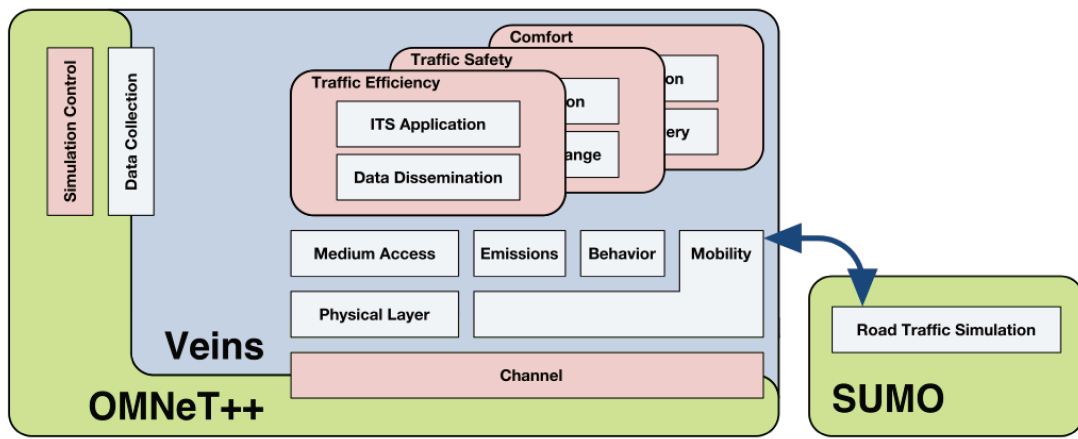


Figura 5.1: Arquitetura Veins

Cabe ressaltar que os simuladores escolhidos são amplamente utilizados pela comunidade científica para simular soluções em redes veiculares. A seguir será apresentado o cenário escolhido para avaliar o desempenho dos protocolos.

5.2 Configuração do Cenário

Os protocolos foram avaliados em um cenário urbano, cujo cenário escolhido refere-se à uma área de $2Km^2$ da cidade de *Ottawa*, Canada (Figura 5.2). A razão pela qual a cidade de *Ottawa* foi escolhida para avaliar o comportamento dos protocolos se resume em dois fatores: (i) realizar uma comparação justa entre os protocolos desenvolvidos e os protocolos OIFP e Vanilla VNDN num cenário realístico e (ii) por conta da topologia da cidade de *Ottawa* possuir um formato matricial, que é bastante característico em ambientes urbanos. Esta área foi extraída usando a ferramenta *Open Street Map (OSM)*³. Com essa ferramenta é possível exportar mapas no formato OSM que possibilitam a edição de dados de modo colaborativo. O mapa nesse formato pode conter descrições detalhadas como: velocidade máxima, quantidade de faixas nas vias, vias prioritárias e semáforos nas intersecções.

³<https://www.openstreetmap.org>



Figura 5.2: Cidade de Ottawa, Canada [22]

Toda mobilidade veicular da cidade de *Ottawa* foi gerada randomicamente pelo SUMO. Com o intuito de realizar uma comparação justa entre os protocolos, foi assumido que 30% dos veículos são nós consumidores. Esses veículos foram selecionados aleatoriamente durante o *startup* da simulação. Além disso, foi feita uma variação de veículos produtores em 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, bem como uma variação da densidade de veículos em 100, 200, 300, 400, 500, 600 para investigar seu impacto na entrega de conteúdo dos protocolos. Semelhantes aos veículos consumidores, os veículos produtores foram selecionados aleatoriamente no *startup* da simulação. Na simulação, foi adotada a comunicação V2V. E os demais conjuntos de parâmetros usados para realizar as simulações são apresentados na Tabela 5.1.

5.3 Resultados

Os protocolos desenvolvidos (CDP, CLYMENE e PERSEU) foram validados em duas etapas. Na primeira etapa, os protocolos foram avaliados considerando uma variação do número de veículos produtores, com o objetivo de investigar o comportamento dos protocolos desde um cenário com poucos veículos produtores até um cenário com bastante veículos produtores. Já na segunda etapa, foi realizada uma variação da densidade de veículos, para investigar o comportamento dos protocolos partindo de um cenário esparsos para um cenário congestionado. Nesse contexto, o objetivo é analisar a eficiência dos protocolos na taxa de entrega de conteúdo a partir do início da incidência de *broadcast storm* durante o processo de descoberta de *cache*. Cada simulação foi executada 33 vezes com um intervalo de confiança de 95%, de acordo com o *t-test*. No tocante à avaliação de desempenho dos protocolos, foram consideradas as seguintes métricas:

- **Cache hit:** representa a porcentagem de acertos na *cache* (CS) dos veículos produtores, durante o processo de descoberta de *cache* dos veículos consumidores.
- **Taxa de entrega de conteúdo:** representa a porcentagem de veículos que receberam com êxito o conteúdo solicitado.

Tabela 5.1: Parâmetros de Simulação

Parâmetro	Valor
Tecnologia de comunicação	IEEE 802.11p
MAC	IEEE 1609.4
Potência de transmissão	1.6 mW
Raio de transmissão	250 m
Frequência do canal	5.9 GHz
Taxa de bits	6 Mbps
Tamanho pacote de dados	8192 bits
Tamanho pacote de interesse	400 bits
Tamanho <i>beacon</i>	80 bits
Quantidade de conteúdos	10
Número de <i>chunks</i>	10
TTL pacote de interesse	25 s
TTL pacote de dados	25 s
Execuções	33
Densidade de veículos	100, 200, 300, 400, 500 e 600
Veículos consumidores (%)	30
Veículos produtores (%)	5, 10, 15, 20, 25
Tempo de simulação	350 s
Intervalo de confiança	95%

- **Atraso médio:** representa o tempo gasto para que o veículo consumidor receba os pacotes de dados em relação aos pacotes de interesse transmitidos.
- **Colisão média de pacotes:** representa a quantidade de colisões de pacotes na camada MAC para todos os veículos ⁴.
- **Transmissão média de interesses:** representa a quantidade de vezes que cada veículo transmite um pacote de interesse.

Os resultados obtidos com suas discussões são apresentados a seguir.

5.3.1 *Cache Hit*

Análise dos resultados variando a quantidade de veículos produtores

A métrica de *cache hit* é usada para aferir as capacidades dos protocolos no que diz respeito à eficiência no processo de descoberta de *cache* em VNDN. A Figura 5.3 apresenta os resultados obtidos em um cenário com 300 veículos. De modo geral, à medida que o número de veículos produtores aumenta na rede, o *cache hit* na etapa de busca pelo conteúdo cresce independente dos protocolos. De acordo com os resultados, o PERSEU foi o protocolo que obteve maior *cache hit*.

⁴Como mencionado anteriormente, um alto número de colisões é consequência do problema de *broadcast storm*

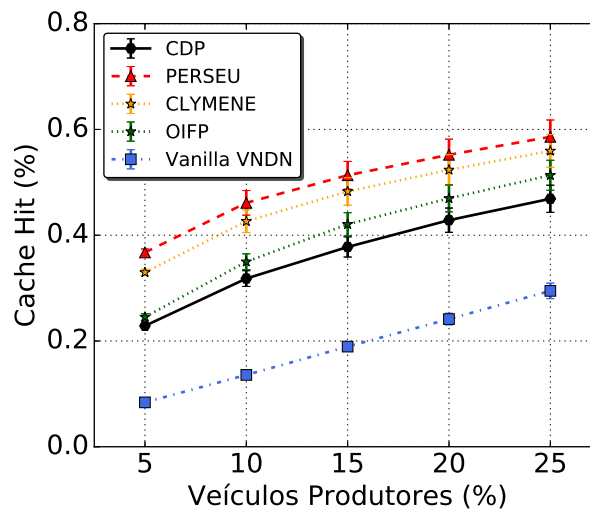


Figura 5.3: Porcentagem de *Cache Hit*

Em um cenário crítico com 5% de veículos produtores, o PERSEU é 337,7% mais eficiente que o Vanilla VNDN e 49,7% mais eficiente quando comparado com o OIFP. Quando o cenário contém bastante veículos produtores (25%), o PERSEU é 100% e 14,8% mais eficiente no processo de descoberta de *cache* em relação ao Vanilla VNDN e OIFP, respectivamente. Isso se deve à estratégia de encaminhamento do pacote de interesse que utiliza o conceito de geometria computacional para selecionar os veículos retransmissores, visto que a escolha dos próximos veículos que irão continuar propagando interesse pela rede ocorre dinamicamente e independente do cenário.

