Protocolo baseado em Geometria Computacional para Descoberta de *Cache* em Redes Veiculares de Dados Nomeados

Lucas B. Rondon[1], Lucas P. Maziero[1], Geraldo P. Rocha Filho[2], Augusto V. Neto[4,5], Maycon M. L. Peixoto[1,3], Leandro A. Villas[1]

[1]Instituto de Computação (UNICAMP) – Campinas, SP, Brasil

[2]Universidade de Brasília (UnB) – Asa Norte, DF, Brasil

[3]Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, BA, Brasil

[4]Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) – Natal, RN, Brasil

[5]Instituto de Telecomunicações (IT) – Aveiro, Portugal

{lucasbr, mayconleo}@lrc.ic.unicamp.br
geraldof@unb.br, {lucas.maziero, leandro}@ic.unicamp.br
augusto@dimap.ufrn.br

Abstract. *Efficient content distribution in large scale ad hoc vehicular networks (VANETs) is extremely challenging due to the highly topology dynamics that VANETs impose. The Vehicle Named Data Network (VNDN) architecture addresses the performance and reliability challenges of delivering large-scale content delivery across VANETs, by supporting content-centric network communication and caching capabilities. However, the success of VNDNs depends critically on mitigating the transmission packet storm of interest occurence in the cache discovery process, which results in network performance degradations due to the waste of resources generated. In light of this, this paper proposes a new geometric cache discovery protocol (PERSEU), which aims to pave the way for efficient large-scale content distribution in VNDNs, through the ability to mitigate the broadcast storm problem in VNDN cache discovery. Compared to other literature solutions, the PERSEU protocol enhances the cache discovery step by 337.7% while allowing a content delivery rate of 81.8 % while reducing the number of streams in the cache discovery process at 82.7%.*

Resumo. *A distribuição eficiente de conteúdo em larga escala em redes veiculares (VANETs) é extremamente desafiador devido à característica topológica altamente dinâmica das VANETs, decorrente da mobilidade dos veículos. A arquitetura VNDN (Vehicle Named-Data Network) lida com os desafios de desempenho e confiabilidade do fornecimento de conteúdo em grande escala em VANETs, a partir do suporte a recursos de comunicação e armazenamento em cache na rede centrada no conteúdo. No entanto, a integração da arquitetura NDN nas VANETs gera broadcast storm de pacotes de Interesse no processo de descoberta de cache, que resulta em desperdício de recursos, perdas de pacotes, atrasos na recuperação de conteúdo e diminui o desempenho da rede. A luz disso, este artigo propõe um protocolo de descoberta de cache geométrico (PERSEU) que visa pavimentar o caminho para a distribuição eficiente de conteúdo em larga escala em VNDNs, através da capacidade de mitigar o broadcast storm na comunicação entre veículos em VNDN. Ao comparar com outras soluções da literatura, o protocolo PERSEU aprimora a etapa de descoberta de cache em 337,7%, além de permitir uma taxa de entrega de conteúdo de 81,8% enquanto reduz o número de transmissões no processo de descoberta de cache em 82,7%.*

1. Introdução

As Redes Veiculares de Dados Nomeados (VNDN, de *Vehicular Named-Data Networking*) vêm se estabelecendo como uma arquitetura promissora, com grande potencial para mitigar os desafios de desempenho na distribuição de conteúdos em larga escala encontrados nas Redes *Ad hoc* Veiculares (VANETs) centradas em IP [Duarte et al. 2019]. O paradigma de comunicação baseado em IP é, por definição, incapaz de oferecer aos usuários tanto entrega de conteúdos em larga escala quanto garantias de requisitos de aplicações distribuídas nas VANETs referentes à Qualidade de Serviço (QoS, de *Quality of Service*) e Qualidade de Experiência (QoE, de *Quality of Experience*). Isso se dá em decorrência da dinamicidade topológica da rede, que advém da alta taxa de mobilidade dos veículos, que 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 [Maia et al. 2013, Amadeo et al. 2016, Wang et al. 2016].

Em VNDN, a comunicação entre veículos é realizada por meio da arquitetura NDN (*Named-Data Networking*), que é uma implementação do paradigma de comunicação centrado na informação (ICN, de *Information-Centric Networking*) [Nour et al. 2018]. Em NDN, a comunicação ocorre por meio de trocas de pacotes de Interesse e Dados. Ao contrário das arquiteturas baseadas em IP, 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 específico envia um pacote de Interesse determinando o nome do conteúdo desejado. Já na segunda etapa, um nó produtor contendo o pacote de Dados correspondente retorna ao nó consumidor o conteúdo solicitado. Além disso, cabe ressaltar que os nós intermediários atuam como consumidores e produtores de conteúdos [Fang et al. 2018]. Com isso, os nós podem atuar como mula de dados, quando não há conectividade, para atender a solicitações futuras e manter o conteúdo mais próximo dos nós consumidores.

