

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ADRIANO ANTUNES PRATES

**Um Framework para Difusão Eficiente de Interesses
em Redes Veiculares Orientadas a Conteúdo**

NITERÓI

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ADRIANO ANTUNES PRATES

Um Framework para Difusão Eficiente de Interesses em Redes Veiculares Orientadas a Conteúdo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos

Orientador:
IGOR MONTEIRO MORAES

NITERÓI

2014

ADRIANO ANTUNES PRATES

Um *Framework* para Difusão Eficiente de Interesses em Redes Veiculares Orientadas a
Conteúdo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos

Aprovada em Agosto de 2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Igor Monteiro Moraes - Orientador, UFF

Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque, UFF

Prof. Christian Rodolfo Esteve Rothenberg, Unicamp

Prof. Miguel Elias Mitre Campista, UFRJ

Niterói

2014

Este trabalho é dedicado à minha família e amigos.

"Your work is going to fill a large part of your life, and the only way to be truly satisfied is to do what you believe is great work. And the only way to do great work is to love what you do. If you haven't found it yet, keep looking, and don't settle. As with all matters of the heart, you'll know when you find it."

(Steve Jobs)

Agradecimentos

Registro sinceros agradecimentos a Deus, pela vida, saúde e força dada nos momentos difíceis para superá-los e fazê-los escada para novas conquistas.

A toda minha família, especialmente ao meu pai Mariano e à minha mãe Terezinha, sempre presentes em espírito e no amor, por serem minha fortaleza e por terem oferecido as bases sólidas para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos amigos e colegas do IFNMG, pelo companheirismo e compreensão, imprescindíveis para que esse momento fosse possível.

Aos professores do IC/UFF, especialmente aos que contribuíram diretamente nesta jornada, Célio, Débora, Guto, Rosseti e Vinod, pelo exemplo de profissionais e pessoas que são.

Ao professor e orientador Igor Moraes, que ensinou mais do que apenas conteúdos, mas que é possível aliar sabedoria, competência e humildade, tornando-se parâmetro para minha carreira docente.

Aos professores membros da banca de avaliação, pela disponibilidade e contribuições dadas para o aperfeiçoamento do trabalho.

Aos amigos e amigas do laboratório Midiacom, pelo acolhimento, apoio e amizade durante todo esse período.

Por fim, mas não menos importante, à minha noiva Ane Marielle e a toda sua família, por todo amor, carinho, cuidados e incentivos necessários para que eu conseguisse cumprir essa difícil meta.

A todos vocês, muito obrigado!

Resumo

Dentre os desafios para o desenvolvimento das redes veiculares e suas aplicações, destacam-se a concepção de protocolos eficientes para roteamento, disseminação de informações e configuração da rede. A *Content Centric Network* (CCN), uma das arquiteturas baseadas no paradigma de redes orientadas a conteúdo, é uma solução promissora para as redes veiculares. Na CCN, a distribuição de conteúdos é baseada nos nomes dos próprios conteúdos. Assim, tanto a busca quanto a entrega de conteúdos ocorrem de forma independente da localização e identificação dos nós envolvidos e, portanto, não é necessário o uso de esquemas de endereçamento para os nós, nem o estabelecimento de rotas fim-a-fim entre as partes comunicantes em movimentação. Além disso, qualquer nó da rede pode se comportar como fonte de um conteúdo, pois os nós na CCN são dotados de um *cache* para armazenar conteúdos previamente solicitados. Dessa forma, a arquitetura CCN oferece vantagens para as redes altamente dinâmicas, como suporte nativo à mobilidade e a independência de configurações prévias para obtenção de conteúdos. Entretanto, em redes sem-fio, a CCN pode experimentar desperdício de recursos em função do problema de *broadcast storm*, causado pela inundação da rede com pacotes de interesse. Esses pacotes são enviados pelos nós CCN para solicitar um conteúdo desejado. Este trabalho propõe o GeoZone, um *framework* que explora os benefícios da arquitetura CCN para as redes veiculares e que introduz mecanismos para a redução do problema de inundação de pacotes de interesse em redes veiculares orientadas a conteúdo. O *framework* proposto é composto por (i) um esquema para nomeação geo-referenciada de conteúdos e transparente para aplicações veiculares e por (ii) um mecanismo de encaminhamento de pacotes de interesse, que define uma zona de disseminação para reduzir a inundação da rede. Simulações em diferentes cenários de mobilidade veicular são realizadas para comparar a eficiência do *framework* com outras propostas similares. Comparado a estas propostas, o GeoZone reduz em até 66% o número de pacotes de interesse transmitidos, sem prejuízo ao atraso e à taxa de entrega de conteúdos.

Palavras-chave: Redes orientadas a conteúdo, redes veiculares, aplicações veiculares, inundação de pacotes de interesse.

Abstract

The challenges for the development of vehicular networks and its applications include the design of efficient protocols for routing, information dissemination, and network configuration. The particular characteristics of nodes mobility in vehicular environments lead to these challenges. Mobility increases the complexity of the address allocation and route computation. Content Centric Network (CCN), an architecture based on the information-centric networking (ICN) paradigm, is a promising solution for vehicular networks. In CCN, the content distribution is only based on content names. Thus, the content search and delivery are performed independently of the location and identification of nodes involved. There is no need to employ address-allocation schemes or to establish routes between nodes in movement. In addition, with CCN, any network node can act as a content source, because each node has a cache to store contents previously requested. Thus, the CCN architecture offers many facilities to highly dynamic networks, such as native mobility support and independence of previous node configuration to retrieve contents. In CCN-based wireless networks, however, the flooding of interest packets may lead to the wastage of resources due to the broadcast storm problem. Interest packets are sent by CCN nodes to request contents. In this work, we propose GeoZone, a framework that exploits the benefits of the CCN architecture for vehicular networks and introduces mechanisms to reduce the flooding of interest packets in information-centric vehicular networks. The proposed framework is composed of (i) a geo-referenced naming scheme, which is also transparent for vehicular applications, and (ii) an interest-packet forwarding mechanism that defines a dissemination zone to reduce network flooding. Simulations are performed in different scenarios to compare the efficiency of our framework with other proposals. Compared to these proposals, the GeoZone framework reduces up to 66% the number of interest packets transmitted without sacrifice to the content-delivery rate and delay.

Keywords: Content-centric networks, vehicular networks, content distribution, vehicular applications, interest-packet flooding.

Lista de Figuras

2.1	Estrutura dos pacotes CCN [21].	6
2.2	Esquema de nomeação de conteúdos na CCN [15].	7
2.3	Modelo de um nó CCN [17].	9
2.4	Encaminhamento de pacotes de interesse e conteúdos na arquitetura CCN.	10
2.5	Exemplo de operação de uma Rede Veicular Orientada a Conteúdo.	11
2.6	<i>Broadcast storm</i> causado pela inundação de pacotes de interesse.	13
4.1	Exemplos de zona de disseminação definidas pelo GeoZone.	24
5.1	Número de transmissões de interesses.	32
5.2	Número de transmissões de conteúdos.	33
5.3	Atraso médio - distância consumidor x produtor aprox. 1km.	34
5.4	Atraso médio - distância produtor x consumidor aprox. 5km.	35
5.5	Interesses transmitidos em função da quantidade de consumidores.	37
5.6	Conteúdos transmitidos em função da quantidade de consumidores.	38
5.7	Quantidade de nós que participam da transmissão de conteúdos.	38
5.8	Atraso de entrega em função da quantidade de consumidores.	39
5.9	Número de transmissões de interesses.	40
5.10	Número de transmissões de conteúdos.	41
5.11	Atraso médio.	42

Lista de Abreviaturas e Siglas

A-INT	: <i>Advanced Interest;</i>
AODV	: <i>Ad hoc On-demand Distance Vector;</i>
B-INT	: <i>Basic Interest;</i>
BFR	: <i>Bloom-filter Routing;</i>
CCN	: <i>Content Centric Network;</i>
CCVN	: <i>Content-centric Vehicular Networking;</i>
CPT	: <i>Content Provider Table;</i>
CS	: <i>Content Store;</i>
DMND	: <i>Data from Mobiles Using Named Data;</i>
DSRC	: <i>Dedicated Short-range Communication;</i>
E-CHANET	: <i>Enhanced-Content-centric Multihop Wireless Network;</i>
FIB	: <i>Forwarding Interest Base;</i>
GBNS	: <i>Geographically-based Naming Scheme;</i>
GPS	: <i>Global Positioning System;</i>
IC NoW	: <i>Information-centric Networking on Wheels;</i>
ICN	: <i>Information-centric Network;</i>
IP	: <i>Internet Protocol;</i>
LFBL	: <i>Listen First Broadcast Later;</i>
LRU	: <i>Least Recently Used;</i>
MAC	: <i>Media Access Control;</i>
NDN	: <i>Named Data Networking;</i>
OFDM	: <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing;</i>
PIT	: <i>Pending Interest Table;</i>
RSU	: <i>Road-side Unit;</i>
RVOC	: <i>Redes Veiculares Orientadas a Conteúdo;</i>
SPT	: <i>Source Position Tag;</i>
TCP	: <i>Transmission Control Protocol;</i>
URI	: <i>Uniform Resource Identifier;</i>

Lista de Abreviaturas e Siglas

V-NDN	:	<i>VANETs via Named Data Networking;</i>
V2V	:	<i>Vehicle to Vehicle;</i>
VANET	:	<i>Vehicular ad-hoc Networks;</i>
VC	:	<i>Vehicle Cloud;</i>
ZFM	:	<i>Zone Forwarding Mechanism;</i>

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Organização	4
2	As Redes Veiculares Orientadas a Conteúdo	5
2.1	A Arquitetura CCN	5
2.1.1	Nomeação de Conteúdos	7
2.1.2	Encaminhamento de Pacotes	8
2.2	As Virtudes da CCN para as Redes Veiculares	10
2.3	O Problema do <i>Broadcast Storm</i>	12
3	Trabalhos Relacionados	14
4	O Framework GeoZone	21
4.1	O Esquema de Nomeação GBNS (<i>Geographically-Based Naming Scheme</i>) .	21
4.2	O Mecanismo de Encaminhamento ZFM (<i>Zone Forwarding Mechanism</i>)	23
4.3	Políticas do <i>Framework</i> GeoZone	26
4.3.1	GeoZone Não Proativo	26
4.3.2	GeoZone Proativo	27
5	Avaliação	28
5.1	Parâmetros de Simulação	28
5.2	Avaliação Baseada no Modelo de Mobilidade Sintético	30
5.2.1	<i>Urban-Vehicular Mobility Model</i>	30

5.2.2	Cenários de Avaliação	30
5.2.3	Resultados	31
5.3	Avaliação Baseada em <i>Traces</i> de Mobilidade Real	39
5.3.1	Resultados	40
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	43
	Referências	45

Capítulo 1

Introdução

As redes veiculares (*vehicular ad-hoc networks* - VANETs) [2, 20] são definidas como um sistema de comunicação sem-fio entre veículos automotores e unidades de acostamento (*road-side units* - RSUs), projetadas com o objetivo de suportar uma variedade de novas aplicações, que oferecem segurança e conforto aos condutores e passageiros [29]. Tais redes possuem características singulares, como o alto grau de mobilidade dos nós, em sua maioria veículos em movimento, e a variação da massa crítica da rede. Essas características implicam em conectividade intermitente, em função da variação da qualidade dos enlaces entre os nós e das constantes alterações de topologia [3].

A maioria das propostas de arquiteturas para redes veiculares são baseadas na pilha de protocolos TCP/IP [27, 32]. Por isso herdam a necessidade de que o nó de origem conheça o endereço do nó de destino e que possua uma rota até esse nó de destino para obter um dado conteúdo [11, 42, 44]. Tais exigências, entretanto, podem comprometer sobremaneira o desempenho das aplicações para redes veiculares, uma vez que o estabelecimento de rotas fim-a-fim é uma tarefa muito custosa nestas redes, devido principalmente às características de mobilidade dos nós que as compõem [14]. Por outro lado, pode-se observar que muitas aplicações para redes veiculares têm a característica de distribuir o mesmo conteúdo para um grande número de nós interessados [35]. Um exemplo disso são as aplicações que divulgam informações sobre as condições das vias, alertas de perigo iminente ou, simplesmente, sobre vagas de estacionamento disponíveis na região. Para essas aplicações, cujas informações são de natureza pública, a identificação do nó fonte não é uma preocupação dos nós requisitantes, uma vez que o interesse é pela informação prestada, e não necessariamente, por quem a transmite. No caso de uma aplicação que monitora o tráfego da ponte Rio-Niterói, por exemplo, é provável que existam muitos nós requisitantes dessas informações nas regiões próximas à ponte. Sendo assim, qualquer nó

da rede que possa colaborar com o envio de informações dessa aplicação irá atender a um grande número de nós interessados. Esse paradigma de busca e entrega de conteúdos de forma independente da fonte provedora ou da localização física dos nós, é a premissa básica das propostas de Redes Orientadas a Conteúdo (*information-centric networks* - ICNs) [8, 15, 16].

Uma das arquiteturas de redes orientadas a conteúdo proposta na literatura é a *Content-Centric Network* (CCN) [21]. Na CCN¹, os conteúdos são identificados através do seu próprio nome e requisitados mediante o envio de pacotes de interesse. Esses pacotes são encaminhados pela rede com base no nome do conteúdo desejado, até alcançarem um nó capaz de responder a solicitação. Vale ressaltar que na CCN, cada nó da rede é dotado de um *cache* para armazenamento de conteúdos, permitindo que qualquer nó possa responder aos interesses recebidos a partir de conteúdos salvos em *cache*. Essas características de busca e entrega de conteúdos atende aos requisitos das aplicações veiculares, minimizando as dificuldades de comunicação ora citadas. Como os nós não são identificados, seja por nomes ou por endereços, um nó veicular pode, por exemplo, enviar interesses para algum conteúdo desejado, sem a necessidade de especificar a fonte do conteúdo. Também não é necessário o cálculo de rotas fim-a-fim, uma vez que os interesses são disseminados na rede com base em seu próprio nome. Ao alcançar algum nó que possui o conteúdo desejado em *cache*, o nó responde ao interesse recebido através do envio do respectivo pacote de conteúdo. O pacote de conteúdo é encaminhado para o solicitante pelo caminho inverso ao caminho percorrido pelo pacote de interesse.

As redes veiculares baseadas na arquitetura CCN [5, 9, 19, 49, 51] se beneficiam da característica natural de difusão do meio sem-fio, tanto para disseminar pacotes de interesse para a busca de conteúdos, quanto para espalhar os conteúdos entre os nós que escutam esses pacotes de dados. Como todos os nós da rede não possuem endereços e armazenam conteúdos em *cache*, a CCN provê nativamente o suporte à mobilidade de nós consumidores [3]. Isso porque, ao se deslocar para uma nova região, um nó não precisa reconfigurar seu endereço. Para receber o conteúdo, basta o nó reenviar o pacote de interesse não atendido. Assim, qualquer nó nesta nova região que possua o conteúdo requisitado em *cache* pode responder através do envio de um pacote de dados com esse conteúdo. Pelo mesmo motivo, as redes veiculares orientadas a conteúdo também oferecem suporte à comunicação sobre enlaces intermitentes. Todas essas facilidades reduzem as dificuldades operacionais atreladas à movimentação dos nós em uma rede móvel [45, 17], tornando a arquitetura CCN uma alternativa promissora para o funcionamento adequado

¹Também citado por alguns autores como NDN (*Named Data Networking*).

das aplicações em redes veiculares.

Um problema para a adoção das redes veiculares baseadas na CCN, porém, é a inundação provocada pela disseminação de pacotes de interesse por toda a rede, que pode acarretar o problema de *broadcast storm*, característico de redes sem-fio [43]. Este problema ocorre devido à política de encaminhamento dos pacotes de interesse em redes sem-fio. Segundo essa política, quando um nó recebe um pacote de interesse e não possui o respectivo conteúdo em *cache*, o nó realiza o encaminhamento do pacote de interesse para todos os seus vizinhos. Não é definida entretanto, uma regra que delimite o número máximo de saltos que esse pacote irá realizar, tampouco uma área máxima de abrangência da solicitação. Dessa forma, a busca de conteúdos pouco populares e distantes de algum produtor tende a gerar uma sobrecarga de pacotes de interesse na rede.