Do mesmo modo que o PERSEU, o CLYMENE também possui uma boa taxa de *cache hit* quando comparado com o Vanilla VNDN e OIFP. Num cenário crítico com 5% de veículos produtores, o CLYMENE é 292,8% mais eficiente que o Vanilla VNDN e 34,4% mais eficiente que o OIFP. Já em um cenário com 25% de veículos produtores, o CLYMENE é 89,7% e 8,9% mais eficiente que o Vanilla VNDN e OIFP, respectivamente. O CLYMENE possui melhor *cache hit* porque os veículos selecionados para continuar o processo de descoberta de *cache*, são aqueles veículos que estão mais distantes do veículo emissor e com maior número de vizinhos. Portanto, há uma maior probabilidade de encontrar potenciais veículos que possuem o conteúdo em *cache*.

Quanto ao protocolo CDP, ele obteve menor *cache hit* que o PERSEU, CLYMENE e OIFP. Entretanto, quando comparado com o Vanilla VNDN, o CDP é 172,3% mais eficiente em um cenário com 5% de veículos produtores e 59% mais eficiente num cenário com 25% de veículos produtores. A razão pela qual o CDP possui maior *cache hit* que o Vanilla VNDN está no modo como os veículos retransmissores são escolhidos na etapa de descoberta de *cache*. Visto que o CDP escolhe os veículos melhores posicionados geograficamente, usando o conceito de *sweet spot*.

Analisando os protocolos desenvolvidos, o PERSEU obteve maior *cache hit* na etapa de descoberta de *cache*. Em um cenário com apenas 5% de veículos produtores, o PERSEU é 11,4% e 60,7% mais eficiente que o CLYMENE e CDP, respectivamente. Quando o cenário possui bastante veículos produtores (25%), o PERSEU é 5,4% e 25,8% mais eficiente que o CLYMENE e CDP. A razão pela qual o PERSEU é mais robusto no processo de

descoberta de *cache* está no modo como os veículos retransmissores são escolhidos. Visto que os veículos que pertencem ao polígono mínimo convexo propagam eficientemente o pacote de interesse pela rede.

Análise dos resultados variando a densidade de veículos

Como pode-se notar na Figura 5.4, à medida que a densidade de veículos aumenta na rede, o *cache hit* também aumenta no processo de descoberta de *cache*. Entre os protocolos avaliados, os resultados comprovam que o PERSEU, CLYMENE e CDP obtiveram melhor desempenho em relação ao Vanilla VNDN e OIFP em um cenário crítico com 5% de veículos produtores. Isso ocorre devido às estratégias de encaminhamento de interesse implementadas nos protocolos, que visam escolher os veículos mais adequados para continuar propagando o interesse pela rede.

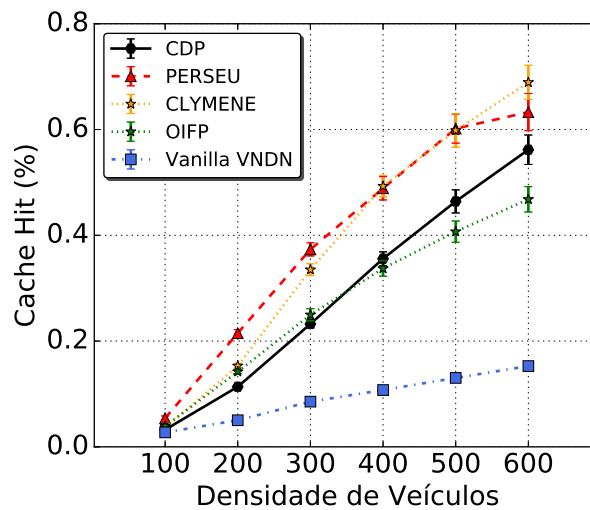


Figura 5.4: Porcentagem de *Cache Hit*

5.3.2 Taxa de Entrega de Conteúdo

Análise dos resultados variando a quantidade de veículos produtores

A taxa de entrega de conteúdo refere-se à efetividade na distribuição de conteúdo aos veículos consumidores, em resposta aos pacotes de interesses transmitidos. A Figura 5.5 apresenta os resultados adquiridos em um cenário com 300 veículos. Como esperado, conforme o número de veículos produtores aumenta na rede, a taxa de entrega de conteúdo também aumenta. Dentre os protocolos avaliados, o PERSEU foi o protocolo que obteve melhor desempenho na entrega de conteúdo aos veículos consumidores, independente da quantidade de veículos produtores.

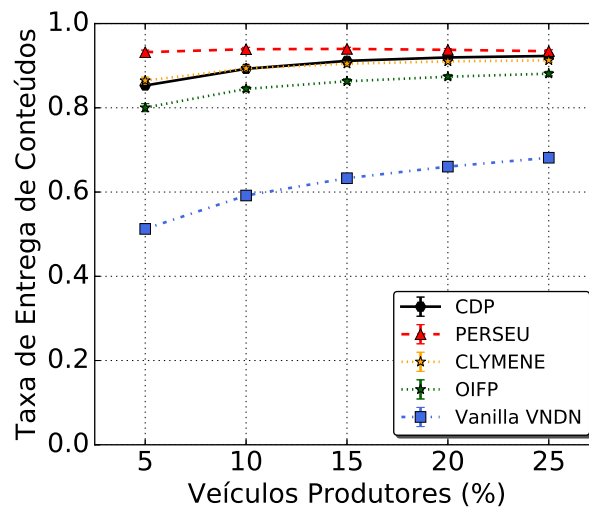


Figura 5.5: Taxa de Entrega de Conteúdos

Em um cenário com 5% de veículos produtores, o PERSEU aumenta a taxa de entrega de conteúdo em 81,8% na média quando comparado com Vanilla VNDN e cerca de 16,4% na média em relação ao OIFP. Quando o número de veículos produtores aumenta na rede (25%), na média, o PERSEU é 37,1% mais eficiente na entrega de conteúdo em relação ao Vanilla VNDN e 6% mais eficiente em comparação ao OIFP. Isso ocorre em virtude da estratégia de descoberta de *cache* modelada no PERSEU, a qual atinge um alto *cache hit* e, consequentemente, alcança um número significativo de veículos que possuem o conteúdo na *cache*.

Assim como PERSEU, o CLYMENE também garante uma boa taxa de entrega de conteúdo em VNDN. De acordo com os resultados, o CLYMENE possui um desempenho superior na entrega de conteúdo em relação ao Vanilla VNDN e OIFP, independente da quantidade de veículos produtores. Em um cenário com apenas 5% de veículos produtores, o CLYMENE é 68,7% e 8% mais eficiente que o Vanilla VNDN e OIFP, respectivamente. Quando a rede possui bastante veículos produtores (25% de provedores de conteúdos), o CLYMENE possui um desempenho superior de 33,9% na entrega de conteúdo em comparação ao Vanilla VNDN e cerca de 3,6% em relação ao OIFP. O motivo pelo qual o CLYMENE possui melhor desempenho na entrega de conteúdo que o Vanilla VNDN e OIFP, se deve à estratégia de descoberta de *cache* implementada, que visa escolher os veículos com maior centralidade de grau (maior número de vizinhos) no processo de descoberta de *cache*.

Semelhante ao CLYMENE, o CDP assegura uma boa taxa de entrega de conteúdo. Avaliando a performance do CDP em um cenário esparsa com 5% de veículos produtores, o CDP apresenta uma melhor eficiência na distribuição de conteúdo quando comparado com Vanilla VNDN e OIFP, aumentando a taxa de satisfação de interesses em 66% em relação ao Vanilla VNDN e 6,5% em comparação com o OIFP. Em um cenário com 25% de veículos produtores, o CDP atinge uma eficiência de 35,4% e 4,7% sobre o Vanilla VNDN e OIFP, respectivamente. Tal eficiência ocorre devido à estratégia de descoberta de *cache* implementada no CDP, que seleciona os veículos melhores posicionados geograficamente para continuar propagando o pacote de interesse pela rede. Com isto, o CDP minimiza o

broadcast storm durante a comunicação entres os veículos, bem como a colisões de pacotes na rede e atraso na entrega de conteúdo.