Diante disso, VNDN possui potencial para maximizar a entrega de conteúdo em larga escala, levando em consideração os requisitos de QoS e QoE das aplicações distribuídas em Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS, de *Intelligent Transportation System*) [Brennand et al. 2015]. Isso ocorre pois 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 [Coutinho et al. 2018]. Ressalta-se que outro elemento fundamental em VNDN é o *cache* de conteúdo, que aumenta a disponibilidade de conteúdo na rede com múltiplos provedores. Desse modo, o conteúdo pode ser recuperado pelo produtor original ou pelos nós intermediários que possuem uma réplica do conteúdo em *cache*.

No entanto, a integração da arquitetura NDN nas VANETs (isto é, VNDN) apresenta vários desafios referentes à mobilidade dos veículos, segurança de acesso, nomeação e armazenamento de conteúdos [Fang et al. 2018]. No que diz respeito à entrega de conteúdo em larga escala em VNDN tradicional, o principal desafio crítico, e que este trabalho explora, origina do problema de *broadcast storm* que ocorre durante o processo de descoberta de *cache*. Tal problema refere-se às múltiplas transmissões descoordenadas de pacotes de Interesse, transmissões essas que inundam a rede, e consequentemente degradam o canal de comunicação [Coutinho et al. 2018, Fang et al. 2018].

Este trabalho propõe o **PERSEU**, um **P**rotocolo g**E**omét**R**ico para de**S**coberta de *cache* em r**E**des veic**U**lares de dados nomeados. Em busca de atenuar o problema de *broadcast storm* durante a comunicação entre veículos, o PERSEU foi modelado utilizando o

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 Q de pontos, uma vez que a aplicação da envoltória convexa pode ser aplicada dinamicamente sobre os veículos vizinhos do veículo solicitante. Vale frisar que a maior motivação para trabalhar com a arquitetura NDN nas VANETs, é o elemento da *cache* na rede que a arquitetura NDN oferece e a comunicação entre os veículos ser centrada no conteúdo. Os resultados das simulações comprovam que o PERSEU é uma solução viável para VNDN e atende ao seu propósito de mitigar *broadcast storm* durante a comunicação entre veículos e maximizar a taxa de entrega de conteúdos. Ainda, os resultados demonstram que o PERSEU apresenta desempenho superior quando comparado com outros trabalhos da literatura a partir do aumento tanto do processo de descoberta de *cache* (337.7%) quanto da taxa de entrega de conteúdo em larga escala (81,8%), ao mesmo tempo que reduz o número de transmissões de pacotes de Interesse na rede (82,7%).

O restante deste trabalho está organizado como se segue. A Seção 2 discute os principais trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta o problema de *broadcast storm* no processo de descoberta de *cache* em VNDN. Na Seção 4, é apresentado o protocolo para descoberta de *cache* em VNDN. A Seção 5 apresenta e discute os resultados obtidos. Por fim, a Seção 6 apresenta as considerações finais e os trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta as soluções existentes na literatura que explora o problema do *broadcast storm* no processo descoberta de *cache* em VNDN.

Kuai et al. [Kuai et al. 2016] 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 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 e produtores não são totalmente desacoplados, o que é uma das desvantagens das soluções atuais baseadas em IP.

Yu et al. [Yu et al. 2017] propõem um protocolo de encaminhamento oportunista para abordar o *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 terão 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 do veículo remetente, limitando-o no processo de descoberta de *cache*.

Boukerche et al. [Boukerche et al. 2017] e Sousa et al. [de Sousa et al. 2018] propuseram uma estratégia de encaminhamento de Interesse baseada na estabilidade do *link* de comunicação para diminuir o *broadcast storm* na etapa de descoberta de *cache* em VNDN. A estratégia usa os *links* dos veículos destinatários mais estáveis em relação ao veículo solicitante para continuar a propagação de pacotes de Interesse. Com isso, os veículos com *links* mais estáveis tem maior prioridade por meio dos temporizadores para

transmitir o Interesse, enquanto os veículos com *links* menos estáveis cancelam suas transmissões programadas ao notarem que algum veículo vizinho já realizou a transmissão. A estratégia proposta diferencia-se deste trabalho durante a etapa de propagação do pacote de Interesse, uma vez que a formula usada para priorizar os veículos destinatários necessita das informações de velocidade, direção e a informação do raio de comunicação do veículo remetente.