A principal contribuição deste trabalho é a proposta de um *framework*, denominado GeoZone [37], para reduzir o problema da inundação de interesses em redes veiculares orientadas a conteúdo baseadas na arquitetura CCN. O *framework* proposto é composto por um esquema de nomeação de conteúdos, chamado de *Geographically-Based Naming Scheme* (GBNS), e por um mecanismo de encaminhamento de pacotes de interesse, chamado de *Zone Forwarding Mechanism* (ZFM). Diferentemente de outras abordagens da literatura, o GeoZone limita a área de disseminação dos pacotes de interesse em uma zona restrita da rede, com base em coordenadas geográficas da fonte produtora do conteúdo, obtidas através do próprio nome do conteúdo. Para tanto, é definido um esquema de nomeação geo-referenciado e transparente às aplicações veiculares, que mantém conservadas as propriedades e características originais da arquitetura CCN. Também são propostas duas políticas do *framework* GeoZone, que se diferenciam em relação ao uso de *cache* oportunista [38] e quanto à política de encaminhamento dos pacotes de conteúdo na rede, denominados GeoZone proativo e GeoZone não-proativo.

Simulações baseadas na ferramenta ndnSIM [1] são realizadas para comparar a eficiência do GeoZone com outras propostas da literatura. São considerados dois cenários distintos de mobilidade. No primeiro, é implementado um modelo de mobilidade sintético, denominado *Urban-Vehicular Mobility Model*, que permite a avaliação do mecanismo proposto em diferentes configurações de densidade veicular. O segundo cenário é baseado em *traces* de movimentação veicular da cidade de Genebra [33] e o objetivo dessa configuração é avaliar o mecanismo em um cenário de rede real. O *framework* GeoZone comparado a propostas da literatura, reduz em até 66% o número total de pacotes de interesses transmitidos e em até 9% a quantidade total de pacotes de conteúdos transmitidos,

sem prejuízo às métricas de atraso e taxa média de entrega de conteúdos. Além disso, nas simulações com dados reais de mobilidade, o GeoZone proativo conseguiu recuperar conteúdos com um atraso médio até 52% inferior à proposta CCN sem-fio padrão.

1.1 Organização

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. Após este capítulo introdutório, o Capítulo 2 apresenta uma visão geral sobre as redes veiculares orientadas a conteúdo, contemplando os princípios básicos da arquitetura CCN, os benefícios oferecidos por essa arquitetura às redes veiculares e o problema de *broadcast storm*, que é investigado por este trabalho. O Capítulo 3 discute trabalhos recentes sobre a adoção da arquitetura CCN para redes veiculares. São apresentados trabalhos que comparam a nova abordagem com soluções baseadas na arquitetura TCP/IP, protótipos de arquiteturas baseadas em CCN e alguns trabalhos relacionados ao problema de disseminação de pacotes nas redes veiculares orientadas a conteúdo. O Capítulo 4 introduz o *framework* GeoZone, a solução proposta por este trabalho, que é composta pelos sub-mecanismos *Zone Forwarding Mechanism* (ZFM) e *Geographically-Based Naming Scheme* (GBNS), além de diferenciar as suas duas políticas: GeoZone Proativo e GeoZone Não-proativo. O Capítulo 5 apresenta os resultados da análise de desempenho do GeoZone, realizadas com base em simulações e utilizando um modelo de mobilidade sintético e dados reais da movimentação de veículos da cidade de Genebra [33]. As análises tem por objetivo comparar o desempenho do *framework* GeoZone com outras propostas da literatura, considerando métricas de taxa de envio de pacotes de conteúdo e interesse, além do atraso de entrega de conteúdos. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais e conclusões, além de uma discussão sobre trabalhos futuros.

Capítulo 2

As Redes Veiculares Orientadas a Conteúdo

O ponto chave das redes veiculares orientadas a conteúdo é a adoção de um paradigma de comunicação, cujo foco é a entrega de conteúdos de maneira independente da identificação ou localização física das fontes destes conteúdos. Para isso, tanto as requisições quanto os conteúdos são encaminhados pelos nós da rede com base nos seus próprios nomes, que identificam de forma única cada objeto de dados da rede.

A partir dessa abordagem, não se faz necessário definir endereços para cada nó da rede e nem fazer requisições de conteúdo a um nó específico. Além disso, não é preciso a utilização de mecanismos para se estabelecer e/ou gerenciar rotas fim-a-fim em topologias altamente dinâmicas [3], como é o caso das redes veiculares. Essas características fazem das redes veiculares orientadas a conteúdo uma solução promissora, em particular, as propostas baseadas na arquitetura *Content-Centric Network* (CCN) [21], por também se aproveitarem da característica de difusão do meio sem-fio, como será discutido adiante. Wang *et al.*, por exemplo, demonstram que, para um dado cenário de comunicação veicular, a solução de IP móvel consegue uma taxa de recuperação de dados de 9,6%, enquanto que uma solução baseada na arquitetura CCN consegue recuperar cerca de 97% dos dados requisitados [47] .

2.1 A Arquitetura CCN

A CCN [21] é uma arquitetura de rede baseada no paradigma de redes orientadas a conteúdos (*Information Centric Networks* - ICNs) [15] e proposta originalmente como uma solução para a Internet do Futuro [13, 34].

Devido ao significativo número de trabalhos e contribuições encontradas na literatura, pode-se considerar que a arquitetura CCN, atualmente, representa a principal referência para a realização de pesquisas em ICNs. Possui um grupo de pesquisa atuante, o *Named Data Networking*¹ (*NDN Project*), além de ambientes próprios para realização de testes e validação, como o *ndnSIM*², o *CCNx*³ e o *Mini-CCNx* [12]. Por estas razões, e assim como outros autores, este trabalho investiga as redes veiculares orientadas a conteúdo, usando como ponto de referência a arquitetura CCN como substrato para a operação das redes veiculares.

Toda comunicação na CCN é baseada em dois tipos de pacotes: o pacote de interesse e o pacote de conteúdo. A Figura 2.1 apresenta a estrutura básica de cada pacote.

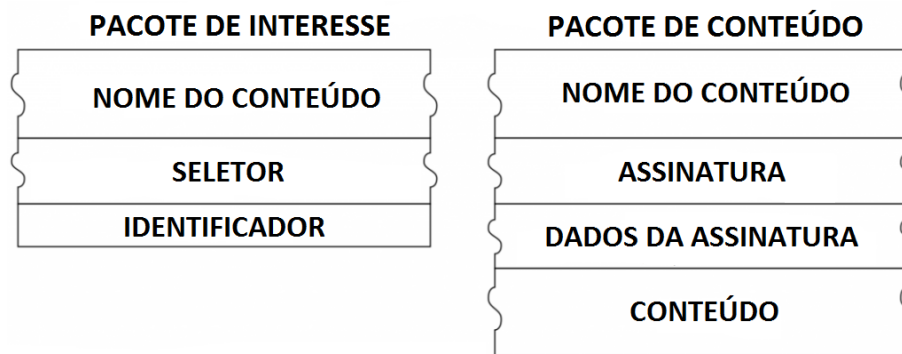


Figura 2.1: Estrutura dos pacotes CCN [21].

O pacote de interesse é enviado pelo nó requisitante, comumente chamado de consumidor, para solicitar à rede algum conteúdo. A busca do conteúdo é sempre realizada considerando o nome do objeto de dados desejado, que é indicado pelo campo **Nome do Conteúdo**. Percebe-se aqui a diferença fundamental deste modelo de comunicação com o modelo clássico TCP/IP. Ao invés de buscar o conteúdo desejado em um nó específico da rede, cujo esforço incluiria a obtenção do identificador deste nó e o estabelecimento de um canal de comunicação fim-a-fim para com ele, na CCN, o nó consumidor solicita diretamente à rede o conteúdo desejado, não se importando, a princípio, com a fonte do objeto. O campo **Seletor** pode ser utilizado pelo consumidor para informar à rede parâmetros e seletores opcionais para a obtenção do conteúdo. O campo **Identificador** é utilizado para identificar de forma única um pacote de interesse, evitando a ocorrência de *loops* durante o encaminhamento.

Um nó é dito produtor quando é capaz de responder um pacote de interesse, envi-

¹<http://named-data.net/>

²<http://ndnsim.net/>

³<http://www.ccnx.org/>

ando o pacote de conteúdo indicado. O pacote de conteúdo encapsula o objeto de dados (Conteúdo) solicitado pelo pacote de interesse. Além disso, carrega a assinatura criptográfica (Assinatura) do pacote e informações da chave pública da fonte (Dados da Assinatura), a fim de que o consumidor consiga atestar a autenticidade do conteúdo recebido. Um nó é produtor quando possui o conteúdo com o nome indicado no pacote de interesse (Nome do Conteúdo) em seu próprio *cache*. Na CCN esse *cache* é chamado *Content Store* (CS) e está presente em todos os nós da rede. O CS armazena os conteúdos produzidos pelo próprio nó ou conteúdos já encaminhados através deste nó. Desta maneira, qualquer nó da rede CCN pode atuar como produtor para qualquer outro nó, desde que possua o conteúdo solicitado no seu próprio *cache*. Forma-se assim na CCN, uma rede de *caches* [40].

2.1.1 Nomeação de Conteúdos

A requisição de conteúdos numa arquitetura ICN está diretamente associada ao esquema de nomeação adotado, uma vez que o roteamento dessa requisição é realizada com base no nome do conteúdo em si. No caso da arquitetura CCN, essa nomeação de conteúdos segue um esquema hierárquico, composto por diversos elementos nominais concatenados, sob formato de um *uniform resource identifier* (URI), que deve identificar de forma exclusiva cada conteúdo ou segmento (*chunk*) de conteúdo da rede. A exclusividade pode ser garantida considerando que os elementos iniciais do nome, de maior nível hierárquico, representem informações do publicador original do conteúdo, e os elementos subsequentes atribuídos de acordo com os atributos e características do conteúdo, conforme demonstrado pela Figura 2.2. No exemplo, o nome de um conteúdo é formado pelo nome que representa o nome de domínio do publicador (*/uff.br*), seguido pelo nome que representa a localização lógica do conteúdo dentro do domínio (*/video/intro.avi*) e pelos nomes que indicam a versão (*/<versão>*) e o número do segmento do conteúdo (*/<chunk #>*).

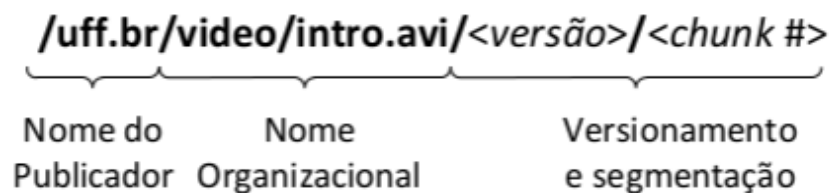


Figura 2.2: Esquema de nomeação de conteúdos na CCN [15].

Como o registro dos nomes de conteúdos não é realizado de forma global na rede, todo

nó consumidor deve ser capaz de resolver localmente o nome do conteúdo desejado para recuperá-lo. Na Figura 2.2, por exemplo, o consumidor deverá saber antecipadamente que o arquivo `intro.avi` está localizado dentro do diretório `video`. Essa é uma dificuldade imposta pelo projeto de nomeação de conteúdos da CCN. Uma solução para esse problema é a adoção de um modelo de nomeação transparente de conteúdos, que permite que os nós consumidores possam resolver imediatamente os nomes de conteúdos desejados. Esse é o modelo no qual baseia-se o esquema de nomeação proposto neste trabalho e que será abordado na Seção 4.1.

Uma vantagem proporcionada pelo esquema de endereçamento hierárquico é que os nomes de conteúdos podem ser agregados, através do maior prefixo de nome comum, e permitindo construir referências resumidas desses conteúdos para buscas futuras, similar ao algoritmo *longest prefix match* utilizado nos protocolos de roteamento intradomínio na Internet.

2.1.2 Encaminhamento de Pacotes

Cada nó CCN possui duas estruturas de dados usadas no encaminhamento de pacotes pela rede: a *Pending Interest Table* (PIT) e a *Forwarding Interest Base* (FIB), além do *Content Store* (CS), utilizado para armazenamento de conteúdos [21]. A Figura 2.3 ilustra o modelo de implementação de um nó CCN.

A PIT é uma tabela responsável por armazenar o estado sobre interesses transmitidos pelo nó e que ainda não foram atendidos pela rede. A PIT também associa as interfaces pelas quais um pacote de interesse foi recebido para, posteriormente, encaminhar o respectivo pacote de conteúdo. Na Figura 2.3 observa-se que o nó recebeu um interesse para o conteúdo com nome `/uff.br/video/intro.avi/1/2` proveniente da interface 0. Ao receber esse conteúdo, o nó poderá reenviá-lo para a interface 0, atendendo ao nó que solicitou o conteúdo.

A FIB registra as interfaces pelas quais um nó recebe pacotes de conteúdo, associando essas interfaces com o nome dos conteúdos recebidos. A FIB atua, portanto, como uma base de informações para o encaminhamento dos pacotes de interesse. Na Figura 2.3, por exemplo, observa-se que conteúdos com o prefixo `/uff.br` já foram recebidos a partir das interfaces 0 e 1. Desta maneira, se novos interesses para esse prefixo chegarem ao nó, o encaminhamento destes pacotes será realizado apenas através das interfaces 0 e 1.

A Figura 2.4 ilustra o fluxograma de funcionamento da arquitetura CCN. Ao receber

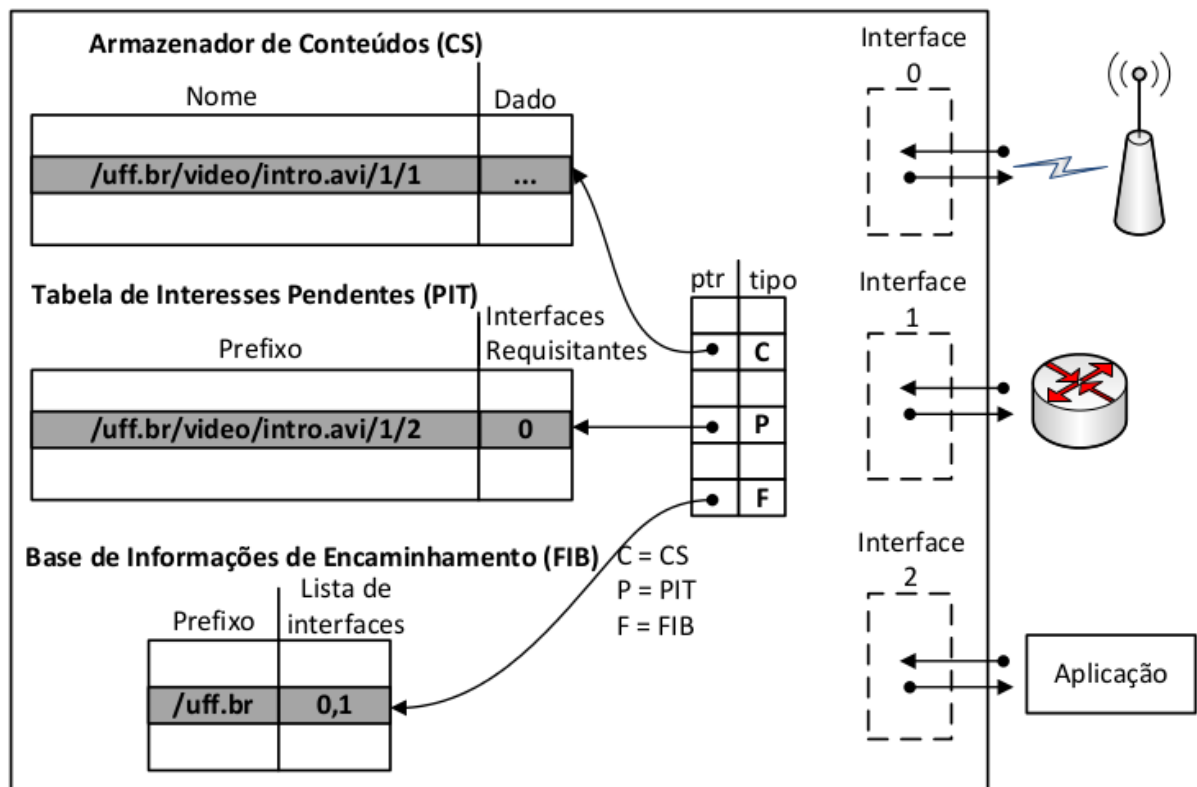


Figura 2.3: Modelo de um nó CCN [17].

um pacote de interesse, o nó primeiramente consulta o seu CS para verificar a existência do objeto (Passo 1). Se encontrar, responde o interesse através do envio do pacote de conteúdo (Passo 2a). Caso contrário, o nó consulta a PIT para verificar a existência de uma solicitação pendente para esse mesmo conteúdo (Passo 2b). Caso já exista esta solicitação, o nó atualiza a lista de interfaces de entrada pelas quais recebeu interesse para o conteúdo e descarta o pacote (Passo 3a). Se não existir uma entrada para o interesse na PIT, uma nova entrada é criada e o nó consulta a FIB em busca de interfaces que levem a algum produtor do conteúdo desejado (Passo 3b). Encontrando informações de encaminhamento, o nó envia o pacote de interesse somente na(s) interface(s) apontada(s) pela FIB (Passo 4a). Não encontrando entradas de encaminhamento na FIB, o nó encaminha o interesse por todas as interfaces disponíveis, a fim de alcançar qualquer produtor do conteúdo desejado (Passo 4b). Todo esse processo é realizado a cada recebimento de um pacote de interesse por cada nó da rede. Como a PIT mantém uma lista de interfaces de entrada para cada interesse recebido, o pacote de conteúdo recebido (Passo 5) é entregue pelo caminho inverso ao percorrido pelos pacotes de interesse (Passo 6a). Caso o nó receba um pacote de conteúdo sem correspondência na PIT, o pacote é descartado (Passo 6b) [50].