Investigando o desempenho dos protocolos desenvolvidos na distribuição de conteúdo, de modo geral, os protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU são bem efetivos. Entretanto, conforme os resultados da Figura 5.5, o PERSEU é ligeiramente mais eficiente. Em um cenário com 5% de veículos produtores, o PERSEU é 7,8% e 9,2% mais eficiente que o CLYMENE e CDP, respectivamente. E quando há bastante veículos produtores (25%), o PERSEU é 2,9% e 1,8% mais eficaz quando comparado com o CLYMENE e CDP, na devida ordem. Essa eficiência ocorre por conta do alto *cache hit* no processo de descoberta de *cache*.

Análise dos resultados variando a densidade de veículos

O desempenho dos protocolos no processo de descoberta de *cache* mencionado anteriormente, reflete na taxa de entrega de conteúdos, como observado na Figura 5.6. De acordo com a Figura 5.6, à medida que a densidade de veículos aumenta na rede (de 100 a 300 veículos), a taxa de entrega de conteúdos também aumenta. Entretanto, quando o cenário veicular vai ficando muito denso (de 400 a 600 veículos), a tendência é que os protocolos comecem a degradar seu desempenho na entrega de conteúdo. Isso se dá em virtude da existência de muitos veículos transmitindo pacotes de interesse e dados na rede simultaneamente e, conseqüentemente, resultando em maior colisão de pacotes. De modo geral, os protocolos PERSEU, CLYMENE e CDP obtiveram desempenho superior na entrega de conteúdo, quando comparado com o Vanilla VNDN e OIFP. Como observado na Figura 5.6, no cenário com 300 veículos, o PERSEU assegura quase 100% de garantia na entrega de conteúdo.

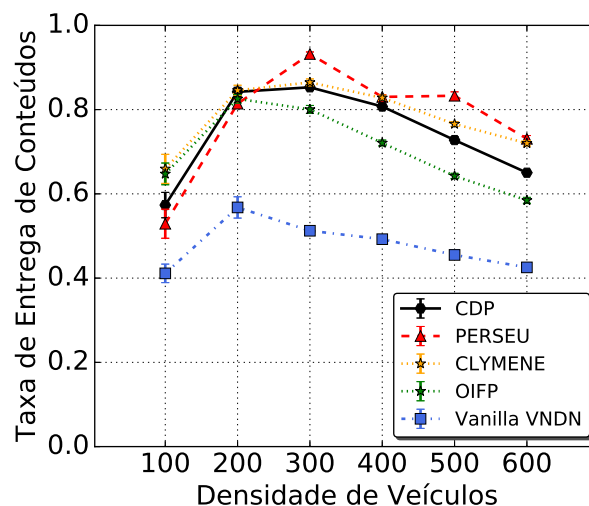


Figura 5.6: Taxa de Entrega de Conteúdos

5.3.3 Transmissão Média de Interesses

Análise dos resultados variando a quantidade de veículos produtores

A figura 5.7 apresenta o número médio de transmissões de pacotes de interesse durante o processo de descoberta de *cache* para recuperar o conteúdo desejado. Como esperado, à medida que o número de veículos produtores aumenta na rede, o número de transmissões de pacotes de interesse diminui na etapa de busca pelo conteúdo. De modo geral, os protocolos desenvolvidos reduzem significativamente o *broadcast storm* por meio das estratégias de encaminhamento de interesse desenvolvidas. Dentre os protocolos avaliados, o CDP foi o protocolo que obteve melhor desempenho em relação ao Vanilla VNDN e OIFP.

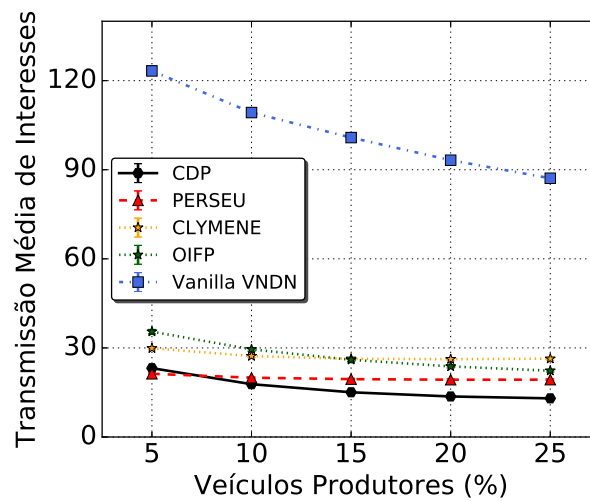


Figura 5.7: Transmissão Média de Interesses

Em um cenário esparsos, quando há 5% de veículos produtores, o CDP reduz significativamente o número de transmissões de pacotes de interesse para recuperar o conteúdo solicitado, transmitindo 82% menos que o Vanilla VNDN, e 35% menos que o OIFP. Quando o cenário contém 25% de veículos produtores, o CDP transmite 85% e 41,7% a menos que o Vanilla VNDN e OIFP, respectivamente. Essa redução é alcançada graças à estratégia de encaminhamento de interesse, que prioriza os veículos melhores posicionados geograficamente para continuar o processo de descoberta de *cache*, utilizando o conceito de *sweet spot*. Com isso, os veículos com menores prioridades cancelam suas transmissões agendadas ao notarem que algum veículo com maior prioridade já transmitiu o pacote de interesse previamente.

Da mesma forma que o CDP, o PERSEU também possui melhor desempenho quando comparado com Vanilla VNDN e OIFP. Em um cenário crítico com 5% de veículos produtores, o PERSEU minimiza a quantidade de transmissões de pacotes de interesse em 82,7% em relação ao Vanilla VNDN e 39,9% em comparação com OIFP. Em um cenário mais favorável com 25% de veículos produtores, o PERSEU reduz o número de transmissões de pacote de interesse em 77,8% e 13,5% em comparação com Vanilla VNDN e OIFP, respectivamente. A razão pela qual ocorre esta redução diz respeito à estratégia de descoberta de *cache* implementada, que aplica o problema de encontrar a envoltória

convexa para selecionar os veículos retransmissores para continuar propagando o pacote de interesse pela rede.

Por último, o CLYMENE também reduz a quantidade de transmissões de pacotes de interesse no processo de descoberta de *cache* na média. Em um cenário esparsos com 5% de veículos produtores, o número de transmissão de pacotes de interesse é reduzido em 75,7% em relação ao Vanilla VNDN e 15,7% em comparação com OIFP. Num cenário denso com 25% de veículos produtores, o CLYMENE diminui a quantidade de transmissões de interesse em 69,7% quando comparado com Vanilla VNDN. Já o OIFP reduz a transmissão de interesse em 15,2% em relação ao CLYMENE em um cenário com 25% de veículos produtores. Isso ocorre porque o cenário contém bastante veículos produtores. Com isto, o OIFP acaba transmitindo menos pacotes de interesse na rede, uma vez que a estratégia adotada pelo OIFP prioriza os veículos receptores mais distantes do veículo emissor.

Entre os protocolos desenvolvidos, o PERSEU obteve melhor desempenho quando o cenário possui poucos veículos produtores (5%), transmitindo 8,2% e 28,7% menos pacotes de interesse que o CDP e CLYMENE, respectivamente. Entretanto, quando o cenário possui bastante veículos produtores (25%), o CDP possui melhor desempenho, transmitindo 32,6% e 50,6% menos pacotes de interesse em comparação com o PERSEU e CLYMENE, respectivamente.

Análise dos resultados variando a densidade de veículos

A Figura 5.8 apresenta a transmissão média de pacotes de interesse, fixando a quantidade de veículos produtores em 5% (cenário crítico) e variando a densidade veicular de 100 a 600 veículos. O objetivo dessa variação é analisar o comportamento dos protocolos quando o cenário veicular vai ficando congestionado e com pouca quantidade de veículos produtores. Como pode ser observado na Figura 5.8, conforme a densidade de veículos aumenta, o número de transmissões também aumenta. Mas na média esse aumento sofre uma pequena variação a partir de 300 veículos, principalmente para os protocolos CDP, PERSEU e OIFP. De modo geral, o protocolo PERSEU transmite menos pacotes de interesse que os demais protocolos. Isso ocorre por conta da estratégia de descoberta de *cache* adotada pelo PERSEU, que utiliza o conceito de geometria computacional, aplicando o problema de encontrar a envoltória convexa para escolher os veículos retransmissores. Desse modo, somente os veículos que formam o polígono mínimo convexo continuarão propagando o pacote de interesse pela rede.