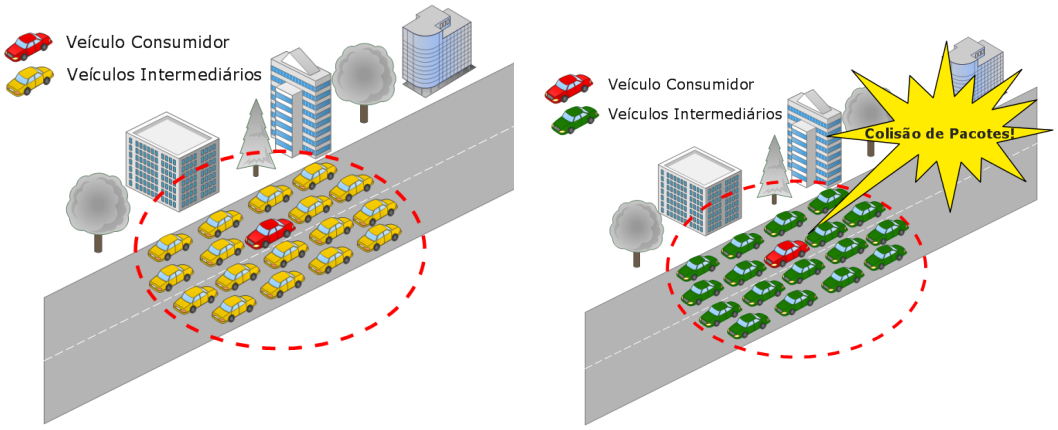
Um dos trabalhos que assemelha com esta pesquisa é proposto por Rondon et al. [Rondon et al. 2019], no qual apresentou o CDP, um protocolo para mitigar o problema de *broadcast storm* na comunicação entre veículos. Para escolher os melhores veículos, primeiro o CDP considera a distância do transmissor atual em relação à sua vizinhança. Em seguida, o conceito de veículos melhores posicionados (i.e., *Sweet Spot*) é aplicado para priorizar os veículos mais bem posicionados. Dessa maneira, os melhores veículos posicionados geograficamente terão maior prioridade para continuar o processo de descoberta de *cache*, enquanto os nós de menor prioridade cancelarão 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, como uma *highway*. Além disso, por ter sido desenvolvido para cenários matriciais, a estratégia de escolha dos veículos retransmissores é fixa devido à maneira como o *Sweet Spot* foi angulado. Com isso, a taxa de *cache hit* e a garantia da taxa de entrega de conteúdo podem ser prejudicadas.

Semelhante às estratégias de encaminhamento de Interesse supracitadas, o protocolo PERSEU também se fundamenta na distância entre os veículos destinatários e o veículo solicitante no processo de priorização de transmissão durante a etapa de descoberta de *cache*. Entretanto, salienta-se que diferentemente das propostas da literatura, o PERSEU utiliza o conceito de geometria computacional para selecionar os veículos mais distantes do veículo solicitante, aplicando o problema de encontrar a envoltória convexa. Com isso, o PERSEU prioriza os veículos que formam a envoltória convexa para continuar propagando o pacote de Interesse pela rede.

3. O Problema de *Broadcast Storm* no Processo de Descoberta de *Cache* em VNDN

O *Broadcast Storm* é um problema crítico em redes sem fio *ad hoc*, uma vez que impacta na utilização ineficiente 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. Diante disso, transmissões redundantes de pacotes de Interesse contribuem ainda mais para o aumento de incidência de colisões de pacotes, 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 apresenta a ocorrência de *broadcast storm* em um cenário VNDN.

Conforme ilustrado na Figura 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, e como não possuem o pacote de Dados correspondente na *cache*, todos veículos destinatários (verdes) irão retransmitir o pacote de Interesse simultaneamente na rede (como apresentado na Figura 1(b)). O resultado dessas retransmissões múltiplas é a colisão de pacotes na rede. Para mitigar a ocorrência de *broadcast storm*, é necessário o desenvolvimento de



(a) Veículos Amarelos Recebem Interesse (b) Veículos Verdes Retransmitem Interesse

Figura 1. ***Descrição do cenário para o problema de Broadcast Storm no Processo de Descoberta de Cache em VNDN***

estratégias inteligentes para encaminhamento de Interesse em VNDN, com capacidade de reduzir o excesso de transmissões e potencializar a eficiência na entrega de conteúdo.

4. Protocolo Geométrico para Descoberta de *Cache* em Redes Veiculares de Dados Nomeados

Nesta seção é apresentado o PERSEU, um protocolo geométrico para descoberta de *cache* em VNDN, capaz de minimizar o problema de *broadcast storm* durante a comunicação entre veículos. 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 Q de pontos, 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 veículos equipados com um rádio compatível ao padrão IEEE 802.11p. Seja* $G = (V(G), E(G))$ *um grafo dinâmico que representa os enlaces sem fio assimétricos entre os veículos, onde* $V(G)$ *representa o conjunto de veículos e* $E(G)$ *representa o enlace de comunicação entre veículos vizinhos. Cada veículo* $v \in V(G)$ *conhece sua posição em andamento* p_v *e o conjunto de veículos vizinhos* $N_v \subseteq V(G)$ *composto por vizinhos a 1 salto de* v*. O conjunto* $E'_v \subseteq E(G)$ *representa o enlace de comunicação entre* v *e seus vizinhos. Finalmente, seja* $Q = V(G)$ *o conjunto de pontos contendo os vértices de* G*.*