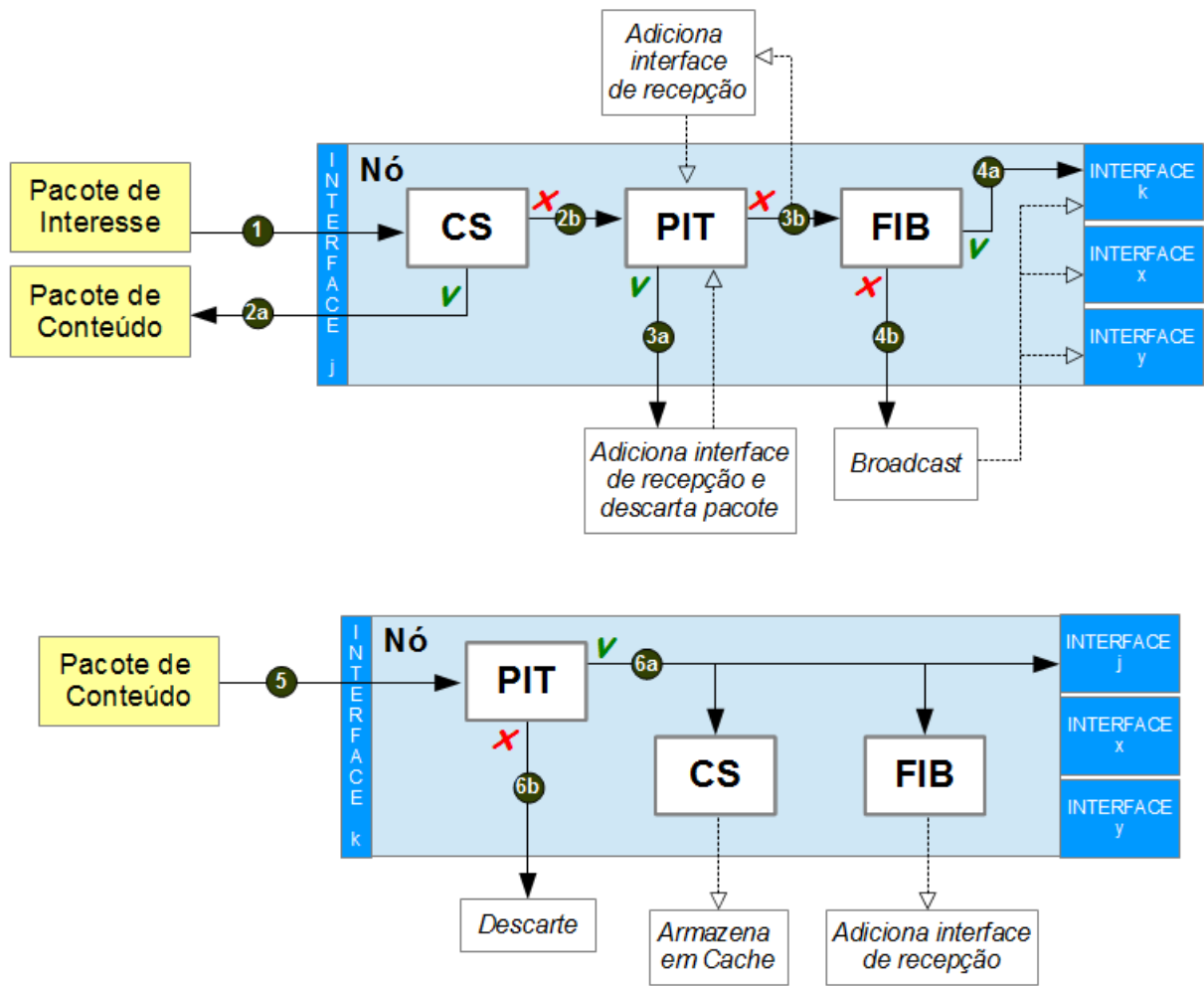


Figura 2.4: Encaminhamento de pacotes de interesse e conteúdos na arquitetura CCN.

2.2 As Virtudes da CCN para as Redes Veiculares

O fato de não exigir a manutenção de uma rota fim-a-fim aliado ao fato de que qualquer nó da rede possa atuar como produtor de conteúdos para seus vizinhos, desde que possua o conteúdo em seu *cache*, faz com que a arquitetura CCN ofereça suporte nativo à mobilidade dos nós [24, 52]. Essa é uma importante característica da CCN que simplifica o processo de comunicação em redes com alto grau de mobilidade, como por exemplo, as redes veiculares.

Considerando, por exemplo, um cenário clássico de aplicação cliente-servidor na arquitetura TCP/IP, novas rotas devem ser calculadas para alcançar o produtor original do conteúdo à medida que a topologia física da rede se altera com a movimentação dos nós. Além disso, os endereços associados à localização dos nós devem ser alterados à medida que eles se movimentam entre os pontos de acesso da rede. Entretanto, na arquitetura CCN, graças à presença de *cache* nos nós da rede, o nó consumidor pode ser atendido

por qualquer outro nó em sua nova área de cobertura, desde que possua o conteúdo de interesse em *cache*. Essa característica pode ser ainda mais explorada, considerando que as redes veiculares usam a comunicação sem-fio. Como naturalmente todos os pacotes são enviados em difusão, todos os vizinhos no raio de cobertura de um produtor podem armazenar oportunisticamente os conteúdos recebidos. Assim, aumenta-se a disponibilidade de conteúdos na rede.

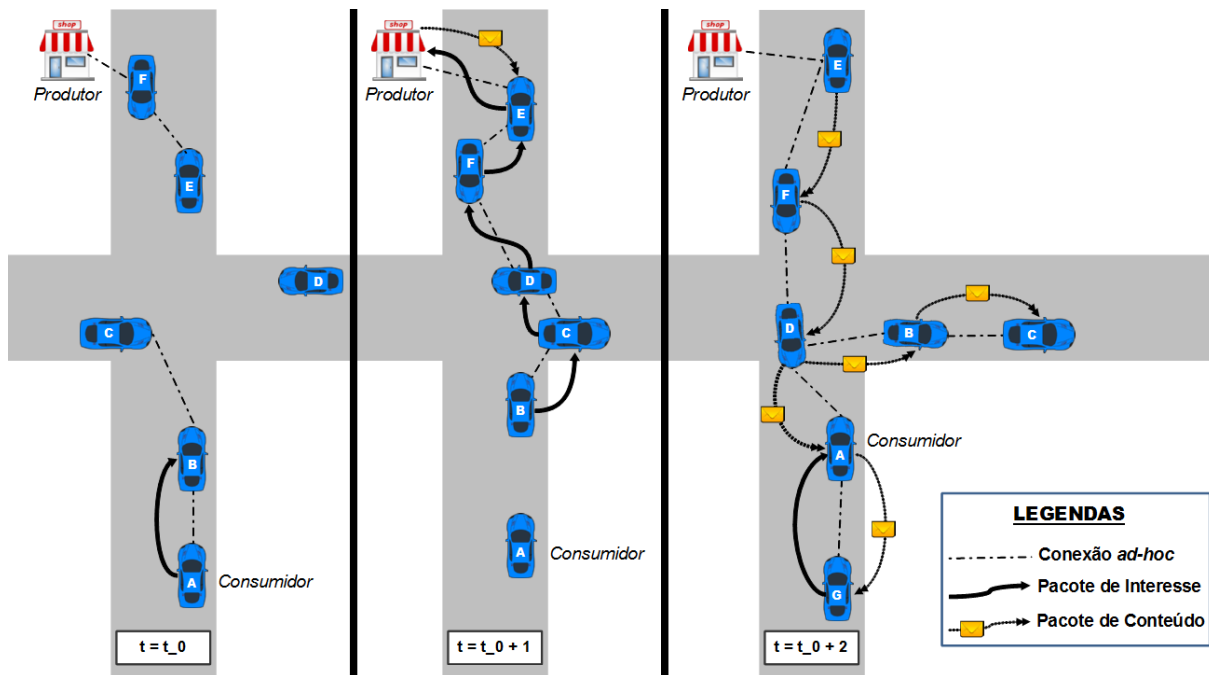


Figura 2.5: Exemplo de operação de uma Rede Veicular Orientada a Conteúdo.

A Figura 2.5 exemplifica algumas vantagens oferecidas pela arquitetura CCN durante a operação em uma rede veicular. No instante $t = t_0$, o nó consumidor A deseja obter um conteúdo, cujo produtor original é representado pela figura de uma loja. Desta forma, A envia um pacote de interesse para o seu único vizinho B. O envio deste pacote de interesse acontece mesmo que naquele instante não exista conectividade fim-a-fim entre o nó consumidor e a fonte do conteúdo. Como os veículos estão em movimento, no instante $t = t_0 + 1$, o grafo de conectividade da rede se altera, e o pacote de interesse é retransmitido pelos nós intermediários B, C, D, F e E, até que é recebido pelo nó produtor. O produtor responde o pacote de interesse recebido, enviando o respectivo pacote de conteúdo. No instante $t = t_0 + 2$, a topologia física da rede novamente é alterada, o pacote de conteúdo é retransmitido pelos nós que possuem entrada na PIT, e o nó consumidor A recebe o pacote de conteúdo a partir do nó D.

Nota-se que a mudança de vizinhança do nó consumidor A, bem como as alterações da topologia da rede durante a fase de requisição de conteúdo, neste caso, não impediu que

a comunicação fosse realizada com sucesso. Além disso, ainda no instante $t = t_0 + 2$, um novo nó consumidor **G** é prontamente atendido pelo nó **A**, que agora também é considerado produtor, pois armazenou o conteúdo em seu *cache*. De maneira similar, os nós **C**, **D** e **E** poderão atuar como produtores deste conteúdo nas regiões da rede para onde se destinam.

É notável, portanto, que a arquitetura CCN oferece nativamente o suporte à comunicação sobre enlaces intermitentes, possibilitando por exemplo, que um veículo transporte conteúdos a regiões desconectadas do produtor original, e aumenta a disponibilidade de conteúdo, considerando que um único produtor consegue satisfazer um ou mais vizinhos consumidores simultaneamente.

Por fim, como a comunicação na arquitetura CCN é orientada à busca de conteúdos, outra vantagem oferecida para o cenário de redes veiculares é que é desnecessário a adoção de mecanismos de atribuição ou gerenciamento de endereços físicos e/ou lógicos aos nós da rede.

2.3 O Problema do *Broadcast Storm*

Um dos potenciais problemas do emprego da arquitetura CCN em redes veiculares é a inundação de pacotes de interesse em redes sem-fio, que pode acarretar no problema de *broadcast storm* [6, 43]. Isso ocorre porque nas redes sem-fio, geralmente, os nós possuem apenas uma interface de rede, operando em difusão. Assim, todo pacote de interesse recebido pelo nó será encaminhado pela mesma interface de recepção, e todos os vizinhos desse nó receberão o pacote de interesse. A FIB, para estes casos, é pouco eficiente na tarefa de encaminhamento de pacotes de interesse, porque possui apenas uma única entrada, que associa todas as informações de encaminhamento à única interface existente. Entretanto, ainda que um nó possua múltiplas interfaces, as entradas da FIB poderiam se tornar obsoletas rapidamente, devido ao alto grau de mobilidade dos veículos.

Como consequência da ineficiência da tabela FIB em uma rede sem-fio, toda requisição de conteúdos em uma rede veicular orientada a conteúdo é realizada através da inundação de pacotes de interesses pela rede, com o objetivo de maximizar o alcance dessa solicitação a qualquer produtor válido do conteúdo buscado [17], como exemplificado pela Figura 2.6.

Cada nó da rede ao receber um novo pacote de interesse, reenvia-o para todos os seus vizinhos. Essa inundação prossegue até que se encontre algum produtor válido na rede, e até que todos os pacotes de interesses, ora disseminados, sejam satisfeitos pelo respectivo conteúdo. Desta forma, pode-se argumentar que a simples requisição de um conteúdo

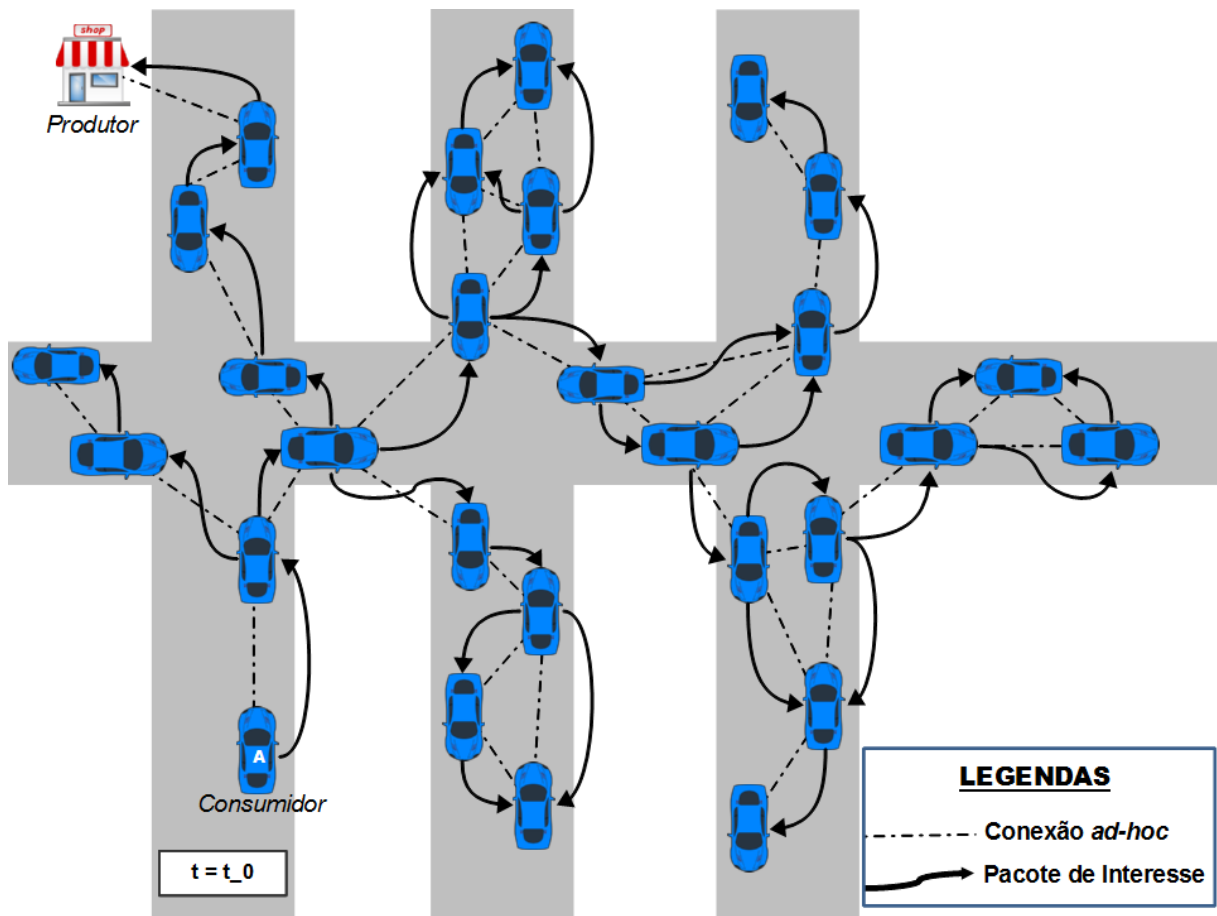


Figura 2.6: *Broadcast storm* causado pela inundação de pacotes de interesse.

pouco popular e cuja fonte original esteja distante, comprometa significativamente os recursos disponíveis da rede, como banda passante e memória do *cache* dos nós, além de causar o aumento da competição pelo meio, atraso de entrega e probabilidade de colisão.