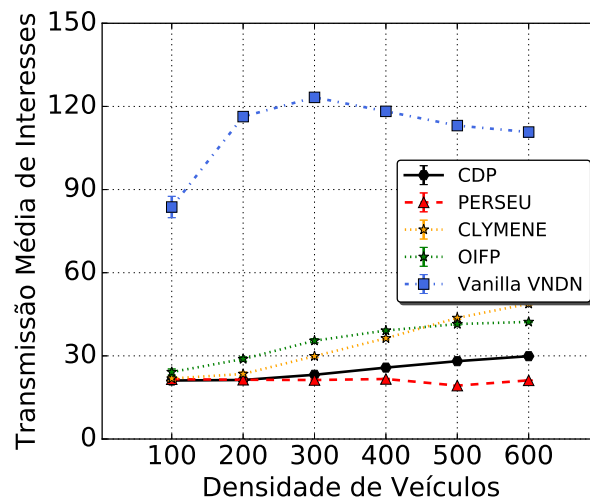


Figura 5.8: Transmissão Média de Interesses

5.3.4 Atraso Médio

Análise dos resultados variando a quantidade de veículos produtores

A figura 5.9 exibe o atraso médio para recuperar todo o conteúdo, que é o tempo decorrente entre o primeiro pacote de interesse enviado até o recebimento do último *chunk* do pacote de dados. Como esperado, à medida que o número de veículos produtores aumenta na rede, o tempo para receber o conteúdo diminui. Isso ocorre porque o conteúdo tende a ficar mais próximo dos veículos consumidores. Além disso, cabe ressaltar que a redução das transmissões de pacotes de interesse (Figura 5.7) também reduz a incidência de colisão no canal de comunicação e, conseqüentemente, diminui o atraso. De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.9, observa-se que o CDP foi o protocolo que obteve melhor desempenho para recuperar o conteúdo.

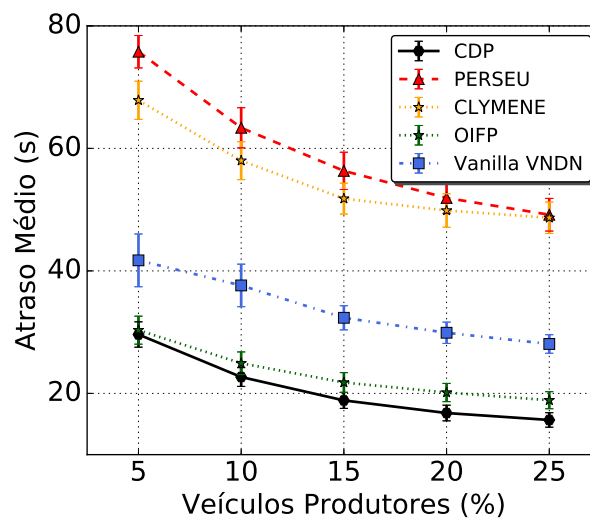


Figura 5.9: Atraso Médio

Analisando a performance do CDP em um cenário esparsos com apenas 5% de veículos

produtores, o CDP é 29% mais eficiente que o Vanilla VNDN e cerca de 2,3% mais rápido que o OIFP. Analisando o desempenho do CDP em um cenário com 25% de veículos produtores, o CDP é 44,2% e 12,7% mais rápido para obter todos os *chunks* do conteúdo solicitado em comparação com o Vanilla VNDN e OIFP, respectivamente. Tal eficiência é alcançada devido à estratégia de descoberta de *cache* implementada no CDP, que é capaz de selecionar os melhores veículos posicionados geograficamente para continuar encaminhando o interesse pela rede. Por conta disso, a colisão de pacotes na rede diminui consideravelmente, garantindo menor atraso na recuperação do conteúdo.

Ainda analisando os resultados exibidos na Figura 5.9, os protocolos PERSEU e CLYMENE possuem maior atraso na recuperação de conteúdo quando comparados com Vanilla e OIFP. O motivo pelo qual o PERSEU e CLYMENE possuem maior atraso diz respeito à eficiência de tais protocolos no processo de descoberta de *cache*. Pois como observado na Figura 5.3, o PERSEU e CLYMENE possuem as maiores taxas de *cache hit* e, consequentemente, alcançam um maior número de veículos produtores. Logo, quando os veículos produtores transmitem os pacotes de dados em resposta aos pacotes de interesse recebidos, acaba gerando colisões de pacotes e portanto acarretando em maior atraso. Embora o Vanilla VNDN e OIFP possuem menor atraso, eles não garantem uma boa taxa de entrega de conteúdo aos veículos consumidores. Visto que a garantia de entrega de conteúdo nas VANETs é considerada um dos grandes desafios na comunicação V2V, por conta das características intrínsecas das VANETs referentes à topologia altamente dinâmica e conectividade intermitente, decorrentes da alta mobilidade veicular.

Analisando os protocolos desenvolvidos, o CDP obteve o menor atraso na recuperação de conteúdo, independente da variação da quantidade de veículos produtores. Em um cenário com 5% de veículos produtores, o CDP é 60,9% e 56,2% mais rápido para recuperar o conteúdo em relação ao PERSEU e CLYMENE, respectivamente. Quando o cenário contém bastante veículos produtores (25%), o CDP é 68,1% mais rápido que o PERSEU e 67,8% mais rápido em relação ao CLYMENE. O CDP possui menor atraso que o PERSEU e CLYMENE devido à estratégia de descoberta de *cache* não necessitar de trocas de *beacons*. Enquanto que o PERSEU e CLYMENE necessitam da troca de *beacons* para obter o conhecimento da sua vizinhança de um salto no processo de descoberta de *cache*. Por conta da necessidade de troca de *beacons* periodicamente, os protocolos PERSEU e CLYMENE acabam gerando maior colisão de pacotes e, consequentemente, maior atraso na recuperação do conteúdo.

Análise dos resultados variando a densidade de veículos

A Figura 5.10 exibe o atraso médio na entrega de conteúdo, variando a densidade de veículos em um cenário crítico com apenas 5% de veículos produtores. Como esperado, à medida que a densidade de veículos aumenta na rede, o atraso na entrega de conteúdo também aumenta na média. Isso ocorre por conta da colisão de pacotes em função das múltiplas transmissões de pacotes de interesse e dados ocorridos durante a comunicação entre veículos. De acordo com a Figura 5.10, quando o cenário vai ficando congestionado (de 400 a 600 veículos) o Vanilla VNDN possui maior atraso. A razão pela qual isso acontece é porque o Vanilla VNDN não possui uma estratégia eficiente para controlar o

broadcast storm durante o processo de descoberta de *cache*, que é um dos grandes desafios da integração da arquitetura NDN nas VANETS.

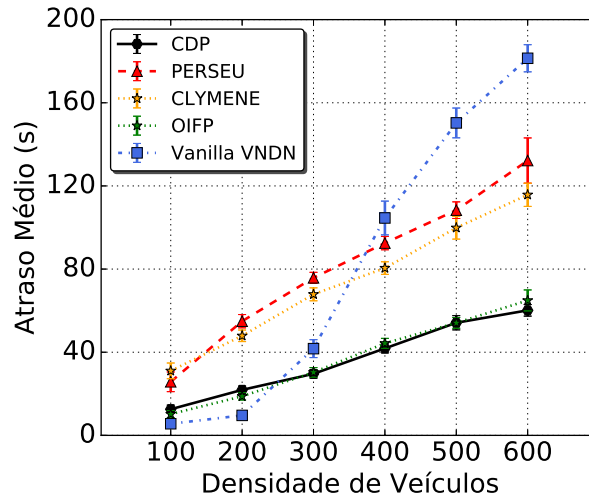


Figura 5.10: Atraso Médio

5.3.5 Colisão Média de Pacotes

Análise dos resultados variando a quantidade de veículos produtores

A Figura 5.11 apresenta a colisão média de pacotes na camada MAC durante a comunicação entre veículos. Essa métrica é essencial para observar como os protocolos se comportam com a natureza distribuída no processo de descoberta de *cache* em VNDN. Colisão de pacotes ocorre quando dois ou mais veículos transmitem pacotes de interesse e dados simultaneamente. Isso acaba desperdiçando os recursos da rede e degradando o desempenho das aplicações em VNDN, gerando perdas de pacotes e atrasos na recuperação do conteúdo.