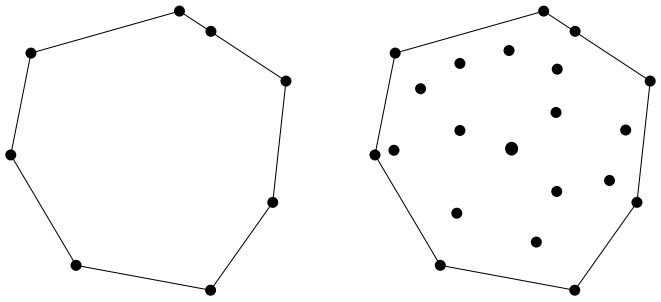
O PERSEU parte da premissa de reduzir a quantidade de transmissões de pacotes de Interesse, ao mesmo tempo que mantém uma alta taxa de *cache hit* com um aumento na taxa de entrega de conteúdos. Para um melhor entendimento o PERSEU será descrito em duas etapas: (i) Processamento do pacote de Interesse, Subseção 4.1 e (ii) Processamento do pacote de Dados, Subseção 4.2.

4.1. 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 2, passando como parâmetro o conjunto Q de pontos ao algoritmo de *Graham Scan* [Graham 1972], cuja a complexidade de tempo no pior caso é $O(nlogn)$. 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 o processo de 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 2(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 2(b) exemplifica a envoltória convexa de um conjunto Q de pontos.



(a) Polígono Convexo

(b) Envoltória Convexa de um conjunto Q de pontos

Figura 2. 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 compõe a borda da envoltória convexa $CH(Q)$, que são os veículos mais distantes do veículo solicitante. Pois 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 1 mostra o fluxo de processamento do pacote de Interesse do PERSEU.

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, onde o 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 1, quando o pacote recebido é um Interesse

Algoritmo 1: Recebeu um Pacote de Interesse

```
   Entrada: [Nome, veiculosRetransmissores, (x_s, y_s)]
1  início
2      relays ← ∅;
3      se Nome ∉ PIT então
4          se Nome ∉ CS então
5              PIT.insert(Interesse);
6              se myId ∈ Interesse.veiculosRetransmissores então
                   // Q representa os veículos vizinhos
7                  relays ← calculaEnvoltoriaConvexa(Q);
8                  d ← sqrt((x_s − x_r)^2 + (y_s − y_r)^2);
9                  adiciona relays em Interesse.veiculosRetransmissores;
10                 tempo_espera ← date() + 0.01 × R/d;
11                 scheduleAt(tempo_espera, sendMessage(Interesse));
12             senão
13                 descarta Interesse;
14         senão
15             scheduleAt(simTime(), sendMessage(Dado));
16     senão
17         se Interesse.isScheduled() então
18             cancela sendMessage(Interesse);
19         senão
20             descarta Interesse;
```

por um determinado conteúdo, o primeiro passo é realizar uma busca na PIT (*Pending Interest Table (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 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 (*Content Store (CS)*)[2] (Linha 4) pelo pacote de Dados correspondente. Se o veículo tiver o pacote de Dados, significa que houve *cache hit*, e consequentemente 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 melhores veículos retransmissores, visto que a escolha dos veículos retransmissores é feita dinamicamente e independente do cenário em questão. Desse modo, conforme o Algoritmo 1 e

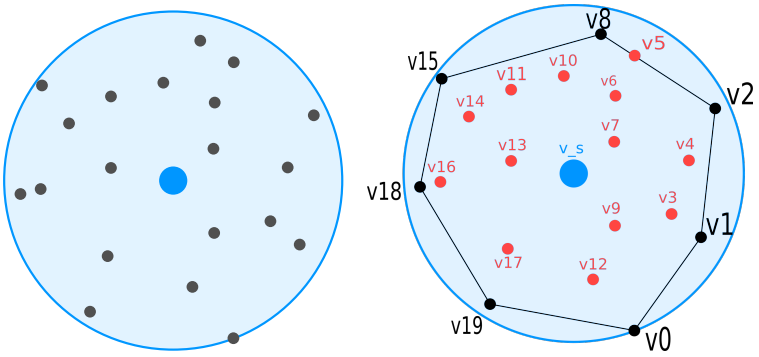
[1] A PIT é utilizada para manter os Interesses que ainda não foram atendidos com os pacotes de Dados correspondentes.

[2] A 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 3, 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)* extrai o posicionamento geográfico de cada veículo; e *(iii)* passa esse conjunto Q de pontos ao algoritmo de *Graham Scan* (Linha 6), que tem por objetivo encontrar a envoltória convexa, conforme exibida na Figura 3(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 1, 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. Consequentemente, os veículos escolhidos para retransmitir o pacote de Interesse têm mais chances de alcançar potenciais veículos produtores, que são aqueles veículos que contém 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 8-1). O intuito do agendamento de transmissão é priorizar, dentre os veículos mais distantes do veículo solicitante, 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 otimiza 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.