Outro agravante inerente às redes veiculares é o fato de que as informações distribuídas pelas aplicações, muitas vezes, são sensíveis ao tempo em que foram geradas, como por exemplo, as aplicações de auxílio ao condutor que informam congestionamentos nas vias. Como consequência, o *cache* desses conteúdos pode se tornar obsoleto com o passar do tempo, forçando que novos pacotes de interesses sejam encaminhados até suas fontes produtoras originais recorrentemente, agravando o problema do *broadcast storm*.

Portanto, apesar dos benefícios proporcionados pela arquitetura CCN às redes sem-fio, é preciso desenvolver mecanismos que reduzam o problema do *broadcast storm*, para que tal arquitetura possa servir como base para a operação das redes veiculares.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Existem diversos trabalhos na literatura que investigam os benefícios e o desempenho do paradigma de redes orientadas a conteúdo, em sua maioria baseados na arquitetura CCN, como substrato para a operação das redes veiculares.

Wang *et al.* [47] analisam o desempenho da taxa de entrega de conteúdos em um cenário de rede veicular infra-estruturada, comparando a solução IP móvel [22] e a proposta dos autores baseada na arquitetura CCN, denominada *Data from Mobiles using Named Data* (DMND). Os resultados demonstram que a taxa de entrega de conteúdos a partir da solução IP móvel cai drasticamente à medida que a velocidade média dos nós aumenta, com o pior caso chegando a entregar, aproximadamente, apenas 9% dos dados, no cenário no qual os nós se movimentam a velocidades entre 10-20 milhas por segundo. A proposta DMND apresenta um desempenho que pouco varia em função do cenário, com taxa de entrega acima de 97%, mesmo em situações nas quais a velocidade média de deslocamento dos nós está entre 40-50 milhas por segundo. Para tratar o problema de encaminhamento dos pacotes de interesse, os autores utilizam uma infra-estrutura estacionária na rede, que anuncia rotas para os conteúdos acessíveis por cada ponto de acesso, permitindo o direcionamento dos pacotes de interesse a regiões próximas dos nós produtores. Essa solução, entretanto, além de exigir uma infra-estrutura estacionária para o encaminhamento dos pacotes de conteúdo, requer também que os nós consumidores conheçam *a priori* a nomeação dada aos conteúdos anunciados. Sendo assim, o modelo proposto atende aplicações como a sugerida pelos autores, que é a coleta de dados de desempenho automotivo para posterior análise das montadoras, porém é pouco adequado para cenários de comunicação veículo-para-veículo (V2V) e para aplicações mais complexas, tais como aplicações de auxílio à navegação.

Meisel *et al.* [30, 31] e, mais recentemente, Amadeo *et al.* [7] analisam o desempenho

de propostas baseadas na arquitetura CCN em relação ao protocolo AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*) [36], que é um protocolo de roteamento em redes móveis *ad-hoc* baseadas na arquitetura TCP/IP. O protocolo *Listen First, Broadcast Later* (LFBL) [30, 31] consegue obter uma taxa de entrega de dados aproximadamente 5 vezes superior à obtida pelo protocolo AODV, além de reduzir sensivelmente a sobrecarga de comunicação da rede, graças ao seu algoritmo de seleção de nós retransmissores. Neste algoritmo, são necessárias duas fases para a comunicação. Na fase de requisição, pacotes para descoberta de produtores (REQ) são difundidos por toda a rede. Na fase de dados, o nó consumidor envia pacotes de interesse direcionados ao produtor selecionado. Esses pacotes carregam informações de geo-localização, tanto do nó consumidor quanto do nó produtor escolhido. Essas informações de geo-localização são os parâmetros de entrada para o algoritmo de seleção de nós retransmissores que, em função da distância calculada para o produtor do conteúdo, indica quando um nó intermediário irá ou não retransmitir o pacote de interesse. Os cálculos da distância são armazenados e atualizados por todos os nós da rede, em tabelas de distância, que posteriormente são utilizadas como métricas para o roteamento de novos pacotes de interesse. Embora o LFBL apresente avanços para a redução do grau de inundação dos pacotes de interesse pela rede, graças ao algoritmo de seleção de retransmissores, nota-se que o problema ainda persiste durante a fase de descoberta de produtores. Além disso, a manutenção de uma tabela de distância para todos os possíveis conteúdos da rede não é considerada uma solução escalável, dada a grande diversidade de conteúdos não agregáveis que podem co-existir na rede. Apesar disso, os autores finalizam o trabalho afirmando que a arquitetura CCN representa uma solução promissora para o desenvolvimento de redes *ad-hoc* efetivas e eficientes.

O *Enhanced-Content-centric multiHop wireless NETwork* (E-CHANET) [7] é um *framework* construído sobre as premissas da arquitetura CCN. Nessa proposta, novos campos de cabeçalho são introduzidos nos pacotes de interesse e conteúdo, como por exemplo, contador de saltos percorridos pelo pacote, o identificador do produtor e a quantidade de saltos esperada para alcançá-lo. Tabelas de produtores de conteúdos também são introduzidas e atualizadas em cada nó da rede. Essa tabela armazena a relação de conteúdos conhecidos pelo nó e a respectiva distância, em saltos, dos produtores destes conteúdos. Quando um consumidor desconhece algum produtor disponível na rede, o encaminhamento é feito através de inundação, sem especificar nenhum produtor preferencial. Porém, a medida que os produtores encaminham pacotes de conteúdo, a tabela de produtores dos nós é preenchida, armazenando o identificador do produtor, bem como o número de saltos percorridos pelo pacote de conteúdo. Quando um nó recebe um pacote de interesse com o

identificador de produtor preferencial preenchido, este nó somente irá realizar a retransmissão caso a distância percorrida pelo pacote somada à sua própria distância para o produtor seja equivalente à quantidade de saltos esperada para alcançá-lo. Isso evita que os nós que não fazem parte da menor rota entre o consumidor e o produtor re-encaminhem o pacote de interesse. As simulações realizadas considerando um cenário de mobilidade urbana, demonstram que o E-CHANET alcançou resultados satisfatórios em relação à solução AODV-TCP/IP. Os autores constataram que os procedimentos realizados para o roteamento de pacotes, com o E-CHANET, envolveu um número menor de nós, o que oferece menor sobrecarga de transmissão e consumo de energia, permitindo maior escalabilidade à rede. Entretanto, novamente o problema de inundação de interesses para novos conteúdos não foi tratado e a grande diversidade de conteúdos da rede podem tornar a tabela de produtores não escalável. Além disso, a avaliação da proposta não considera um modelo de mobilidade veicular, que possui características muito distintas das simuladas pelos autores.

Yu *et al.* [51] introduzem o conceito de *Vehicle Cloud* (VC), um conjunto de serviços oferecidos por uma malha V2V orientada a conteúdos. Nesta análise, os autores comparam modelos de descoberta e roteamento de conteúdos, considerando um modelo proativo, representado pela proposta de *Bloom-filter Routing* (BFR) e um modelo reativo, caracterizado pela adoção da arquitetura CCN. Os autores também classificam em três diferentes grupos os serviços oferecidos por uma VC: (i) serviço de compartilhamento de dados populares, p.e. aplicações para monitoramento de tráfego; (ii) serviço de compartilhamento de dados não-populares, p.e. aplicações de mensagem instantânea; e (iii) serviço de dados não-compartilháveis, p.e. aplicações contendo dados sigilosos ou que não podem ser armazenados em cache devido ao tamanho. Os resultados demonstram que o modelo de roteamento proativo se adequa melhor aos conteúdos não compartilháveis, enquanto que a arquitetura CCN, reativo, oferece melhor desempenho para os serviços de conteúdos compartilháveis e que são populares na rede. Os autores propõem então uma abordagem híbrida, que combina estratégias de roteamento proativas e reativas para atender uma variedade maior de aplicações. O *framework* proposto nesta dissertação, entretanto, foi projetado para atender aplicações cujos dados são de natureza pública, como por exemplo, aplicações de auxílio a navegação. Outros tipos de aplicações, cujos dados são de ordem privada, estão fora do contexto da proposta apresentada.

Bai *et al.* [10] introduzem o *framework Information-Centric Networking on Wheels* (IC NoW), que é um conjunto de protocolos para permitir o desenvolvimento de aplicações veiculares distribuídas. Este *framework* não baseia-se na arquitetura CCN, mas

em um conjunto de sete primitivas (*reject*, *accept*, *consume*, *store*, *remove*, *broadcast* e *process*) que permitem a comunicação orientada a conteúdos. Entretanto, neste modelo a comunicação não é dirigida pelo nó consumidor, portanto, os nós não possuem autonomia para solicitar informações à rede quando necessário.

Kniess *et al.* [25] apresentam protocolos de descoberta e seleção de serviços em redes móveis *ad hoc* de múltiplos saltos. Os autores exploram os benefícios da proposta em um cenário de catástrofe ambiental, onde os sistemas de comunicação primários estão indisponíveis. Nesse cenário, o tempo para descoberta de serviço é considerado crítico para o tratamento da catástrofe. Dessa forma, o mecanismo de descoberta proposto, LADS (*Location Aware Discovery Service*) ajusta uma área de busca com base na velocidade máxima que um nó da rede pode atingir e no tempo máximo para atendimento da solicitação. O mecanismo LASS (*Location Aware Selection Service*) é responsável por selecionar os provedores do serviço descobertos. Essa seleção leva em consideração a localização do provedor e a velocidade de deslocamento do nó. Embora os autores consigam reduzir a sobrecarga de pacotes disseminados na rede para a descoberta de serviços, a proposta emprega o protocolo o OLSR (*Optimized Link State Routing*) para realizar o roteamento dos pacotes. Esse protocolo diverge das características das arquiteturas orientadas a conteúdo, e portanto, dos benefícios agregados por elas, conforme discutidos na Seção 2.2.

Grassi *et al.* [19] apresentam o protótipo *VANET via Named Data Networking* (V-NDN), que é uma implementação da arquitetura CCN com modificações pontuais necessárias para a operação em redes móveis *ad-hoc*. Para reduzir a perda de pacotes em decorrência de colisões no meio sem-fio, os autores introduzem um algoritmo que provê uma janela de contenção para a retransmissão de pacotes. O período desta janela de contenção é calculado em função da distância percorrida pelo pacote. Desta forma, são inseridos novos campos em cada pacote, que contém as marcações geográficas do ponto em que foi retransmitido. Para prova de conceito, foram realizados testes experimentais do protótipo V-NDN em um *testbed* veicular da Universidade da Califórnia (UCLA), além de simulações com a ferramenta ndnSIM [1]. Os autores destacam os benefícios alcançados com a adoção do V-NDN, como a possibilidade de comunicação oportunista, a resiliência a desconexão entre consumidor e produtor, e a capacidade da rede atender a nós sem a necessidade de centralização de dados na rede, nem uso de servidores remotos. Apesar disso, os autores salientam que existem muitos desafios a serem superados, como o desenvolvimento de novas estratégias de encaminhamento que possam reduzir a sobrecarga de comunicação na rede, esquemas de nomeação de conteúdos adequados às aplicações veiculares e novos métodos que possam garantir a segurança e privacidade dos dados sem

exposição da identidade dos produtores.

Arnould *et al.* [9] propõem uma arquitetura baseada na CCN para disseminar informações de natureza crítica, em uma rede veicular híbrida. Para isso, introduzem um novo tipo de pacote denominado *Event Packet*. Esse pacote é propagado pela rede, mesmo quando não há emissão de interesses explícitos, e serve para alertar os nós sobre eventos emergenciais, como acidentes de trânsito ou zonas de perigo. Entretanto, essa proposta modifica a arquitetura original da CCN e aumenta sua complexidade, pois os autores definem que o controle de disseminação dos *Event Packets* é realizado através da reserva da banda utilizada por esses pacotes.

Amadeo *et al.* propõem a arquitetura CRoWN [4] e posteriormente a CCVN (*content-centric vehicular networking*) [3, 5] para lidar com os desafios existentes nas redes veiculares. Nestes trabalhos, os autores propõem a divisão dos pacotes de interesse em duas sub-classes: os interesses básicos (*B-Int*) e os interesses avançados (*A-Int*). Um pacote *B-Int* é disseminado pela rede para descobrir produtores de um conteúdo e requisitar o primeiro segmento deste, enquanto que o pacote *A-Int* é utilizado para requisitar os segmentos subsequentes do conteúdo a partir dos produtores previamente descobertos. Além disso, uma nova estrutura de dados, denominada *Content Provider Table* (CPT) é introduzida no mecanismo em substituição à base FIB. A CPT armazena informações sobre os produtores já descobertos na rede, associando o endereço MAC destes nós aos respectivos conteúdos, de maneira similar à apresentada em [7]. Entretanto, a premissa de independência dos conteúdos quanto a sua localização física é quebrada, representando uma ruptura conceitual em relação à proposta original da CCN, e podendo inclusive comprometer o suporte à mobilidade dos nós em uma rede veicular.

Wang *et al.* [48] propõem um mecanismo de disseminação de pacotes, cujo objetivo principal é a redução da latência de entrega de conteúdos. Este mecanismo emprega um conjunto de temporizadores para coordenar o envio de pacotes entre os diversos nós da rede, reduzindo o problema de disputa pelo meio de transmissão e a probabilidade de perdas de pacotes. Os autores definem quatro temporizadores:

- *Collision-avoidance timer*, que é um *backoff* aleatório para reduzir a probabilidade de colisão no envio de pacotes entre nós vizinhos;
- *Pushing timer*, uma janela de contenção com valor inversamente proporcional à distância do último retransmissor do pacote. Para isso, o mecanismo baseia-se num esquema de rotulação de pacotes, através do qual, a cada salto são agregadas

etiquetas contendo as coordenadas geográficas da posição em que os pacotes são retransmitidos. Assim, o valor calculado para o este temporizador privilegia os nós mais distantes do último transmissor, pois possuem um tempo de espera para retransmissão menor do que os nós intermediários;

- *Layer retransmission timer*, que funciona como um mecanismo de proteção para os casos de perda de pacote em nível de enlace. Após a transmissão de um pacote, o nó mantém este pacote em uma fila de retransmissão até que perceba que o mesmo fora retransmitido por um nó adiante. Caso o temporizador estoure para o pacote em questão, uma nova tentativa de transmissão é realizada pelo nó, até um limite estabelecido de tentativas.
- *Application retransmission timer*, que é um temporizador que dispara o reenvio de interesses em caso de não recebimento do conteúdo, principalmente devido ao problema de intermitência de conectividade e o particionamento da rede veicular.

Os resultados demonstram que o protocolo consegue obter conteúdos de produtores distantes 10 km do consumidor em um tempo inferior a 1 s na maioria dos cenários avaliados, entretanto, esse desempenho é afetado conforme a redução do nível de densidade da rede. Embora o mecanismo proposto tenha como objetivo a redução da latência na entrega de conteúdos, o mesmo não estabelece limites para a disseminação dos pacotes de interesses e, portanto, o problema da inundação ainda persiste. Além disso, a avaliação da proposta é incipiente, pois não considera o impacto da mobilidade dos veículos nos resultados obtidos.

Considerando os trabalhos relacionados às redes veiculares orientadas a conteúdo, não existem propostas na literatura que tratam do problema de inundação de pacotes de interesses a partir da limitação geográfica da área de dispersão destes pacotes. Esta nova abordagem pode reduzir a emissão de pacotes de interesse, sem afetar drasticamente outras métricas de desempenho, sendo necessário para isto, o desenvolvimento de algoritmos para determinar eficientemente esta área de disseminação de pacotes.

Este trabalho tem como objetivos propor e avaliar um *framework* para permitir a comunicação das redes veiculares orientadas a conteúdo baseadas na arquitetura CCN. Este framework realiza a disseminação eficiente de pacotes de interesse com base em um esquema de nomeação específico e que é transparente para os nós consumidores, reduzindo o problema de inundação da rede e conservando as características originais da arquitetura CCN.

Proposta	Baseado na Arquitetura CCN	Implementa Controle de Inundação	Requer Infra- Estrutura
DMND	Sim	Sim	Sim
LFBL	Sim	Parcialmente	Não
E-CHANET	Sim	Parcialmente	Não
VC	Sim	Não	Não
IC-NoW	Não	Não	Não
LADS/LASS	Não	Sim	Não
V-NDN	Sim	Não	Não
CRoWN	Sim	Parcialmente	Não
Rapid Traffic Dissemination	Sim	Não	Não
GeoZone	Sim	Sim	Não

Tabela 3.1: Quadro comparativo de propostas para RVOCs.