Como sugerem os resultados, o Vanilla VNDN é o protocolo com o maior número de colisões de pacotes. Isso é resultante da não coordenação entre os veículos no período de descoberta de *cache*. Dentre os protocolos implementados, o CDP foi o protocolo que obteve menor colisão de pacotes em um cenário com 300 veículos. Conforme os resultados de simulação, em um cenário esparsos com 5% de veículos produtores, o CDP possui em média 66,9% e 26,7% menos colisão de pacotes que o Vanilla VNDN e OIFP, respectivamente. Quando o cenário vai ficando mais denso (25% de veículos produtores), o protocolo CDP mantém melhor desempenho, possuindo em média 71% menos colisão que o Vanilla VNDN e 31,9% menos colisão em comparação com o OIFP. O CDP possui melhor desempenho por conta da estratégia de descoberta de *cache*, que seleciona os veículos melhores posicionados geograficamente para continuar a busca pelo conteúdo. Com isso, os veículos dentro do *sweet spot* têm maior prioridade de transmissão, enquanto aqueles veículos fora do *sweet spot* cancelam suas transmissões agendadas ao notarem que algum veículo com maior prioridade já transmitiu o pacote de interesse previamente.

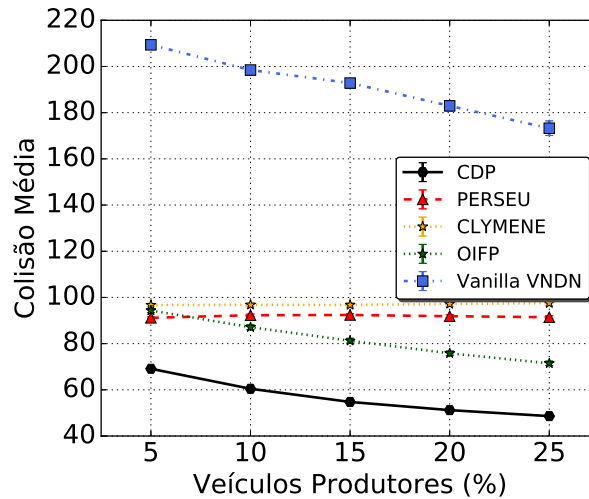


Figura 5.11: Colisão Média de Pacotes

Os protocolos PERSEU e CLYMENE possuem menor colisão em comparação com o Vanilla VNDN, independente da variação dos nós produtores. O PERSEU em um cenário com 5% de veículos produtores, possui 56,4% menos colisão que o Vanilla VNDN. E quando o cenário possui 25% de veículos produtores, o PERSEU apresenta 47,2% menos colisão. Enquanto o CLYMENE possui 53,8% menos colisão que o Vanilla VNDN em um cenário com 5% de veículos produtores, e 43,7% menos colisão num cenário denso com 25% de veículos produtores.

Do mesmo modo que o CDP, os protocolos PERSEU e CLYMENE atingem um melhor desempenho que o Vanilla VNDN por conta das estratégias de encaminhamento de interesse implementadas. Visto que os veículos retransmissores no PERSEU são escolhidos aplicando o problema de determinar a envoltória convexa, problema este que é bastante utilizado para resolver problemas de geometria computacional, como por exemplo, problemas relacionados à cobertura. Enquanto o CLYMENE escolhe os veículos retransmissores com base na centralidade de grau de cada veículo receptor. Com isso, o CLYMENE prioriza os veículos que possuem maior número de vizinhos para continuar a busca pelo conteúdo. Enquanto os veículos com menor centralidade de grau cancelam suas transmissões agendadas quando percebem que algum veículo com maior prioridade já transmitiu o interesse previamente.

Investigando os resultados da Figura 5.11 em relação aos protocolos desenvolvidos, o CDP obteve menor colisão de pacotes que o PERSEU e CLYMENE, independente da variação do número de veículos produtores. Quando o cenário possui apenas 5% de veículos produtores, o CDP possui 24,2% menos colisão em comparação com o PERSEU e 28,5% em relação ao CLYMENE. E num cenário com 25% de veículos produtores, o CDP reduz a colisão de pacote em 46,8% e 50,1% em comparação com o PERSEU e CLYMENE, respectivamente. O CDP gera menos colisão de pacotes que o PERSEU e CLYMENE por conta da estratégia de descoberta de *cache* adotada. Visto que o CDP não necessita do conhecimento de sua vizinhança de um salto para selecionar os veículos retransmissores. Enquanto que os protocolos PERSEU e CLYMENE necessitam da troca de *beacons* periodicamente para obter o conhecimento de suas vizinhanças de um salto.

Consequentemente, os protocolos PERSEU e CLYMENE transmitem mais mensagens na rede e, por isto, acabam gerando mais colisão de pacotes e atraso na recuperação de conteúdo.

Análise dos resultados variando a densidade de veículos

A Figura 5.12 apresenta a colisão média de pacotes à medida que o número de veículos aumenta na rede. Como esperado, conforme o número de veículos aumenta na rede, a colisão de pacotes também aumenta na média. Isso ocorre porque a quantidade de mensagens trocadas entre os veículos aumenta. Como pode ser notado na Figura 5.12, na média, esse aumento da colisão sofre uma pequena variação nos protocolos CDP, PERSEU e OIFP a partir de 300 veículos. Dessa forma, cabe ressaltar a importância de desenvolver protocolos eficientes para comunicação V2V em VNDN. Uma vez que o *broadcast storm* durante a comunicação entre veículos e a garantia de entrega de conteúdo são grandes desafios na comunicação V2V. Justamente por conta da alta dinamicidade topológica da rede e conectividade intermitente, decorrentes da alta mobilidade dos veículos.

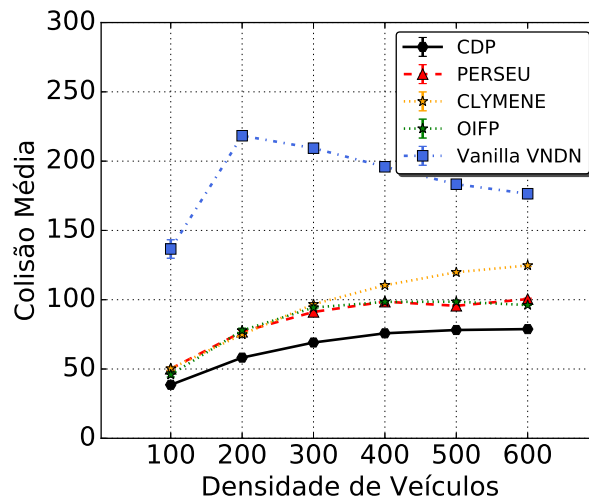


Figura 5.12: Colisões Média de Pacotes

5.4 Aplicabilidade dos Protocolos Desenvolvidos

De modo geral, os protocolos desenvolvidos têm por objetivo reduzir o problema do *broadcast storm* durante a comunicação V2V em VNDN, no processo de descoberta de *cache* e garantir uma boa taxa de entrega de conteúdo. Como mencionado nos capítulos anteriores, o *broadcast storm* é um problema crítico em redes sem fio, principalmente nas VANETs por conta de suas características intrínsecas como topologia altamente dinâmica e conectividade intermitente, resultantes da alta mobilidade dos veículos.

De acordo com os resultados obtidos nas simulações, pode-se notar que o PERSEU foi o protocolo que obteve maior *cache hit* e taxa de entrega de conteúdo, porém, com maior atraso e colisão de pacotes para recuperar o conteúdo em relação ao CDP. O motivo pelo qual o PERSEU possui maior colisão de pacotes e atraso que o CDP é por conta

da necessidade de obter o conhecimento de sua vizinhança de um salto para selecionar os veículos retransmissores. Dessa forma, recomenda-se usar o PERSEU quando o cenário veicular contém poucos nós produtores e para aplicações tolerantes ao atraso. Entretanto, quando o cenário veicular está demasiadamente congestionado, com bastante veículos na rede e tráfego de mensagens, recomenda-se usar o protocolo CDP. Visto que o CDP também assegura uma boa taxa de entrega de conteúdo, com menor atraso e colisão de pacotes quando comparado com o PERSEU e CLYMENE. Além disso, o CDP não necessita de trocas de *beacons* periodicamente no processo de descoberta de *cache*. E quando as aplicações são sensíveis ao atraso, também sugere-se a utilização do protocolo CDP.