(a) Veículos Recebem Pacote de Interesse

(b) Aplicando o Algoritmo de Graham Scan para Selecionar os Veículos Retransmissores

Figura 3. Estratégia de Descoberta de Cache

4.2. Processamento do Pacote de Dados

O Algoritmo 2 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 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 atuam 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 2: Recebeu um Pacote de Dados

```
   Entrada: Dado = ⟨ Nome, conteudo ⟩
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(⟨ Nome, conteudo ⟩);
```

5. Avaliação de Desempenho

Esta seção avalia o desempenho do PERSEU comparando-o com os seguintes trabalhos: Vanilla VNDN [Grassi et al. 2014], OIFP e CDP. A seguir, é descrito o cenário utilizado, as métricas escolhidas com a metodologia aplicada para obter os resultados.

5.1. Metodologia

A avaliação do PERSEU foi realizada por meio de simulações computacionais. Para isso, foram utilizados os simuladores OMNeT++ 4.6 *(Discrete Event Simulator)*[3] e Veins *(Vehicles in Network Simulator)* [4] para simular o comportamento dos protocolos implementados. Ainda, foi utilizado o SUMO 0.21.0 *(Simulation of Urban Mobility)* [5] para gerar a mobilidade dos veículos randomicamente no mapa da cidade de Ottawa, Canada (Figura 4). A área do mapa foi importada pelo *OpenStreetMap*[6].

Para realizar uma comparação justa entre os protocolos, foi assumido que 30% dos veículos são nós consumidores, tal qual modelado nos trabalhos comparados. 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 e 600 para investigar seu impacto na entrega de conteúdo dos protocolos. Semelhante aos veículos consumidores, os veículos produtores foram selecionados aleatoriamente no *startup* da simulação. Os demais conjuntos de parâmetros para realizar as simulações são apresentados na Tabela 1, as seguintes métricas consideradas para avaliação dos protocolos:

- **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.

[3] http://www.omnetpp.org/
[4] http://www.veins.car2x.org/
[5] http://www.dlr.de
[6] http://www.openstreetmap.org

- **Atraso médio**: representa o tempo gasto para que o veículo consumidor receba os pacotes de Interesse enviado.
- **Colisão média de pacotes**: representa a quantidade de colisões de pacotes na camada MAC para todos os veículos [7].
- **Transmissão média de Interesses**: representa a quantidade de vezes que cada veículo transmite um pacote de Interesse.

Tabela 1. Parâmetros

Parâmetro	Valor
Potência de transmissão	1.6 mW
Raio de transmissão	250 m
Frequência do canal	5.9 GHz
Frequência de *beacons*	1 Hz
Taxa de bits	6 Mbps
Mensagem de dados	8192 bit
Mensagem de interesse	400 bit
Interesse timeout	15 s
Número de chunks	10
TTL do interesse	25 s
Execuções	33
Número de veículos	300
Número de consumidores (%)	30
Número de produtores (%)	5, 10, 15, 20, 25
Tempo de simulação	350 s



Figura 4. Cidade de Ottawa, Canada [Coutinho et al. 2018]

O PERSEU foi validado em duas etapas. Na primeira etapa, o protocolo foi avaliado considerando uma variação do número de veículos produtores, com o objetivo de investigar o comportamento do protocolo desde um cenário esparso até um cenário denso. Já na segunda etapa, foi realizada uma variação na densidade de veículos, como forma de analisar o comportamento do PERSEU à medida que a densidade do cenário veicular aumenta. A ideia é analisar a eficiência do PERSEU na taxa de entrega de conteúdo a partir do início da incidência de *broadcast storm* durante a comunicação entre veículos no cenário VNDN. Cada simulação foi executada 33 vezes com uma confiança de 95%, de acordo com o *t-test*. Os resultados obtidos com suas discussões são apresentadas a seguir.

5.2. Análise dos Resultados Variando a Quantidade de Veículos Produtores

A métrica *cache hit* é usada para aferir as capacidades dos protocolos no que diz respeito à eficiência de seus processos de descoberta de *cache* em VNDN. Por meio dos resultados da Figura 5(a), à medida que o número de veículos produtores aumenta na rede, o *cache hit* na etapa de busca pelo conteúdo cresce independente dos protocolos. Para o cenário esparso, observa-se que o PERSEU obtém os melhores resultados, sendo 337,7%, 60,7% e 49,7% mais eficiente na etapa de descoberta de *cache* quando comparado com o Vanilla VNDN, CDP e OIFP, respectivamente. Isso se deve à estratégia de descoberta de *cache* que utiliza a modelagem de geometria computacional para selecionar os veículos retransmissores, visto que a escolha dos próximos veículos que irão continuar propagando Interesse pela rede é feita dinamicamente e independente do cenário.