A Tabela 3.1 apresenta o quadro comparativo das principais propostas de redes veiculares orientadas a conteúdo citadas na literatura. O último item desta tabela, descreve as características do GeoZone, que é a proposta apresenta nessa dissertação. O GeoZone será discutido em detalhes no próximo capítulo.

Capítulo 4

O Framework GeoZone

A proposta desta dissertação é um *framework* para disseminação eficiente de pacotes de interesse em redes veiculares orientadas a conteúdo, que reduz o problema da inundação desses pacotes e que não exige modificações conceituais da arquitetura CCN. Esse *framework*, denominado GeoZone, é composto por dois mecanismos: o *Geographically-Based Naming Scheme* e o *Zone Forwarding Mechanism*, detalhados a seguir.

4.1 O Esquema de Nomeação GBNS (*Geographically-Based Naming Scheme*)

A CCN define um esquema hierárquico para nomeação de conteúdos, descrito na Seção 2.1.1, no qual elementos iniciais do nome possuem nível hierárquico maior do que os posteriores. A partir da definição dos nomes dos objetos da rede, nós consumidores podem enviar pacotes de interesse para a obtenção de dados. Entretanto, um desafio do projeto de nomeação de conteúdos é a transparência destes nomes para os nós consumidores, ou seja, permitir que os nós que necessitem da informação saibam, *a priori*, o nome do objeto desejado. Uma das vantagens oferecidas pelo esquema de nomeação hierárquica, é permitir a associação de diferentes níveis de semântica ao nome do conteúdo, como a identificação de aplicações, uso de escopos temporais, geográficos e espaciais [49]. Essa característica serve de base para o esquema de nomeação proposto neste trabalho, o *Geographically-Based Naming Scheme* (GBNS).

O GBNS define que os componentes mais significativos do nome do conteúdo sejam obrigatoriamente associados às coordenadas geográficas (longitude e latitude) do produtor original do conteúdo. Por isso, assume-se que os nós da rede possuem dispositivos GPS (*Global Positioning System*). Níveis hierárquicos menos significativos devem ser usados

para identificar a aplicação alvo (*application*), além do tempo (*timestamp*) relativo ao conteúdo que se deseja, conforme a estrutura a seguir:

`geozone://longitude/latitude/application/timestamp`

Com essa estrutura, por exemplo, é possível obter a programação do dia em um cinema, assumindo que há uma unidade de acostamento nesse local, que possa responder aos pacotes de interesse. Para isso, usuários devem enviar pacotes de interesse com as coordenadas `longitude` e `latitude` do cinema, o identificador do cinema (`application`) e o dia de interesse (`timestamp`). Todos esses parâmetros podem ser facilmente obtidos a partir da rota traçada pelo GPS conectado ao carro, ou através de uma aplicação de mapas num *smartphone* dos passageiros. Em outro exemplo de aplicação, usuários podem estar interessados na situação atual do trânsito em uma dada área. Assim podem enviar pacotes de interesse com a `longitude` e `latitude` da área desejada, a informação que desejam obter (p.e. velocidade média) informada pelo elemento `application` e a hora atual (`timestamp`). Veículos que estão, ou que passaram recentemente pela área apontada nas coordenadas, podem responder aos interesses, desde que armazenem periodicamente sua velocidade média e coordenadas. O funcionamento detalhado de aplicações está fora do escopo deste trabalho.

É importante salientar que o GBNS não rompe com a premissa de independência dos conteúdos em relação à sua localização física, que é uma característica essencial da arquitetura CCN. A nomeação de conteúdos baseada na identificação geográfica dos produtores originais não indica que somente o nó que está nessa coordenada pode responder um pacote de interesse. A nomeação apenas indica o interesse em informações daquelas coordenadas. Portanto, o esquema não impede que outros nós da rede utilizem-se de *caches* para armazenar estes conteúdos e atuar também como produtores.

Outra característica do GBNS é que ele é transparente para os nós consumidores, ou seja, a nomeação georeferenciada permite que os nós que buscam a informação saibam, *a priori*, o nome do objeto desejado. Através do dispositivo GPS é possível determinar as coordenadas dos pontos de interesses com base na rota previamente estabelecida, portanto, o próprio consumidor pode criar e emitir interesses destinados a aplicações veiculares na CCN.

O GBNS difere do esquema de nomeação proposto por Wang *et al.* [47, 49], pois, ao invés de representar a aplicação como o componente de maior nível hierárquico, o GBNS apresenta as informações de geo-localização como os componentes de mais alto nível.

Isto permite que nós consumidores tenham maior controle e autonomia para requisição dos conteúdos desejados, como por exemplo, a possibilidade de solicitar a um ponto de interesse a lista de aplicações disponíveis. Além disso, evita que um interesse seja tratado pela mesma aplicação em produtores localizados em diferentes regiões.

4.2 O Mecanismo de Encaminhamento ZFM (*Zone Forwarding Mechanism*)

A requisição de conteúdo nas redes veiculares orientadas a conteúdo é baseada na inundação de pacotes de interesse por toda a rede. Esta abordagem, no entanto, pode comprometer a escalabilidade da rede em função do problema de *broadcast storm*, como visto na Seção 2.3. Para tratar esse problema, este trabalho propõe o *Zone Forwarding Mechanism* (ZFM). Este mecanismo define uma zona de disseminação de pacotes de interesse com base nas coordenadas geográficas do nó consumidor e do próprio nome do conteúdo desejado. Isso só é possível graças ao esquema de nomeação GBNS, cujos nomes carregam as referências geográficas do ponto alvo de interesse. Uma vez definida essa zona de disseminação, somente nós que estejam dentro dessa zona ao receber o pacote de interesse devem reencaminhá-lo. Assim, somente parte da rede é inundada.

Para definir a zona de disseminação, assume-se que conteúdos de interesse têm maior probabilidade de estar em uma zona a frente da posição atual e na mesma direção de deslocamento do nó consumidor. Por exemplo, ao receber um caminho traçado por seu dispositivo GPS, um usuário deseja saber se as vias pelas quais irá passar estão congestionadas ou se existem bons restaurantes no local de destino. As informações dos locais por onde ele já passou não são de interesse. Portanto, considera-se que a probabilidade de um conteúdo chegar ao consumidor a partir de um dos nós situados entre ele a posição indicada no nome do conteúdo é maior do que a probabilidade desse mesmo conteúdo chegar através dos nós situados na direção oposta de deslocamento do nó consumidor.

A Figura 4.1 ilustra e exemplifica a definição da zona de disseminação. Ela representa a região central da cidade do Rio de Janeiro e mostra três veículos, C_1, C_2 e C_3 , que desejam obter informações de trânsito dos pontos P_1, P_2 e P_3 , no qual existem unidades de acostamento. No exemplo, foi considerado que a zona de disseminação possui o formato de uma área retangular.

Considere a zona de disseminação entre os pontos C_3 e P_3 , definida pela área sombreada. Esta zona é calculada, como todas as outras, da seguinte forma. Sejam $P_c(x_c, y_c)$ as

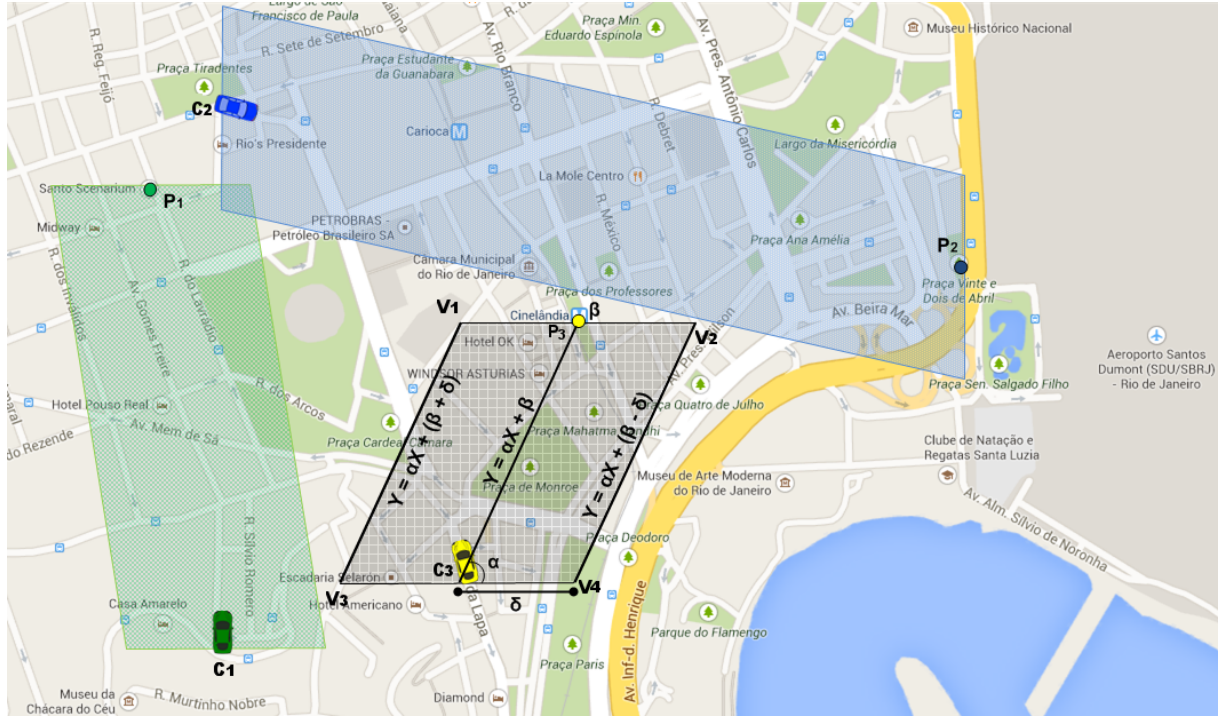


Figura 4.1: Exemplos de zona de disseminação definidas pelo GeoZone.

coordenadas geográficas do nó consumidor e $P_p(x_p, y_p)$ as coordenadas do ponto-alvo de interesse, a Equação 4.1 define a reta entre esses dois pontos, na qual α e β representam, respectivamente, os coeficientes angular e linear da reta. Os valores α e β são calculados pelas Equações 4.2 e 4.3.

$$Y = \alpha X + \beta \quad (4.1)$$

$$\alpha = \Delta y / \Delta x = (y_c - y_p) / (x_c - x_p) \quad (4.2)$$

$$\beta = y_c - \alpha x_c \quad (4.3)$$

A zona de disseminação de interesses é, então, definida pelo polígono delimitado por duas retas paralelas à reta definida pelos pontos P_c e P_p , dadas pelas Equações 4.4 e 4.5.

$$Y' = \alpha X' + (\beta + \delta) \quad (4.4)$$

$$Y'' = \alpha X'' + (\beta - \delta) \quad (4.5)$$

Tem-se, portanto, a constante δ , que define as margens laterais da área em torno da reta que une P_c e P_p , e que delimita a zona de disseminação de interesses. Essa constante é definida de acordo com o grau de inundação que se deseja para a rede, ajustando de forma proporcional o aumento ou a redução da área de disseminação estabelecida pelo mecanismo ZFM.

Os vértices que definem o polígono da zona de disseminação de interesses podem ser obtidos através das Equações 4.6 a 4.9.

$$V1 = \begin{cases} (x_c, \alpha x_c + (\beta + \delta)) & \text{se } |\alpha| < 1 \\ ((y_p - (\beta + \delta))/\alpha, y_p) & \text{se } |\alpha| \geq 1 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$V2 = \begin{cases} (x_p, \alpha x_p + (\beta + \delta)) & \text{se } |\alpha| < 1 \\ ((y_p - (\beta - \delta))/\alpha, y_p) & \text{se } |\alpha| \geq 1 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$V3 = \begin{cases} (x_c, \alpha x_c + (\beta - \delta)) & \text{se } |\alpha| < 1 \\ ((y_c - (\beta + \delta))/\alpha, y_c) & \text{se } |\alpha| \geq 1 \end{cases} \quad (4.8)$$

$$V4 = \begin{cases} (x_p, \alpha x_p + (\beta - \delta)) & \text{se } |\alpha| < 1 \\ ((y_c - (\beta - \delta))/\alpha, y_c) & \text{se } |\alpha| \geq 1 \end{cases} \quad (4.9)$$

Ao receber um pacote de interesse, cada nó deve executar um teste de pertinência, definido pelo Algoritmo 1, para saber se está ou não inserido dentro da zona de disseminação desse pacote. Para tanto, o consumidor original, ou seja, aquele que gera o pacote de interesse inicial, adiciona uma etiqueta contendo suas coordenadas geográficas no pacote. A esta etiqueta dá-se o nome de *Source Position Tag* (SPT). Por simplificação, nas simulações realizadas, foi adicionado um campo ao pacote de interesse para armazenar essa etiqueta. Dessa forma, qualquer nó que receba esse pacote de interesse, possui a posição do consumidor inicial e a posição do produtor, informada no nome do conteúdo, e pode calcular os vértices que definem a zona de disseminação segundo as Equações 4.6 a 4.9. Como conhece sua posição atual, pois possui um dispositivo GPS, o nó consegue determinar facilmente se deve ou não reencaminhar o pacote de interesse.

Comparado à arquitetura CCN original, o GeoZone exige processamento adicional apenas quando os nós executam a função de pertinência da zona de disseminação. Esta função, de complexidade $O(n)$, verifica se o nó está no interior de um polígono, cujo pontos são facilmente calculados. Assim, considera-se que esse processamento adicional é

pequeno, e não compromete o desempenho da rede.

Algoritmo 1 Process_Interest_ZFM (*interest*)

```

  consumer_position ← extract_source_position_tag ( interest )
  producer_position ← extract_producer_position ( interest )
  actual_position ← get_position ( )
  ZFM ← set_ZFM ( consumer_position , producer_position )
  se inside_ZFM ( actual_position , ZFM ) então
    forward ( interest )
  senão
    discard ( interest )
  fim se

```

Para reduzir a probabilidade de colisões no interior da zona de disseminação definida pelo ZFM, o GeoZone implementa também parte do mecanismo proposto por Wang *et al.* [48]. São usados os temporizadores: *collision-avoidance timer*, *pushing timer* e *layer retransmission timer*, discutidos no Capítulo 3.

4.3 Políticas do *Framework* GeoZone

O GeoZone visa a redução da inundação de pacotes de interesse, limitando o número de nós receptores destes pacotes. Consequentemente, menos nós da rede podem se tornar possíveis encaminhadores de conteúdo, pois não alimentam a tabela PIT com o interesse pendente.

Para avaliar o impacto do *framework* proposto na entrega de conteúdos, são introduzidas duas variantes do GeoZone, que diferem em relação à política de armazenamento e encaminhamento de conteúdos na rede: o GeoZone não-proativo e o GeoZone proativo.

4.3.1 GeoZone Não Proativo

O GeoZone não-proativo opera conforme a estratégia de encaminhamento de conteúdos da arquitetura CCN original. Os pacotes de conteúdo são armazenados e retransmitidos somente pelos nós que possuem a entrada de interesse correspondente na tabela PIT. Caso algum nó receba um pacote de conteúdo, mas não apresente uma entrada na PIT para esse conteúdo, este nó irá realizar o descarte do pacote.

Essa estratégia aplicada ao GeoZone implica que apenas os nós que, durante a fase de propagação de interesses estavam dentro da zona de disseminação definida pelo ZFM, tenham a permissão para armazenar e retransmitir o pacote de conteúdo. Entretanto, como

será discutido no Capítulo 5, em redes veiculares esta solução pode ser pouco eficiente, pois não há garantias de que os nós fiquem em uma mesma zona por um dado período de tempo, uma vez que podem se movimentar.

4.3.2 GeoZone Proativo

O GeoZone proativo, por outro lado, emprega mecanismos de *cache* oportunista e retransmissão proativa de conteúdos [26, 38]. Com o uso de *cache* oportunista, um nó pode armazenar um conteúdo em seu CS mesmo sem ter enviado previamente um interesse por ele. Desta forma, mesmo não possuindo uma entrada na PIT para aquele conteúdo, o nó entende que o armazenamento desse conteúdo em seu CS pode ser útil para seus vizinhos atuais ou futuros. Além disso, os nós também realizam a retransmissão de conteúdos proativamente. Nesta abordagem, os pacotes de conteúdo recebidos pelos nós são retransmitidos aos vizinhos, mesmo que não exista o registro de interesse pendente para aquele conteúdo na tabela PIT do nó. Assim, um dado objeto é popularizado na rede. A retransmissão de conteúdos obedece aos mesmos mecanismos temporizadores utilizados nas transmissões de pacotes de interesse, conforme discutido no final da Seção 4.2. O objetivo é aumentar o número de cópias desse conteúdo na rede para que potenciais consumidores possam recuperá-lo a partir de nós mais próximos.