5.5 Resumo Conclusivo

Neste capítulo, foram apresentados os resultados das simulações dos protocolos desenvolvidos. Inicialmente foi apresentado o cenário urbano escolhido, os parâmetros de simulação e as métricas escolhidas para avaliar o desempenho dos protocolos. Posteriormente, foi feita uma análise de desempenho dos protocolos desenvolvidos em relação aos protocolos Vanilla VNDN e OIFP, bem como a aplicabilidade dos protocolos desenvolvidos.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

A comunicação V2V nas VANETS é uma tarefa desafiadora por conta da alta dinamicidade topológica da rede e conectividade intermitente. Com o intuito de garantir uma distribuição eficiente de conteúdo em larga escala nas VANETs, nesta dissertação foi utilizada a arquitetura VNDN. Em VNDN, a comunicação é centrada no conteúdo ao invés do endereçamento IP do *host* que contém o conteúdo. Além disso, outras características fundamentais da arquitetura VNDN é o armazenamento de conteúdo na rede e o suporte à mobilidade. Com isso, a recuperação de conteúdo em VNDN se torna mais eficiente por meio de múltiplos provedores de conteúdo. Entretanto, a integração da arquitetura NDN nas VANETs gera o problema do *broadcast storm* na comunicação entre veículos durante o processo de descoberta de *cache*. Visando minimizar o *broadcast storm* e garantir uma boa taxa de entrega de conteúdo em VNDN, esta dissertação propõe um conjunto de três protocolos (CDP, CLYMENE e PERSEU), que é uma evolução de cada protocolo em relação ao anterior.

A estratégia de descoberta de *cache* do protocolo CDP fundamenta-se nos veículos melhores posicionados geograficamente (*sweet spot*). Com isso, os veículos melhores posicionados têm maior prioridade para retransmitir o pacote de interesse, por meio de temporizadores, enquanto os veículos com menor prioridade cancelam suas transmissões agendadas ao notarem que algum veículo com maior prioridade já transmitiu o pacote de interesse previamente. Enquanto o protocolo CLYMENE prioriza os veículos mais distantes do veículo emissor e com maior centralidade de grau para continuar o processo de descoberta de *cache*. Visto que os veículos com maior número de vizinhos têm maior probabilidade de encontrar veículos produtores na rede. E por fim, o protocolo PERSEU foi modelado utilizando conceito de geometria computacional para escolher os veículos retransmissores dinamicamente, aplicando o problema de determinar a envoltória convexa em um dado conjunto de pontos. Desse modo, os veículos que formam o polígono mínimo convexo continuam o processo de descoberta de *cache*, enquanto os veículos que não pertencem ao polígono mínimo convexo descartam o pacote de interesse recebido.

Os protocolos propostos foram avaliados por meio de simulações computacionais e comparados com os protocolos Vanilla VNDN e OIFP, variando a quantidade de veículos produtores, bem como a densidade de veículos, para investigar o comportamento dos protocolos desde um cenário esparsa até um cenário denso. Para medir o desempenho dos protocolos, foram escolhidas as seguintes métricas: (i) *cache hit*; (ii) taxa de entrega

de conteúdo; (iii) transmissão média de pacotes de interesse; (iv) atraso médio para recuperação do conteúdo e (v) colisão média de pacotes. De acordo com os resultados das simulações, os protocolos CDP, CLYMENE e PERSEU obtiveram melhor desempenho que o Vanilla VNDN e OIFP nas métricas de *cache hit* e entrega de conteúdo, que são um dos grandes desafios da comunicação V2V. Dentre os protocolos desenvolvidos, O PERSEU obteve melhor desempenho no processo de descoberta de *cache* e entrega de conteúdo. Em relação à quantidade média de transmissão de pacotes de interesse, o CDP, PERSEU e CLYMENE transmitem menos que os protocolos Vanilla VNDN e OIFP, gerando menor colisão de pacotes que, por sua vez, é um dos grandes desafios da comunicação V2V em VNDN.

Os trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos partindo desta pesquisa incluem:

- Desenvolver protocolos com estratégias eficientes para encaminhamento de pacotes de dados, com intuito de diminuir ainda mais colisões de pacotes, mantendo uma boa taxa de entrega de conteúdo;
- Implementar políticas de *cache*, por exemplo, políticas de substituição de conteúdos que levem em consideração a popularidade e a localização do conteúdo e avaliar novas métricas;
- Empregar outros meios de comunicação em VNDN, partindo para a comunicação V2X. Uma vez que a arquitetura NDN permite o encaminhamento de conteúdo por múltiplas interfaces.

Referências Bibliográficas

- [1] A. Afanasyev, J. Burke, T. Refaei, L. Wang, B. Zhang, and L. Zhang. A brief introduction to named data networking. In *MILCOM 2018 - 2018 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pages 1–6, 2018.
- [2] K. J. Ahmed and M. J. Lee. Secure lte-based v2x service. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5):3724–3732, 2018.
- [3] S. H. Ahmed, S. H. Bouk, M. A. Yaqub, D. Kim, H. Song, and J. Lloret. Codie: Controlled data and interest evaluation in vehicular named data networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6):3954–3963, 2016.
- [4] H. Al-Omaisi, E. A. Sundararajan, and N. F. Abdullah. Towards vanet-ndn: A framework for an efficient data dissemination design scheme. In *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, pages 412–417, 2019.
- [5] Saif Al-Sultan, Moath M. Al-Doori, Ali H. Al-Bayatti, and Hussien Zedan. A comprehensive survey on vehicular ad hoc network. *Journal of Network and Computer Applications*, 37:380 – 392, 2014.
- [6] N. Aloulou, M. Ayari, M. F. Zhani, L. Saidane, and G. Pujolle. Taxonomy and comparative study of ndn forwarding strategies. In *2017 Sixth International Conference on Communications and Networking (ComNet)*, pages 1–8, 2017.
- [7] M. Alowish, Y. Shiraishi, Y. Takano, M. Mohri, and M. Morii. Stabilized clustering enabled v2v communication in an ndn-sdvn environment for content retrieval. *IEEE Access*, 8:135138–135151, 2020.
- [8] M. Amadeo, C. Campolo, and A. Molinaro. Information-centric networking for connected vehicles: a survey and future perspectives. *IEEE Communications Magazine*, 54(2):98–104, February 2016.
- [9] A. Arsalan and R. A. Rehman. Distance-based scheme for broadcast storm mitigation in named software defined vehicular networks (nsdvn). In *2019 16th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, pages 1–4, 2019.
- [10] A. Awang, K. Husain, N. Kamel, and S. Aïssa. Routing in vehicular ad-hoc networks: A survey on single- and cross-layer design techniques, and perspectives. *IEEE Access*, 5:9497–9517, 2017.