Em relação à métrica da taxa de entrega de conteúdo, Figura 5(b), observa-se que o PERSEU possui um desempenho superior independente da densidade de veículos produtores utilizados. Particularmente para o cenário com 5% de veículos produtores, o

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

PERSEU apresenta uma eficiência média de 81,8% em comparação com o Vanilla VNDN, 16,4% em relação ao OIFP e 9,3% em comparação com o CDP. Isso ocorre em virtude da estratégia de descoberta de *cache* modelada no PERSEU, a qual auxilia no problema de *broadcast storm* durante o processo de descoberta de *cache*.

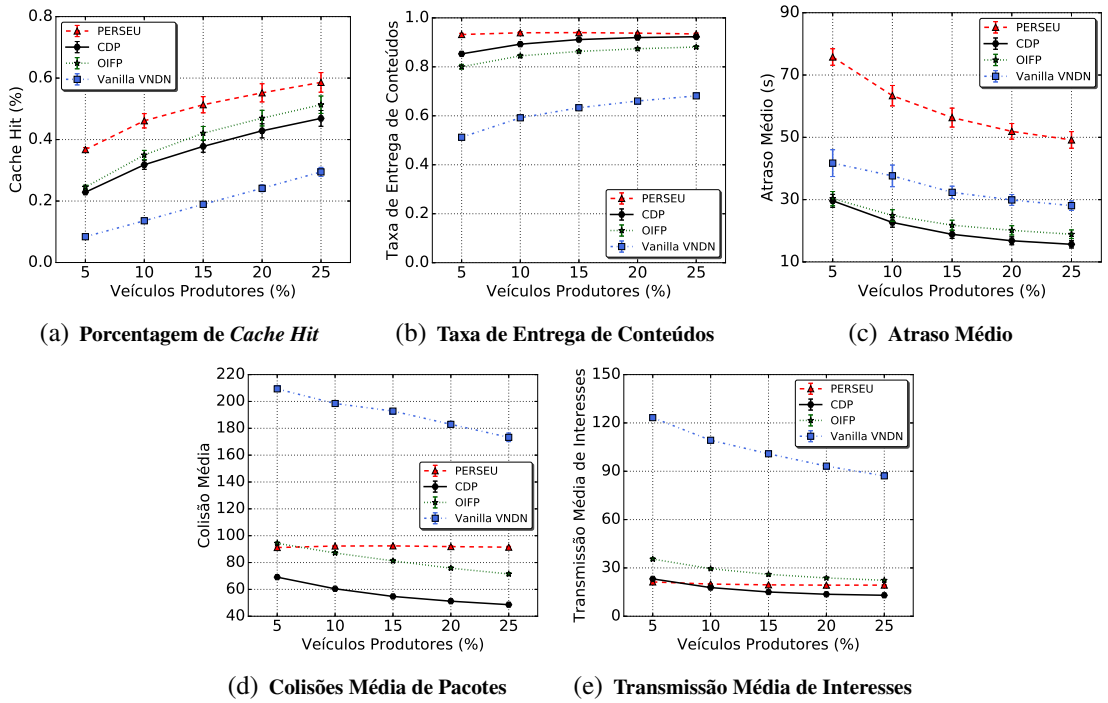
A Figura 5(c) apresenta o comportamento do atraso médio por conteúdo recebido em função dos veículos produtores. Como esperado, à medida que o número de veículos produtores aumenta, o tempo para receber o conteúdo diminui. Isso ocorre devido ao conteúdo ficar mais próximo dos veículos consumidores. Observa-se que o CDP obtém os melhores resultados para recuperar o conteúdo. Isto faz sentido posto que o CDP é capaz de selecionar os melhores veículos posicionados geograficamente para continuar encaminhando o Interesse pela rede. Apesar do PERSEU possuir maior atraso para recuperar o conteúdo, ele ainda continua sendo mais eficaz na descoberta e entrega de conteúdo aos veículos consumidores. A explicação para tal é que o PERSEU consegue alcançar um maior número de nós produtores no processo de descoberta de *cache*. Portanto, o PERSEU garante maior eficiência na etapa de descoberta e recuperação de conteúdo, a qual é considerada um dos grandes desafios na comunicação entre veículos em VNDN.

Após avaliação da métrica de atraso médio, aferimos o número médio de colisões de pacotes para todos os veículos, como apresentado na Figura 5(d). Como sugerem os resultados, o Vanilla VNDN é o protocolo com o maior número de colisões de pacotes. Isso é resultante da não coordenação dos veículos no período de descoberta de *cache*. Em contrapartida, o protocolo CDP foi o que obteve menos colisões de pacotes, haja vista sua capacidade de escolher os melhores veículos posicionados geograficamente para continuar propagando o Interesse pela rede. Já o PERSEU possui uma taxa de colisão média de 31,9% a mais que o CDP. Isso ocorre porque o PERSEU é mais eficiente no processo de descoberta de *cache*, alcançando maior número de veículos produtores. Consequentemente, quando os veículos produtores transmitem o pacote de Dados correspondente na rede, acaba aumentando colisões de pacotes. Entretanto, o PERSEU ainda possui maior eficiência no estágio de descoberta e recuperação de conteúdo.