Em redes altamente dinâmicas, a disseminação de conteúdos populares é benéfica, pois permite que os nós levem conteúdos a uma maior quantidade de vizinhos. Dessa forma, aumenta-se o número de oportunidades de entrega de conteúdo, reduzindo o número de saltos necessários para a obtenção do conteúdo, além de facilitar a comunicação entre regiões desconexas da rede [38, 46].

Capítulo 5

Avaliação

Neste capítulo apresenta-se a avaliação de desempenho do *framework* GeoZone. O simulador ndnSIM [1] é utilizado para realizar as simulações dessas propostas. O ndnSIM¹ é um simulador de eventos discretos, baseado no simulador NS3², especialmente desenvolvido para propósitos de avaliação de pesquisas em CCN e cuja aceitação é verificada pela ampla utilização da ferramenta pela comunidade científica em trabalhos da área. A seguir, descrevem-se os cenários de simulação e as métricas de desempenho avaliadas.

5.1 Parâmetros de Simulação

Em todos os cenários de simulação, os nós estão equipados com uma interface padrão IEEE 802.11a operando em modo *ad-hoc*, como alternativa ao padrão DSRC (*Dedicated Short-Range Communication*) que não é disponível no simulador. O modelo de propagação utilizado é o definido pela sub-classe `ns3::YansWifiPhy`, com potência de transmissão de 5 dbm. A modulação do sinal é baseada em OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) com taxa de transmissão de 24 Mb/s. Nos temporizadores *collision-avoidance timer*, *pushing timer* e *layer retransmission timer* adotados no *framework* GeoZone, foram configurados os mesmos valores definidos por Wang *et al.* [48], que são os valores máximos de 2 ms, 5 ms e 50 ms, respectivamente. O número máximo de tentativas para o mecanismo *layer retransmission timer* também permaneceu em 8 tentativas. Todos os nós da rede possuem *cache* com espaço de 10000 bytes e política de descarte LRU (*Least Recently Used*).

Os pacotes de conteúdo contêm carga útil fixa de 300 bytes e a constante δ , que

¹Disponível em <http://ndnsim.net>

²Disponível em <http://www.nsnam.org/>

delimita a zona de disseminação de interesses no GeoZone, é definida com valor de 200 m. O tempo máximo de simulação para todos os cenários é de 300 s. Nas simulações, por simplificação, todas as propostas usam o esquema de nomeação GBNS.

Foram avaliadas quatro variações da arquitetura CCN:

- A adaptação da arquitetura CCN padrão para redes sem-fio³, sem adoção de mecanismo de *cache* oportunista e retransmissão proativa de conteúdos;
- O modelo de Wang *et al.* [48], com implementação de *cache* oportunista e retransmissão proativa de conteúdos;
- GeoZone não-proativo, sem adoção de *cache* oportunista nem retransmissão proativa de conteúdos;
- GeoZone proativo, com a implementação de *cache* oportunista e retransmissão proativa de conteúdos;

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos a partir da análise de três métricas:

- quantidade global de transmissões de pacotes de interesse;
- quantidade global de transmissões de pacotes de conteúdo;
- atraso médio de entrega dos conteúdos aos consumidores.

Em cada cenário foram executadas 10 rodadas de simulação, com diferentes sementes de geração de números aleatórios. Para os gráficos apresentados, calcula-se o intervalo de confiança, representados por barras verticais, para um nível de confiabilidade de 95%.

Nas simulações são utilizados: (i) um modelo de mobilidade veicular sintético, cujo objetivo é simular o padrão de tráfego de veículos em um centro urbano, denominado *Urban-Vehicular Mobility Model*, e (ii) dados reais de mobilidade veicular, extraídos de *traces*⁴ de movimentação de veículos na cidade de Genebra, Suíça [33].

Os resultados obtidos estão divididos de acordo com o padrão de mobilidade e são discutidos na seções seguintes.

³A adaptação permite a recepção e envio de pacotes de interesse pela mesma interface física.

⁴Disponível em <http://www.lst.inf.ethz.ch/research/ad-hoc/car-traces/>

5.2 Avaliação Baseada no Modelo de Mobilidade Sintético

O objetivo da avaliação baseada em um modelo de mobilidade sintético é permitir a análise das propostas sob condições distintas de densidade da rede, que afeta a distribuição geográfica dos nós e a quantidade média de vizinhos, além da distância física entre os nós consumidores e o nó produtor. O modelo desenvolvido observou as características de movimentação veicular, de forma a buscar uma aproximação de um cenário de movimentação veicular real. Este modelo foi denominado de *Urban-Vehicular Mobility Model*.

5.2.1 *Urban-Vehicular Mobility Model*

O modelo de mobilidade proposto neste trabalho para a avaliação das propostas é chamado de *Urban-Vehicular Mobility Model*. Neste modelo, os veículos são uniformemente distribuídos sob forma de grade em uma área plana delimitada. Cada nó sorteia uma direção e velocidade aleatória a cada 100 m percorridos. As direções variam apenas em ângulos de 0° , 90° , 180° ou 270° , excluindo a direção oposta à direção inicial e atual do veículo. O objetivo desta regra é simular uma tomada de decisão a cada quarteirão/cruzamento percorrido pelo veículo. Desta forma, dada a direção inicial do veículo, o modelo exclui a possibilidade deste nó retornar à sua posição original, e a possibilidade de um nó selecionar a direção oposta à última sorteada. As velocidades sorteadas pelo modelo variam entre os valores de 20 a 60 km/h.

5.2.2 Cenários de Avaliação

A partir do *Urban-Vehicular Mobility Model*, pôde-se definir cenários urbanos de movimentação veicular com diferentes áreas e densidades, nos quais vários veículos enviam pacotes de interesse, simultaneamente, para um ponto alvo, que possui uma unidade de acostamento e coordenadas bem conhecidas, como pontes, centros comerciais e avenidas principais.

Nesta etapa, em todos os cenários existem 50 nós consumidores para um dado conteúdo armazenado inicialmente apenas pela unidade de acostamento do ponto de interesse, por isso, também chamado de produtor inicial. No instante $t = 0$, cada nó consumidor envia um pacote de interesse destinado ao produtor inicial. A quantidade de nós na rede,

Quantidade Consumidores	Qtde. Nós no Núcleo da Rede	Distância Inicial entre Veículos (Hor. e Vert.)	Área Total	Distância Consumidores x Produtor inicial
50	500	100 m.	$\approx 6.2 \text{ km}^2$	$\approx 1 \text{ km.}$
50	1050	75 m.	$\approx 7.2 \text{ km}^2$	$\approx 1 \text{ km.}$
50	625	200 m.	$\approx 30 \text{ km}^2$	$\approx 5 \text{ km.}$
50	2500	100 m.	$\approx 28 \text{ km}^2$	$\approx 5 \text{ km.}$

Tabela 5.1: Parâmetros dos cenários de avaliação.

a distância entre os veículos, a área de simulação e a distância que separa os consumidores do ponto de interesse variam em cada cenário. A Tabela 5.1 resume os parâmetros dos quatro cenários avaliados. Cada linha representa um cenário distinto. Define-se como núcleo da rede os nós intermediários que, inicialmente, não são nem consumidores e nem produtores. Por simplificação, os nós consumidores e o produtor inicial são os mesmos para todos os cenários.

5.2.3 Resultados

A Figura 5.1 apresenta a quantidade de pacotes de interesses transmitidos em função do número de nós no núcleo da rede. Observa-se que o *framework* GeoZone reduz significativamente a quantidade de interesses transmitidos e necessários para que todos os consumidores obtenham o conteúdo. Entre os mecanismos proativos, a redução proporcionada pelo GeoZone é de aproximadamente 50%, quando o núcleo da rede possui 1050 nós e a distância consumidor-produtor é de 1 km. Na comparação entre as propostas não-proativas, a diferença é de até aproximadamente 57% no cenário com 2500 nós. Considerando todas as abordagens, no cenário com 2500 nós, o GeoZone proativo reduz em até 66% o número de pacotes de interesse transmitidos em relação à CCN sem-fio padrão. Este resultado significativo é fruto do mecanismo ZFM que limita a área de disseminação de interesses na rede e, portanto, demonstra que o GeoZone é eficiente no controle da inundação desses pacotes em redes veiculares orientadas a conteúdo.

Percebe-se também que, considerando todos os cenários, o GeoZone proativo consegue realizar a entrega de todos os conteúdos com o menor número total de transmissões de interesses. Isto ocorre porque na política proativa, todos os nós contribuem para a entrega de conteúdos, inclusive aqueles que durante a fase de envio do interesse estão fora da zona de disseminação formada pelo ZFM. Essa contribuição certamente facilita a entrega de

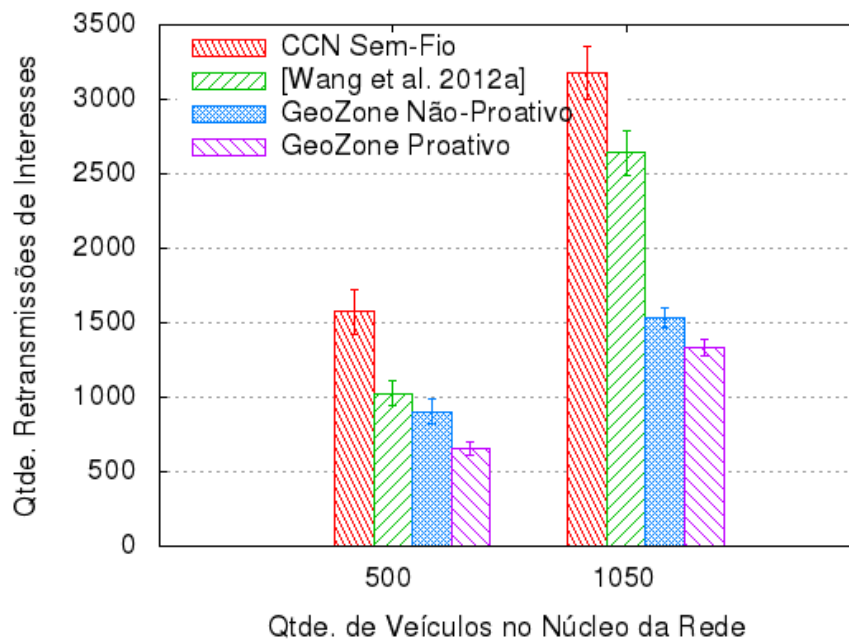
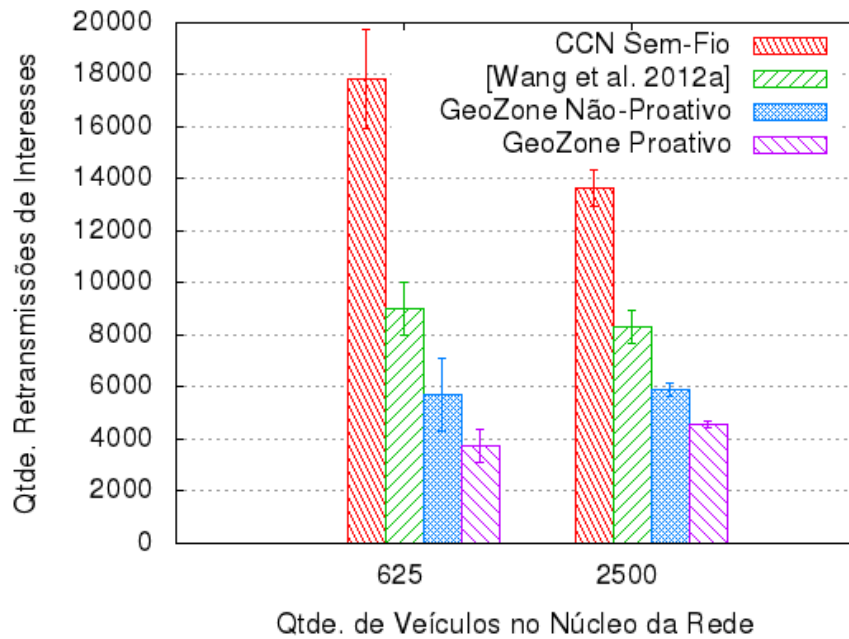
(a) Distância Consumidor-Produtor: ≈ 1 km.(b) Distância Consumidor-Produtor: ≈ 5 km.

Figura 5.1: Número de transmissões de interesses.

pacotes de dados em redes com maior grau de mobilidade. Outra conclusão é que a quantidade de interesses transmitidos é diretamente proporcional à distância entre os consumidores e a região-alvo.

A Figura 5.2 apresenta a quantidade global de pacotes de conteúdos transmitidos em relação ao número de veículos no núcleo da rede. Nota-se que os dois mecanismos não-

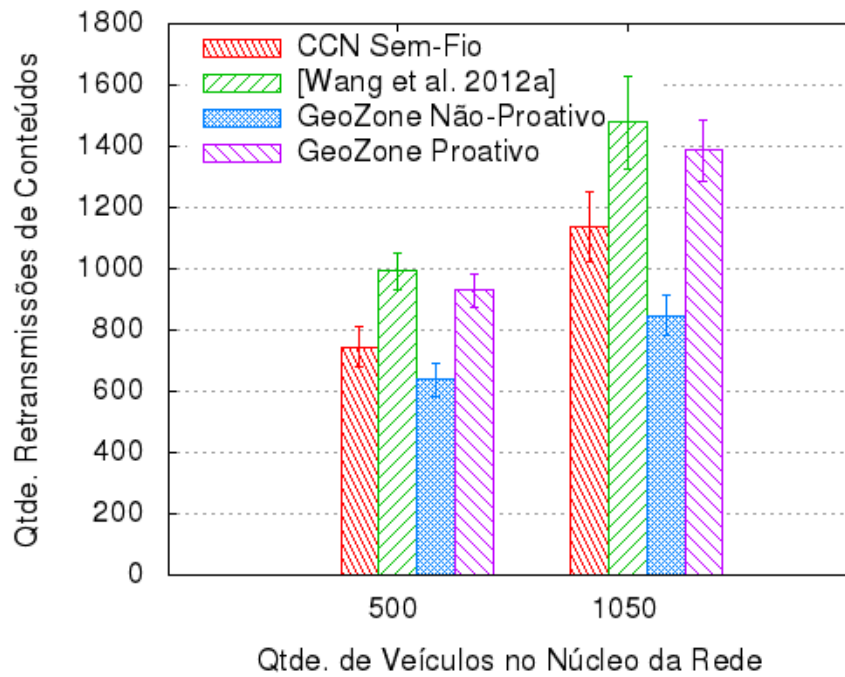
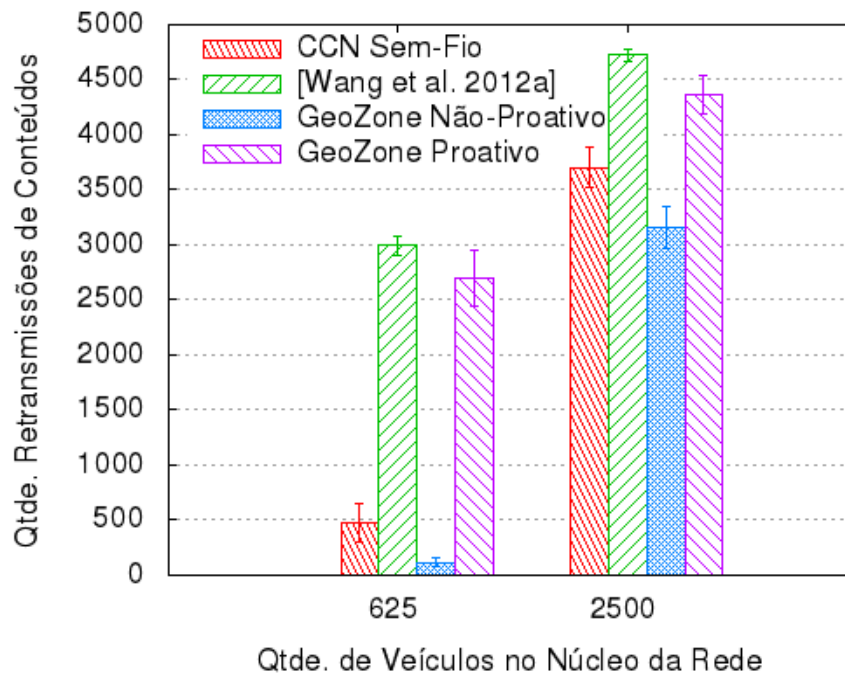
(a) Distância Consumidor-Produtor: ≈ 1 km.(b) Distância Consumidor-Produtor: ≈ 5 km.