- [11] Alessandro Bazzi, Claudia Campolo, Barbara M. Masini, and Antonella Molinaro. How to deal with data hungry v2x applications? In *Proceedings of the Twenty-First International Symposium on Theory, Algorithmic Foundations, and Protocol Design for Mobile Networks and Mobile Computing*, Mobihoc '20, page 333–338, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [12] Michael Behrisch, Laura Bieker, Jakob Erdmann, and Daniel Krajzewicz. SUMO – Simulation of Urban MObility: An Overview. In *International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL '11)*, pages 63–68, 2011.
- [13] S. H. Bouk, S. H. Ahmed, K. Park, and Y. Eun. Efficient data broadcast mitigation in multisource named-content discovery for vehicular cps. *IEEE Communications Letters*, 23(9):1644–1647, 2019.
- [14] A. Boukerche, R. W. L. Coutinho, and X. Yu. Lisic: A link stability-based protocol for vehicular information-centric networks. In *2017 IEEE 14th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*, pages 233–240, 2017.
- [15] A. Boukerche, C. Rezende, and R. W. Pazzi. Improving neighbor localization in vehicular ad hoc networks to avoid overhead from periodic messages. In *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 1–6, 2009.
- [16] Azzedine Boukerche and Rodolfo W.L. Coutinho. Loicen: A novel location-based and information-centric architecture for content distribution in vehicular networks. *Ad Hoc Networks*, 93:101899, 2019.
- [17] M. Burhan and R. A. Rehman. Bsms: A reliable interest forwarding protocol for ndn based vanets. In *2020 3rd International Conference on Advancements in Computational Sciences (ICACS)*, pages 1–6, 2020.
- [18] T. Chatterjee, S. Ruj, and S. D. Bit. Security issues in named data networks. *Computer*, 51(1):66–75, 2018.
- [19] C. Chen, C. Wang, T. Qiu, M. Atiquzzaman, and D. O. Wu. Caching in vehicular named data networking: Architecture, schemes and future directions. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, pages 1–1, 2020.
- [20] S. Chen, J. Hu, Y. Shi, Y. Peng, J. Fang, R. Zhao, and L. Zhao. Vehicle-to-everything (v2x) services supported by lte-based systems and 5g. *IEEE Communications Standards Magazine*, 1(2):70–76, 2017.
- [21] R. W. L. Coutinho, A. Boukerche, and A. A. F. Loureiro. Design guidelines for information-centric connected and autonomous vehicles. *IEEE Communications Magazine*, pages 85–91, 2018.
- [22] R. W. L. Coutinho, A. Boukerche, and X. Yu. A novel location-based content distribution protocol for vehicular named-data networks. In *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 01007–01012, 2018.

- [23] Rodolfo W. L. Coutinho, Azzedine Boukerche, and Xiangshen Yu. Information-centric strategies for content delivery in intelligent vehicular networks. In *Proceedings of the 8th ACM Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications*, DIVANet'18, pages 21–26, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [24] Felipe Cunha, Guilherme Maia, Clayson Celes, Daniel Guidoni, Fernanda de Souza, Heitor Ramos, and Leandro A. Villas. Sistemas de transporte inteligentes: Conceitos, aplicações desafios. In *SBRC 2017 - Minicursos*, 2017.
- [25] Felipe Cunha, Leandro Villas, Azzedine Boukerche, Guilherme Maia, Aline Viana, Raquel A.F. Mini, and Antonio A.F. Loureiro. Data communication in vanets: Protocols, applications and challenges. *Ad Hoc Networks*, 44:90 – 103, 2016.
- [26] A. M. de Sousa, F. R. C. Araújo, and L. N. Sampaio. A link-stability-based interest-forwarding strategy for vehicular named data networks. *IEEE Internet Computing*, 22(3):16–26, 2018.
- [27] Joao M. Duarte, Torsten Braun, and Leandro A. Villas. Mobivndn: A distributed framework to support mobility in vehicular named-data networking. *Ad Hoc Networks*, 82:77 – 90, 2019.
- [28] C. Fang, H. Yao, Z. Wang, W. Wu, X. Jin, and F. R. Yu. A survey of mobile information-centric networking: Research issues and challenges. *Communications Surveys Tutorials*, 20, thirdquarter 2018.
- [29] Ronald L. Graham. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set. *Info. Pro. Lett.*, 1:132–133, 1972.
- [30] G. Grassi, D. Pesavento, G. Pau, R. Vuyyuru, R. Wakikawa, and L. Zhang. Vanet via named data networking. In *2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pages 410–415, 2014.
- [31] D. Grewe, M. Wagner, and H. Frey. A domain-specific comparison of information-centric networking architectures for connected vehicles. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 20(3):2372–2388, 2018.
- [32] D. L. Guidoni, G. Maia, F. S. H. Souza, L. A. Villas, and A. A. F. Loureiro. Vehicular traffic management based on traffic engineering for vehicular ad hoc networks. *IEEE Access*, 8:45167–45183, 2020.
- [33] H. Hu, B. Tang, Y. Zhang, and W. Wang. Vehicular ad hoc network representation learning for recommendations in internet of things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(4):2583–2591, 2020.
- [34] W. Huang, T. Song, Y. Yang, and Y. Zhang. Cluster-based cooperative caching with mobility prediction in vehicular named data networking. *IEEE Access*, 7:23442–23458, 2019.

- [35] Van Jacobson, Diana K Smetters, James D Thornton, Michael F Plass, Nicholas H Briggs, and Rebecca L Braynard. Networking named content. In *Proceedings of the 5th international conference on Emerging networking experiments and technologies*, pages 1–12, 2009.
- [36] G. Karagiannis, O. Altintas, E. Ekici, G. Heijenk, B. Jarupan, K. Lin, and T. Weil. Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 13(4):584–616, 2011.
- [37] H. Khelifi, S. Luo, B. Nour, and H. Moun gla. A name-to-hash encoding scheme for vehicular named data networks. In *2019 15th International Wireless Communications Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pages 603–608, 2019.
- [38] H. Khelifi, S. Luo, B. Nour, and H. Moun gla. A qos-aware cache replacement policy for vehicular named data networks. In *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6, 2019.
- [39] H. Khelifi, S. Luo, B. Nour, H. Moun gla, Y. Faheem, R. Hussain, and A. Ksentini. Named data networking in vehicular ad hoc networks: State-of-the-art and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 22(1):320–351, 2020.
- [40] M. Kuai, X. Hong, and Q. Yu. Density-aware delay-tolerant interest forwarding in vehicular named data networking. In *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pages 1–5, 2016.
- [41] N. Kumar, R. Chaudhry, O. Kaiwartya, N. Kumar, and S. H. Ahmed. Green computing in software defined social internet of vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pages 1–10, 2020.
- [42] D. Li, T. Song, and Y. Yang. Content retrieval based on prediction and network coding in vehicular named data networking. *IEEE Access*, 8:125576–125591, 2020.
- [43] Yuhong Li, Xinyue Shi, Anders Lindgren, Zhuo Hu, Peng Zhang, Di Jin, and Yingchao Zhou. Context-aware data dissemination for icn-based vehicular ad hoc networks. *Information*, 9(11):263, 2018.
- [44] B. Lin, X. Zhou, and J. Duan. Dimensioning and layout planning of 5g-based vehicular edge computing networks towards intelligent transportation. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 1:146–155, 2020.
- [45] X. Liu, Q. Bing, X. Lu, L. Zhong, D. Wei, and G. Qu. An identity privacy protection strategy in vehicle named data network. In *2019 IEEE International Conferences on Ubiquitous Computing Communications (IUCC) and Data Science and Computational Intelligence (DSCI) and Smart Computing, Networking and Services (SmartCNS)*, pages 818–822, 2019.

- [46] L. H. S. Lopes, R. A. F. Mini, and F. Cunha. A v2x approach for data dissemination in vehicular ad hoc networks. In *2019 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 1–6, 2019.
- [47] G. Maia, L. A. Villas, A. Boukerche, A. C. Viana, A. L. L. Aquino, and A. A. F. Loureiro. Data dissemination in urban vehicular ad hoc networks with diverse traffic conditions. In *2013 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 000459–000464, 2013.
- [48] G. Manisha, S. G. S. R. Emil, and M. P. Ramkumar. Interest forwarding strategies in vehicular named data networks. In *2019 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, pages 053–057, 2019.
- [49] Giuseppe Martuscelli, Azzedine Boukerche, Luca Foschini, and Paolo Bellavista. V2v protocols for traffic congestion discovery along routes of interest in vanets: a quantitative study. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 16(17):2907–2923, 2016.
- [50] Mohamed Nidhal Mejri, Jalel Ben-Othman, and Mohamed Hamdi. Survey on vanet security challenges and possible cryptographic solutions. *Vehicular Communications*, 1(2):53 – 66, 2014.
- [51] Boubakr Nour, Kashif Sharif, Fan Li, Hakima Khelifi, and Hassine Moun gla. Nncp: A named data network control protocol for iot applications. In *2018 IEEE CSCN*, pages 1–6, 2018.
- [52] Renê Oliveira, Carlos Montez, Azzedine Boukerche, and Michelle S. Wingham. Reliable data dissemination protocol for vanet traffic safety applications. *Ad Hoc Networks*, 63:30 – 44, 2017.
- [53] S. Ostrovskaya, O. Surnin, R. Hussain, S. H. Bouk, J. Lee, N. Mehran, S. H. Ahmed, and A. Benslimane. Towards multi-metric cache replacement policies in vehicular named data networks. In *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1–7, 2018.
- [54] Richard W.N. Pazzi and Azzedine Boukerche. Mobile data collector strategy for delay-sensitive applications over wireless sensor networks. *Computer Communications*, 31(5):1028 – 1039, 2008. Mobility Management and Wireless Access.
- [55] C. Rezende, A. Boukerche, H. S. Ramos, and A. A. F. Loureiro. A reactive and scalable unicast solution for video streaming over vanets. *IEEE Transactions on Computers*, 64(3):614–626, 2015.
- [56] L. B. Rondon, J. B. D. da Costa, G. P. R. Filho, D. Rosário, and L. A. Villas. Degree centrality-based caching discovery protocol for vehicular named-data networks. In *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, pages 1–5, 2020.