Por fim, a Figura 5(e) apresenta o número médio de transmissões de pacotes de Interesse no 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. Entre os protocolos avaliados, o PERSEU obteve melhor desempenho sobre o Vanilla, OIFP e CDP. Em um cenário esparso, quando há 5% de veículos produtores, o PERSEU reduz significativamente o número de transmissões de pacotes de Interesse para recuperar o conteúdo solicitado, transmitindo 82,7% menos que o Vanilla VNDN, 39,9% menos que o OIFP e 8,1% menos que o CDP. Essa redução é alcançada graças à estratégia de encaminhamento de Interesse dos veículos retransmissores, que é baseada em geometria computacional, juntamente com o mecanismo de cancelamento de pacote de Interesse agendado para transmissão.

5.3. Análise dos Resultados Variando a Densidade de Veículos

Como pode-se notar na Figura 6(a), 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 sugerem que o PERSEU foi o protocolo que obteve o melhor desempenho em relação ao Vanilla VNDN, OIFP e CDP, independente do cenário. Isso ocorre devido à estratégia de encaminhamento de Interesse implementada no PERSEU, que aplica o problema de encontrar a envoltória convexa para determinar os próximos veículos retransmissores.



(a) **Porcentagem de *Cache Hit***

(b) **Taxa de Entrega de Conteúdos**

(c) **Atraso Médio**

(d) **Colisões Média de Pacotes**

(e) **Transmissão Média de Interesses**

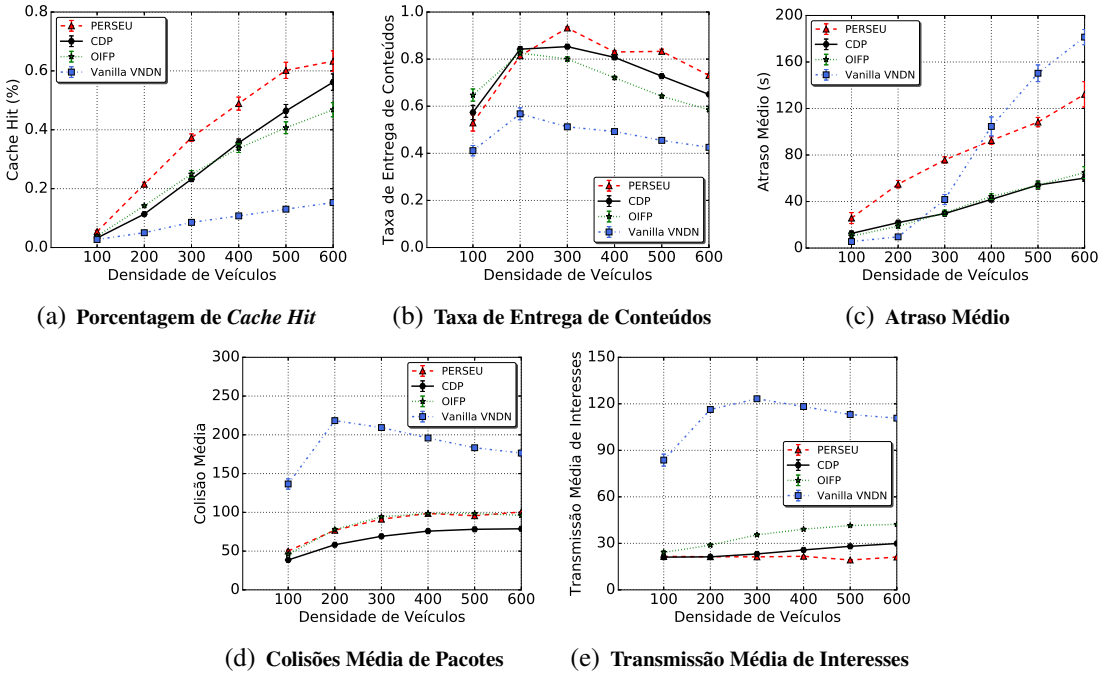
Figura 5. Resultados de Simulação Variando o Número de Veículos Produtores

O desempenho do PERSEU no processo de descoberta de *cache* mencionada anteriormente, reflete na taxa de entrega de conteúdos, como observado na Figura 6(b). De acordo com a Figura 6(b), à medida que a densidade de veículos aumenta na rede (de 100 a 300 veículos), a taxa de cobertura 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 e, consequentemente, resultando em maior colisão de pacotes. De modo geral, o PERSEU obteve desempenho superior na entrega de conteúdo, quando comparado com o Vanilla VNDN, OIFP e CDP. Como observado na Figura 6(b), no cenário com 300 veículos, o PERSEU assegura quase 100% de garantia na entrega de conteúdo.

A Figura 6(c), apresenta o atraso médio na entrega de conteúdo. 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 na rede, implicando em perdas de pacotes e atraso na entrega de conteúdo. Já as Figuras 6(d) e 6(e) apresentam que os resultados sobre a colisão média e a transmissão média de interesses estão relacionados. É importante ressaltar que o número de colisões e de transmissões aumenta à medida em que a densidade também aumenta, mas na média esse número permanece com uma pequena variação a partir de 300 veículos, principalmente para os protocolos OFIP, CDP e PERSEU.