Figura 5.2: Número de transmissões de conteúdos.

proativos apresentam o menor número de replicações de conteúdos para atender todos os 50 consumidores. Esse é um resultado esperado, pois somente os nós com a respectiva entrada na tabela PIT possuem autorização para encaminhar os pacotes de conteúdo. Entretanto, como será visto adiante, o impacto dessa política no atraso e na taxa de

entrega destes conteúdos é alto.

Ainda nesta métrica, considerando uma classificação de soluções proativas ou não-proativas, o *framework* GeoZone se destaca com resultados positivos em relação aos respectivos concorrentes.

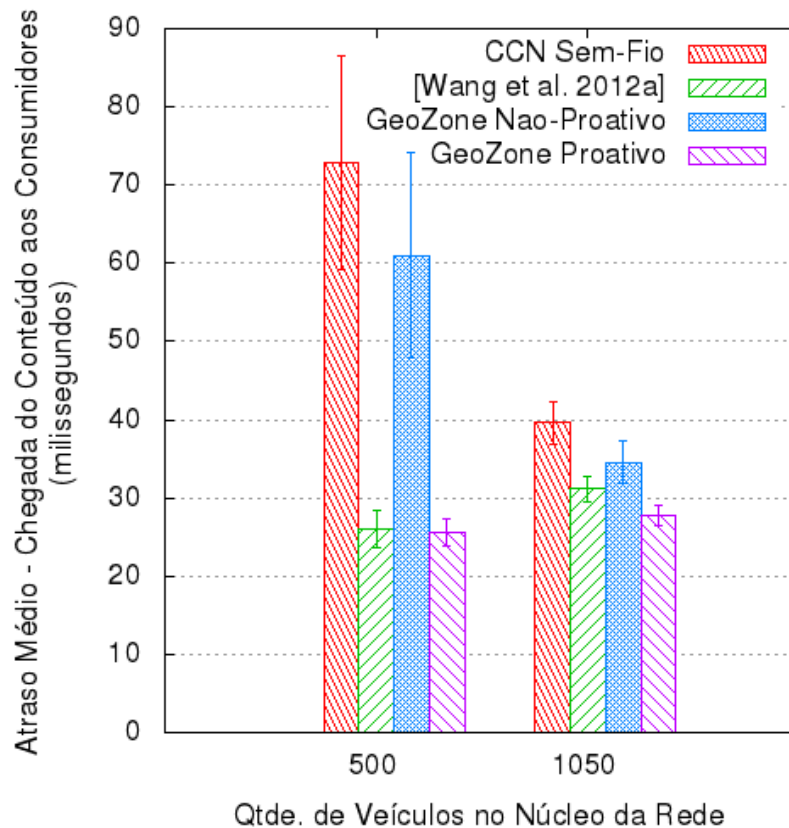


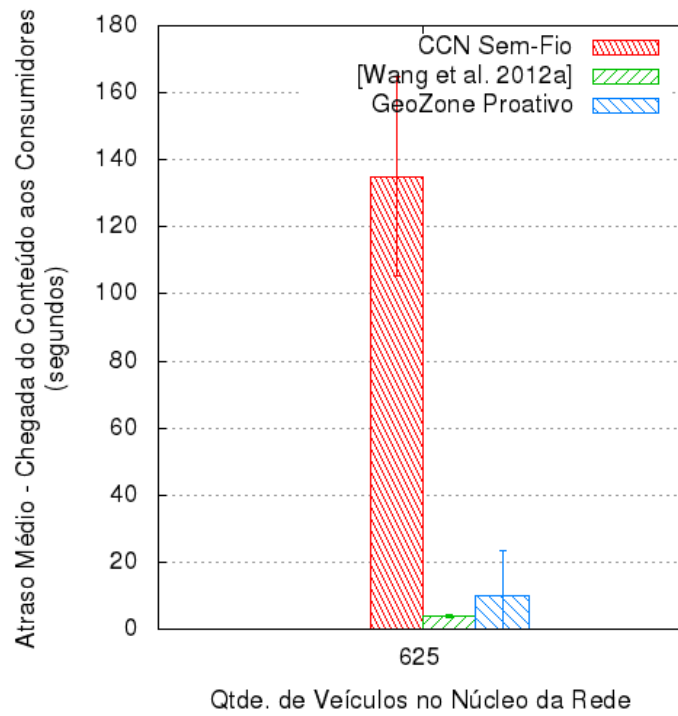
Figura 5.3: Atraso médio - distância consumidor x produtor aprox. 1km.

A Figura 5.3 mostra o atraso médio de entrega do conteúdo aos consumidores que estão distantes cerca de 1 km do produtor inicial. Percebe-se que as propostas proativas, em relação as não-proativas, obtêm uma significativa melhoria de desempenho nesta métrica, principalmente no cenário de menor densidade.

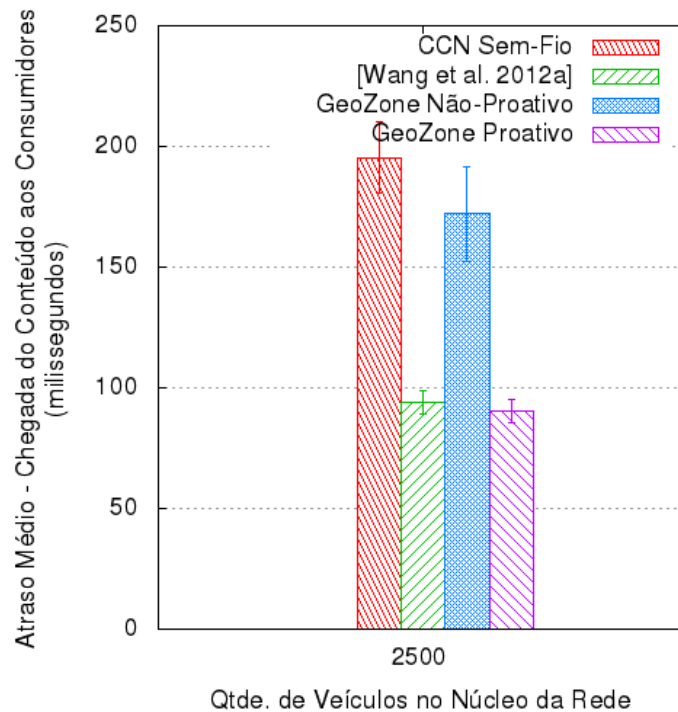
Conclui-se, portanto, que a liberdade concedida para que qualquer nó possa contribuir com o armazenamento e a entrega de conteúdos favorece o rápido atendimento das solicitações em cenários móveis. Em cenários mais densos, porém, essa liberdade tem o efeito colateral de aumentar a disputa pelo meio de transmissão, mas ainda assim obtém resultados melhores do que as propostas não-proativas.

Além disso, as duas políticas do GeoZone não aumentam o atraso de entrega em relação à proposta de Wang *et al.*, cujo objetivo principal é a redução do tempo de entrega dos conteúdos. Portanto, o *framework* proposto reduz significativamente o número de

pacotes de interesse transmitidos pelos nós da rede, sem afetar o desempenho em termos do atraso para entrega do conteúdo.



(a) 625 nós (atraso em segundos).



(b) 2500 nós (atraso em milissegundos)

Figura 5.4: Atraso médio - distância produtor x consumidor aprox. 5km.

A Figura 5.4 apresenta o atraso médio de entrega do conteúdo para os cenários nos

quais o produtor inicial está aproximadamente 5 km distante dos consumidores. Na Figura 5.4(a), que ilustra o cenário menos denso dentre todos, a proposta CCN sem-fio obteve sucesso na recuperação de conteúdos em apenas 30% das simulações executadas. Desta forma, o gráfico apresentado considera apenas esses resultados, onde nesse caso, o atraso médio obtido foi superior a 2 minutos. Já a proposta GeoZone não-proativa não obteve sucesso na recuperação de conteúdos no tempo total de simulação, e por isso, não está representada no gráfico. Esse resultado mostra o quanto as abordagens não-proativas sofrem em ambientes de menor densidade.

Em contrapartida, as abordagens proativas recuperaram todos os conteúdos solicitados com atraso até 22 vezes menor. Mais uma vez, conclui-se que a maior participação de nós nos processos de armazenamento e encaminhamento de conteúdos é benéfica para o ambiente veicular.

Na Figura 5.4(b), o cenário de maior densidade dentre todos, observa-se que os mecanismos proativos obtêm resultados melhores, reduzindo em aproximadamente 50% o tempo necessário para recuperação dos conteúdos. Além disso, o GeoZone experimenta um valor de atraso similar ao da proposta de Wang *et al.*.

Também foram simulados cenários com quantidades distintas de consumidores na rede, a fim de verificar o comportamento dos mecanismos proativos a partir de diferentes demandas para um mesmo conteúdo. A seguir, apresenta-se os resultados da avaliação na qual a quantidade de consumidores iniciais varia entre valores de 10 a 100 nós. A taxa de entrega de conteúdos para todos os cenários foi de 100%. O cenário de mobilidade utilizado é composto por 2500 nós distribuídos em uma área de aproximadamente 28 km², na qual a distância inicial para cada vizinho é de 100 m. Nesta avaliação, somente são considerados os mecanismos proativos, por serem os mais eficientes conforme as análises anteriores.

A Figura 5.5 mostra a evolução da quantidade de transmissões de interesses efetuadas para a entrega de conteúdos para todos os nós consumidores iniciais. Destaca-se a significativa redução de interesses enviados a partir do framework *GeoZone*, independentemente do número de consumidores da rede. Nota-se também que a curva dos dois mecanismos é crescente até o momento em que se tem mais de 50 nós consumidores. Neste caso, grande parte dos veículos da rede já possuem entradas para o mesmo interesse na PIT, e portanto, ignoram novas solicitações para o conteúdo.

A Figura 5.6 apresenta a quantidade total de pacotes de conteúdos disseminados na rede para satisfazer 10, 30, 50 ou 100 consumidores. Verifica-se que o GeoZone proativo não reduz apenas o número de pacotes de interesse transmitidos, mas também reduz a

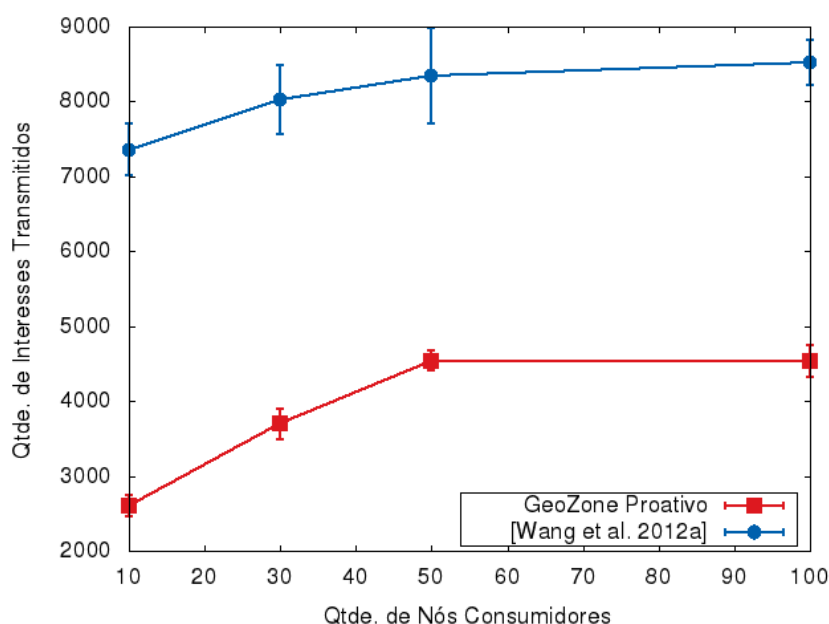


Figura 5.5: Interesses transmitidos em função da quantidade de consumidores.

quantidade de pacotes de conteúdo encaminhados à rede para o atendimento das requisições. Esse comportamento é observado em todos os cenários em comparação com a proposta proativa de Wang *et al.* e pode ser explicado pela falta de controle da inundação de interesses provocada pelo mecanismo desses autores. Com o mecanismo de Wang *et al.* muitos nós da rede recebem o pacote de interesse dos nós consumidores originais durante a fase de disseminação. Enquanto a entrada na PIT dos nós ainda for válida, esses nós, denominados pseudo-consumidores, irão enviar o pacote de interesse na rede. Mesmo depois que todos os consumidores originais tenham recebido o pacote de conteúdo, os nós pseudo-consumidores continuam a disseminar o pacote de interesse pela rede. Sendo assim, esses pseudo-consumidores irão exigir um maior número de transmissões, tanto de pacotes de interesses como de conteúdos, para que todos sejam satisfeitos.

Nota-se também que o aumento do número de consumidores não causa um impacto acentuado do número de transmissões de conteúdo na rede. Como em ambos os casos, o conteúdo é distribuído proativamente, qualquer nó da rede, seja consumidor ou não, pode participar do encaminhamento do pacote. Desta forma, o número de consumidores não implica diretamente na quantidade de nós que irão realizar o encaminhamento de conteúdos, o que também é verificado pela Figura 5.7, que ilustra o número total de nós que realizam o encaminhamento de pacotes de conteúdo na rede. Como o *framework* GeoZone exige menor participação de nós para a entrega de conteúdos, o nível de ocupação dos *caches* dos nós tende a ser menor.

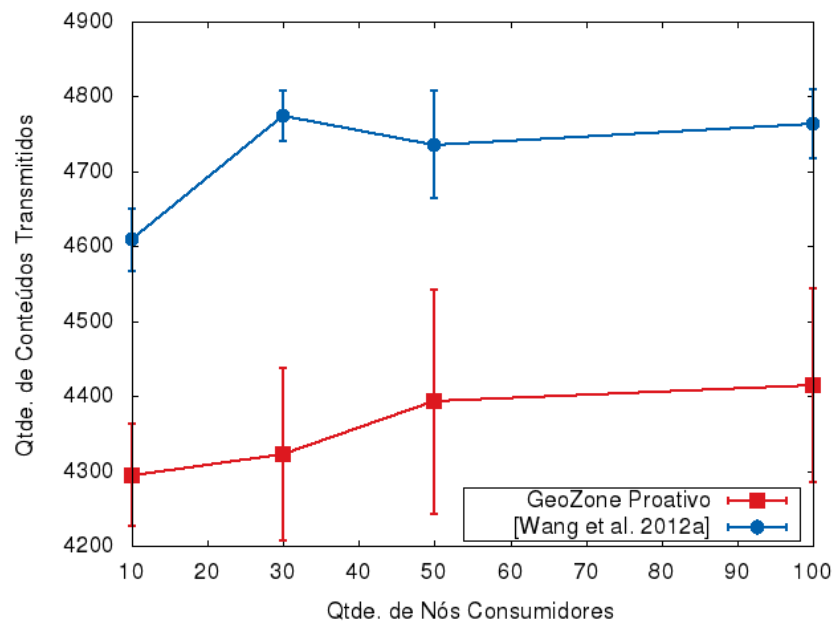


Figura 5.6: Conteúdos transmitidos em função da quantidade de consumidores.

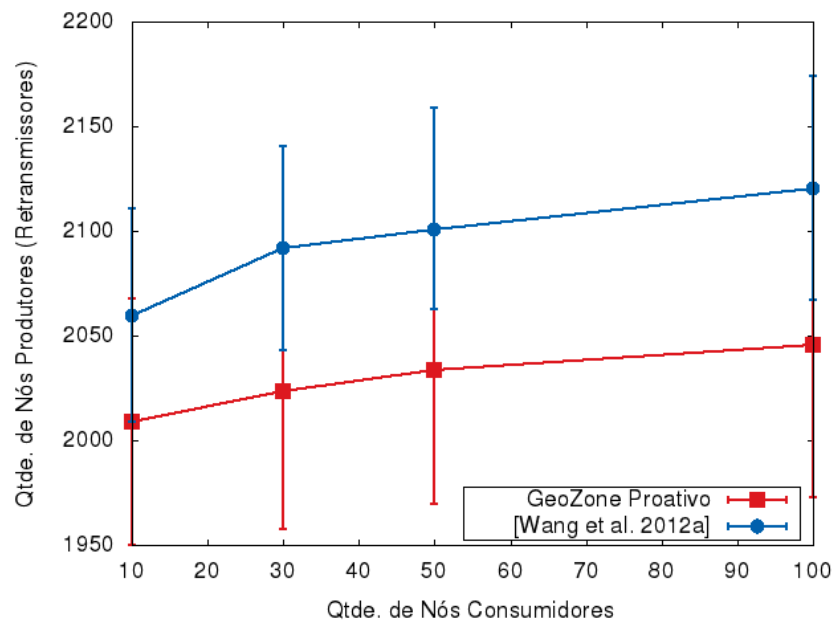


Figura 5.7: Quantidade de nós que participam da transmissão de conteúdos.