- [57] Lucas Rondon, Lucas Maziero, Geraldo Rocha Filho, Augusto Venâncio Neto, Maycon Maciel Peixoto, and Leandro Villas. Protocolo baseado em geometria computacional para descoberta de cache em redes veiculares de dados nomeados. In *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 980–993, Porto Alegre, RS, Brasil, 2020. SBC.
- [58] Lucas B Rondon, Joahannes B D da Costa, Geraldo P Rocha Filho, and Leandro A Villas. A distance and position-based caching discovery protocol for vehicular named-data networks. In *2019 IEEE 11th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [59] Lucas B. Rondon, Lucas P. Maziero, Geraldo P. Rocha Filho, Augusto V. Neto, Maycon M. L. Peixoto, and Leandro A. Villas. Protocolo baseado em geometria computacional para descoberta de cache em redes veiculares de dados nomeados. 5 2020.
- [60] Ahmed I. Saleh, Samah A. Gamel, and Khaled M. Abo-Al-Ez. A reliable routing protocol for vehicular ad hoc networks. *Computers Electrical Engineering*, 64:473 – 495, 2017.
- [61] M. U. Sattar and R. A. Rehman. Interest flooding attack mitigation in named data networking based vanets. In *2019 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)*, pages 245–2454, 2019.
- [62] Divya Saxena, Vaskar Raychoudhury, Neeraj Suri, Christian Becker, and Jiannong Cao. Named data networking: A survey. *Computer Science Review*, 19:15 – 55, 2016.
- [63] H. Seo, K. Lee, S. Yasukawa, Y. Peng, and P. Sartori. Lte evolution for vehicle-to-everything services. *IEEE Communications Magazine*, 54(6):22–28, 2016.
- [64] S. A. A. Shah, E. Ahmed, M. Imran, and S. Zeadally. 5g for vehicular communications. *IEEE Communications Magazine*, 56(1):111–117, 2018.
- [65] S. S. Shah, A. W. Malik, A. U. Rahman, S. Iqbal, and S. U. Khan. Time barrier-based emergency message dissemination in vehicular ad-hoc networks. *IEEE Access*, 7:16494–16503, 2019.
- [66] W. ShangGuan, B. Shi, B. Cai, J. Wang, and Yu Zang. Multiple v2v communication mode competition method in cooperative vehicle infrastructure system. In *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 1200–1205, 2016.
- [67] Fabrício A. Silva, Azzedine Boukerche, Thais R. M. Braga Silva, Linnyer B. Ruiz, Eduardo Cerqueira, and Antonio A. F. Loureiro. Vehicular networks: A new challenge for content-delivery-based applications. *ACM Comput. Surv.*, 49(1), June 2016.
- [68] H. Soleimani and A. Boukerche. A comparative study of possible solutions for transmission of vehicular safety messages in lte-based networks. In *2017 IEEE 28th Annual*

International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), pages 1–5, 2017.

- [69] Hossein Soleimani and Azzedine Boukerche. Sla: Speed and location aware lte scheduler for vehicular safety applications. pages 13–19, 11 2015.
- [70] M. M. S. Soniya and K. Kumar. A survey on named data networking. In *2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS)*, pages 1515–1519, 2015.
- [71] S. Sun, J. Hu, Y. Peng, X. Pan, L. Zhao, and J. Fang. Support for vehicle-to-everything services based on lte. *IEEE Wireless Communications*, 23(3):4–8, 2016.
- [72] A. Tariq, R. A. Rehman, and B. Kim. Forwarding strategies in ndn-based wireless networks: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 22(1):68–95, 2020.
- [73] E. Uhlemann. Initial steps toward a cellular vehicle-to-everything standard [connected vehicles]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12(1):14–19, 2017.
- [74] Hamed Vahdat-Nejad, Azam Ramazani, Tahereh Mohammadi, and Wathiq Mansoor. A survey on context-aware vehicular network applications. *Vehicular Communications*, 3:43 – 57, 2016.
- [75] András Varga. Discrete event simulation system. In *Proc. of the European Simulation Multiconference (ESM'2001)*, pages 1–7, 2001.
- [76] Leandro Aparecido Villas, Azzedine Boukerche, Guilherme Maia, Richard Werner Pazzi, and Antonio A.F. Loureiro. Drive: An efficient and robust data dissemination protocol for highway and urban vehicular ad hoc networks. *Computer Networks*, 75:381 – 394, 2014.
- [77] Leandro Aparecido Villas, Azzedine Boukerche, Guilherme Maia, Richard Werner Pazzi, and Antonio AF Loureiro. Drive: An efficient and robust data dissemination protocol for highway and urban vehicular ad hoc networks. *Computer Networks*, 75:381–394, 2014.
- [78] Y. Wang, H. Liu, L. Huang, and J. Stankovic. Efficient and proactive v2v information diffusion using named data networking. In *2016 IEEE/ACM 24th IWQoS*, pages 1–10, June 2016.
- [79] G. Xylomenos, C. N. Ververidis, V. A. Siris, N. Fotiou, C. Tsilopoulos, X. Vasilakos, K. V. Katsaros, and G. C. Polyzos. A survey of information-centric networking research. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 16(2):1024–1049, 2014.
- [80] Gongjun Yan and Danda B. Rawat. Vehicle-to-vehicle connectivity analysis for vehicular ad-hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 58:25 – 35, 2017. Hybrid Wireless Ad Hoc Networks.

- [81] L. V. Yovita, N. R. Syambas, and I. Y. Matheus Edward. Capic: Cache based on popularity and class in named data network. In *2018 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*, pages 24–29, 2018.
- [82] X. Yu, R. W. L. Coutinho, A. Boukerche, and A. A. F. Loureiro. A distance-based interest forwarding protocol for vehicular information-centric networks. In *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1–5, 2017.
- [83] F. Zeng, R. Zhang, X. Cheng, and L. Yang. Channel prediction based scheduling for data dissemination in vanets. *IEEE Communications Letters*, 21(6):1409–1412, 2017.
- [84] Lixia Zhang, Alexander Afanasyev, Jeffrey Burke, Van Jacobson, KC Claffy, Patrick Crowley, Christos Papadopoulos, Lan Wang, and Beichuan Zhang. Named data networking. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 44(3):66–73, 2014.
- [85] Tao Zhang, Robson E. [De Grande], and Azzedine Boukerche. Design and analysis of stochastic traffic flow models for vehicular clouds. *Ad Hoc Networks*, 52:39 – 49, 2016. Modeling and Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc Networks.
- [86] Y. Zhang, A. Afanasyev, J. Burke, and L. Zhang. A survey of mobility support in named data networking. In *2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pages 83–88, 2016.
- [87] J. Zhao, Y. Chen, and Y. Gong. Study of connectivity probability of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure communication systems. In *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–4, 2016.
- [88] B. Zheng, M. O. Sayin, C. Lin, S. Shiraishi, and Q. Zhu. Timing and security analysis of vanet-based intelligent transportation systems: (invited paper). In *2017 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD)*, pages 984–991, 2017.
- [89] K. Zheng, Q. Zheng, P. Chatzimisios, W. Xiang, and Y. Zhou. Heterogeneous vehicular networking: A survey on architecture, challenges, and solutions. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(4):2377–2396, 2015.
- [90] Z. Zhou, F. Xiong, C. Xu, Y. He, and S. Mumtaz. Energy-efficient vehicular heterogeneous networks for green cities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(4):1522–1531, 2018.