6. Conclusão

Neste artigo, abordamos o efeito negativo do *broadcast storm* durante a comunicação entre veículos no processo de descoberta de *cache* em VNDN. Este trabalho propôs o protocolo PERSEU para minimizar o problema de *broadcast storm* de pacotes de Interesse em VNDN, com objetivo de maximizar a taxa de entrega de conteúdo na rede. Para isso, o



(a) **Porcentagem de *Cache Hit***

(b) **Taxa de Entrega de Conteúdos**

(c) **Atraso Médio**

(d) **Colisões Média de Pacotes**

(e) **Transmissão Média de Interesses**

Figura 6. Resultados de Simulação Variando a Densidade de Veículos num Cenário Crítico (5% Veículos Produtores)

PERSEU foi modelado com base no conceito de geometria computacional para escolher os veículos retransmissores dinamicamente e independente do cenário, na perspectiva de continuar propagando o pacote de Interesse na rede. Os resultados de simulação sugerem que o PERSEU apresenta um melhor desempenho quando comparado com Vanilla VNDN, OIFP e CDP. De acordo com os resultados adquiridos, o PERSEU melhora o processo de descoberta de *cache* em 337,7%, potencializa a taxa de entrega de conteúdo em 81,8% e, minimiza a quantidade de transmissões de pacotes de Interesse em 82,7% na média, quando comparado com o Vanilla VNDN. Como trabalho futuro, planeja-se desenvolver uma estratégia de encaminhamento de pacotes de Dados com base no problema de encontrar a envoltória convexa.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por meio dos processos de nº 2015/24494-8 e 2018/16703-4.

Referências

Amadeo, M., Campolo, C., and Molinaro, A. (2016). Information-centric networking for connected vehicles: a survey and future perspectives. *IEEE Communications Magazine*, 54(2):98–104.

Boukerche, A., Coutinho, R. W. L., and Yu, X. (2017). 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.

Brennand, C. A. R. L., de Souza, A. M., Maia, G., Boukerche, A., Ramos, H., Loureiro, A. A. F., and Villas, L. A. (2015). An intelligent transportation system for detection and control of congested roads in urban centers. In *2015 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*, pages 663–668.

Coutinho, R. W. L., Boukerche, A., and Loureiro, A. A. F. (2018). Design guidelines for information-centric connected and autonomous vehicles. *IEEE Communications Magazine*, 56(10):85–91.

Coutinho, R. W. L., Boukerche, A., and Yu, X. (2018). 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. ACM.

Coutinho, R. W. L., Boukerche, A., and Yu, X. (2018). A novel location-based content distribution protocol for vehicular named-data networks. In *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 01007–01012.

de Sousa, A. M., Araújo, F. R. C., and Sampaio, L. N. (2018). A link-stability-based interest-forwarding strategy for vehicular named data networks. *IEEE Internet Computing*, 22(3):16–26.

Duarte, J. M., Braun, T., and Villas, L. A. (2019). Mobivndn: A distributed framework to support mobility in vehicular named-data networking. *Ad Hoc Networks*, 82:77 – 90.

Fang, C., Yao, H., Wang, Z., Wu, W., Jin, X., and Yu, F. R. (2018). A survey of mobile information-centric networking: Research issues and challenges. *Communications Surveys Tutorials*, 20(3):2353–2371.

Graham, R. L. (1972). An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set. *Info. Pro. Lett.*, 1:132–133.

Grassi, G., Pesavento, D., Pau, G., Vuyyuru, R., Wakikawa, R., and Zhang, L. (2014). Vanet via named data networking. In *2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pages 410–415.

Kuai, M., Hong, X., and Yu, Q. (2016). Density-aware delay-tolerant interest forwarding in vehicular named data networking. In *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pages 1–5.

Maia, G., Villas, L. A., Boukerche, A., Viana, A. C., Aquino, A. L. L., and Loureiro, A. A. F. (2013). Data dissemination in urban vehicular ad hoc networks with diverse traffic conditions. In *2013 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 000459–000464.

Nour, B., Sharif, K., Li, F., Khelifi, H., and Moungla, H. (2018). Nncp: A named data network control protocol for iot applications. In *2018 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pages 1–6.

Rondon, L. B., da Costa, J. B. D., Filho, G. P. R., and Villas, L. A. (2019). A distance and position-based caching discovery protocol for vehicular named-data networks. In *2019 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, pages 1–6.

Wang, Y., Liu, H., Huang, L., and Stankovic, J. (2016). Efficient and proactive v2v information diffusion using named data networking. In *2016 IEEE/ACM 24th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*, pages 1–10.

Yu, X., Coutinho, R. W. L., Boukerche, A., and Loureiro, A. A. F. (2017). 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.