Na Figura 5.8 observa-se que a variação do atraso médio para entrega dos conteúdos é da ordem de poucos milissegundos entre os mecanismos avaliados. Considerando os intervalos de confiança, pode-se concluir que as propostas apresentam resultados equivalentes.

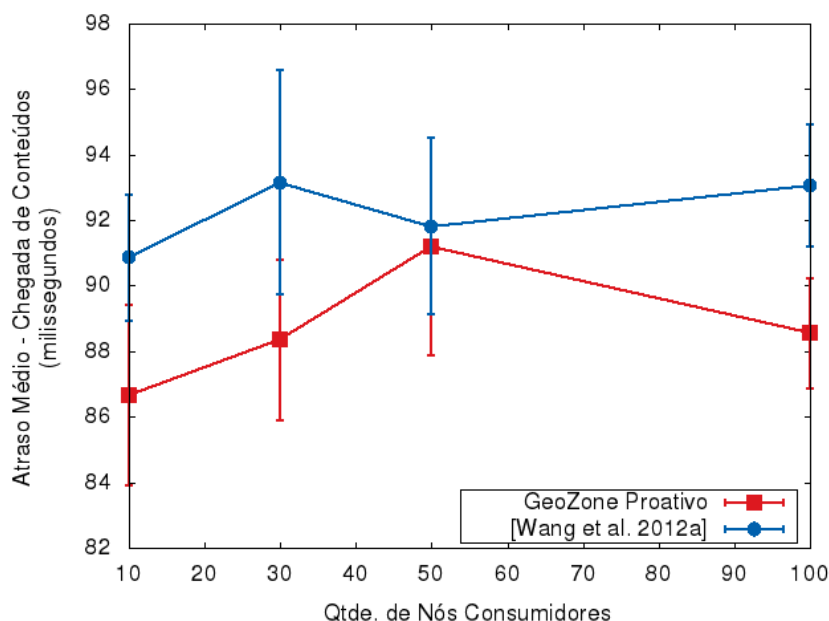


Figura 5.8: Atraso de entrega em função da quantidade de consumidores.

5.3 Avaliação Baseada em *Traces* de Mobilidade Real

Para consolidar os resultados obtidos nas simulações baseadas no *Urban-Vehicular Mobility Model*, as propostas são avaliadas com base em dados reais, extraída de *traces*⁵ de movimentação veicular da cidade de Genebra, Suíça [33]. A base utilizada possui os dados de movimentação de 2582 nós espalhados sobre a região central de Bellevue, Genebra.

Nessas simulações, a quantidade de nós consumidores varia entre valores de 30 a 100 veículos. Os nós consumidores foram selecionados com base na previsão de deslocamento que realizam na rede. Essa condição é necessária porque é uma premissa do *framework* GeoZone que a trajetória dos nós consumidores siga em direção ao ponto de interesse. Desta forma, garantiu-se que todos os nós consumidores seguissem em direção a uma região próxima ao nó produtor inicial. Para todas as simulações, o nó produtor inicial é único e estático.

Foram realizadas 30 rodadas de simulação para cada cenário. Todos os demais parâmetros de simulação são os mesmos usados na análise anterior e apresentados na Seção 5.1.

⁵Disponível em <http://www.lst.inf.ethz.ch/research/ad-hoc/car-traces/>

5.3.1 Resultados

A Figura 5.9 apresenta os resultados da quantidade total de interesses disseminados na rede para que os consumidores recebam o conteúdo. Novamente, percebe-se que o *framework* GeoZone exige menor grau de inundação para que os consumidores sejam satisfeitos. O resultado é praticamente equivalente entre as duas versões do *framework* para todos os cenários, enquanto que a CCN sem-fio padrão apresenta o pior resultado em termos de inundação da rede.

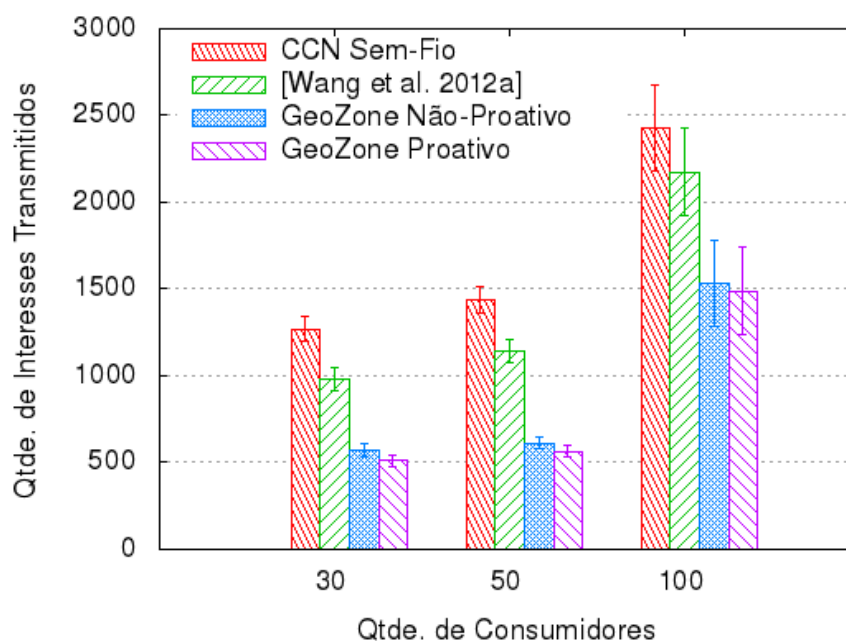


Figura 5.9: Número de transmissões de interesses.

A Figura 5.10 apresenta o número global de transmissões de pacotes de conteúdo na rede. Como esperado, os mecanismos proativos disseminam mais conteúdos do que as abordagens não proativas. A causa desse comportamento é a política de retransmissão de conteúdos, que permite qualquer nó receptor de um pacote de conteúdo contribuir com a disseminação desses pacotes pela rede.

Percebe-se também que o número absoluto de transmissões de pacotes de interesse e de conteúdos, no cenário de mobilidade real é bem inferior aos números obtidos no cenário de mobilidade sintético. Este efeito pode ser atribuído ao fato de que os 2582 nós existentes no *trace* estão distribuídos em uma área menor do que a simulada nos cenários sintéticos. Consequentemente, a rede está mais densa e os nós mais próximos uns dos outros, fazendo com que a área de cobertura de cada nó alcance mais vizinhos. Desta forma, a retransmissão dos pacotes alcança um número maior de vizinhos.

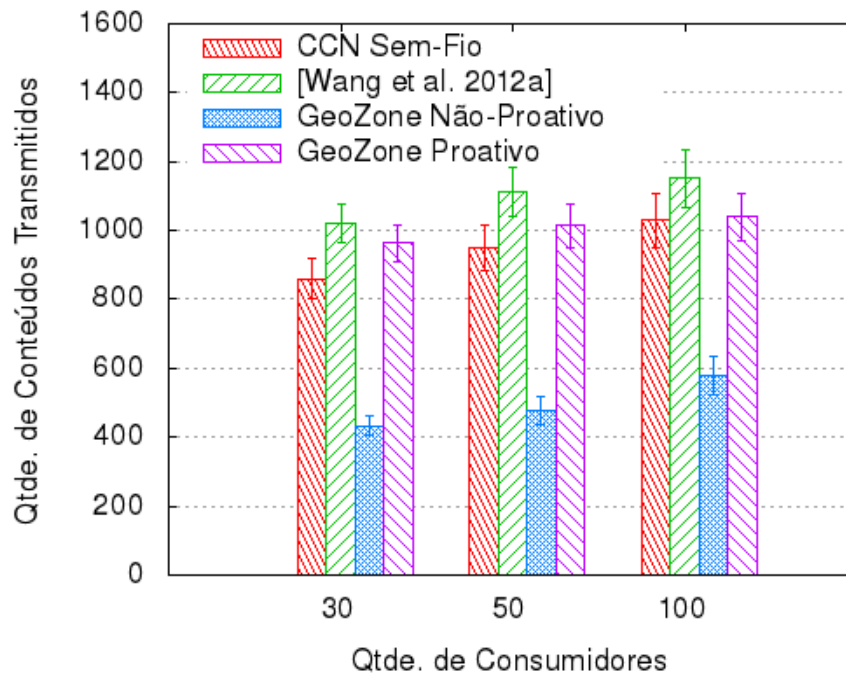


Figura 5.10: Número de transmissões de conteúdos.

A Figura 5.11 apresenta o atraso médio de recepção dos pacotes de conteúdo. Nesta avaliação a política proativa do *framework* GeoZone novamente apresenta resultados competitivos em relação à proposta de Wang *et al.*, configurando a melhor solução em termos da relação entre a quantidade de interesses enviados e o atraso de chegada de conteúdo. Entretanto, o *framework* GeoZone não proativo obteve o pior desempenho dentre todas as soluções avaliadas. O motivo deste resultado é atribuído ao número reduzido de transmissões de conteúdos, como é constatado na Figura 5.10, o que dificulta a entrega destes pacotes aos nós consumidores.

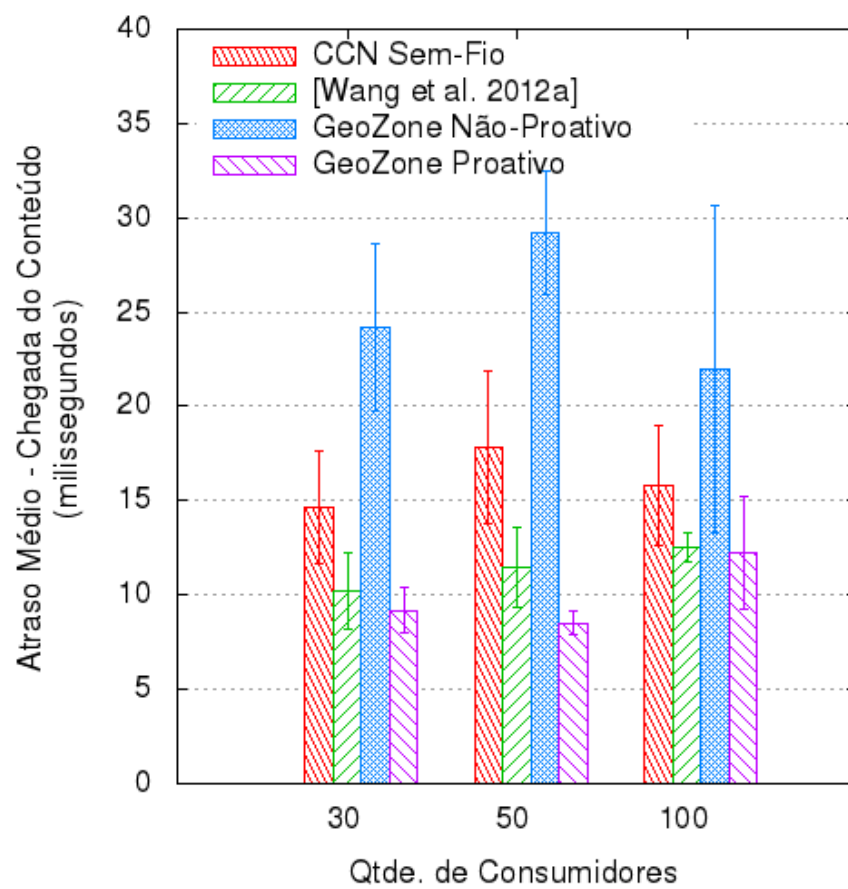


Figura 5.11: Atraso médio.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Atualmente, o desenvolvimento de tecnologias para a popularização das redes veiculares concentra muitos esforços da comunidade científica. Trabalhos relacionados demonstram que propostas baseadas na arquitetura CCN, utilizadas como substrato de operação dessas redes, obtêm um desempenho superior aos protocolos de comunicação para redes *ad hoc*. Entretanto, o controle da inundação dos pacotes para essa nova abordagem, ainda caracteriza-se como um importante desafio de pesquisa. Esta dissertação propôs o GeoZone, um *framework* para reduzir a inundação de pacotes de interesse em redes veiculares baseadas na arquitetura CCN, composto por dois mecanismos: um esquema de nomeação geo-referenciada de conteúdos, transparente para os consumidores, denominado *Geographically-Based Naming Scheme* (GBNS), e um mecanismo de encaminhamento de interesses baseado na definição de zonas de disseminação, denominado *Zone Forwarding Mechanism* (ZFM).

A avaliação da proposta foi realizada através de simulações com auxílio da ferramenta ndnSIM, e utilizando (i) um modelo de mobilidade sintético para simulação de cenários urbanos com diferentes áreas e densidades; e (ii) dados reais de mobilidade extraídos de *traces* de movimentação veicular da cidade de Genebra, na Suíça.

Com base nos resultados da avaliação, conclui-se que o GeoZone, comparado a outras propostas da literatura, é uma solução competitiva para o problema de *broadcast storm* em redes veiculares orientadas a conteúdo, conseguindo reduzir em até 66% o número total de pacotes de interesse transmitidos e em até 9% o número total de transmissões de pacotes de conteúdo, sem impactos negativos a outras métricas de desempenho, como atraso e taxa de entrega de dados. Além disso, nas simulações com dados reais de mobilidade, o GeoZone proativo conseguiu recuperar conteúdos com um atraso médio até 52% inferior à proposta CCN sem-fio padrão. Conclui-se também que, em todos os cenários avaliados,

o *framework* GeoZone proativo ofecere a melhor média de desempenho considerando o grau de inundação de pacotes de interesse na rede e o atraso de entrega de conteúdos. Além disso, o *framework* GeoZone não altera as primitivas básicas da arquitetura CCN, e desta forma, não implica em prejuízo às vantagens oferecidas pela CCN às redes móveis, nem oferece dificuldades para a portabilidade da solução para o ambiente veicular. O esquema de nomeação desenvolvido é transparente aos nós consumidores, o que simplifica o processo de requisição de conteúdos na rede.

Em trabalhos futuros, pretende-se realizar um estudo aprofundado sobre a influência do tamanho de *cache* dos nós, e da diversidade de conteúdos da rede sobre os resultados obtidos. Para isso, novas simulações são previstas, a partir de diferentes cenários de mobilidade. Nas avaliações realizadas, percebe-se também que o *framework* deve obter resultados mais satisfatórios em cenários de muita baixa densidade, desta forma, é proposto o estudo de melhorias para o mecanismo ZFM. Sugere-se o desenvolvimento de pesquisas em relação a uma versão dinâmica do ZFM, ou seja, que determine zonas de disseminação de forma adaptativa, com base na densidade da rede [41]. Um passo inicial na direção dessa proposta, é a aplicação de métodos de percepção do nível de disputa pelo meio, que poderia determinar o nível de densidade da rede e, desta maneira, servir de parâmetro de entrada para o ajuste da zona de disseminação de interesses.

Outra proposta é o aperfeiçoamento do mecanismo de retransmissão proativa de conteúdos. Conteúdos populares na rede não necessitam ser disseminados para todos os vizinhos na mesma proporção que os conteúdos pouco populares. A criação de um esquema dinâmico de disseminação de conteúdos pode melhorar ainda mais o desempenho obtido pela atual versão do GeoZone. Ainda sobre o tópico de disseminação proativa de conteúdos, é necessário a criação de medidas de proteção à ataques do tipo poluição de *cache* [18, 39]. Nesse ataque, nós maliciosos podem espalhar conteúdos adulterados na rede, e que serão disseminados através do mecanismo de retransmissão proativa. Se bem sucedido, esse ataque pode comprometer a disponibilidade de conteúdos válidos na rede.

Por fim, pretende-se também analisar os possíveis benefícios da técnica de codificação de rede [23, 28] nas transmissões de pacotes de interesse e conteúdo, a fim de se obter melhor aproveitamento da comunicação sem-fio. Observa-se nos resultados da avaliação que a entrega de conteúdo para os nós consumidores exige um grande número de retransmissões, tanto de pacotes de interesse quanto de conteúdos. Nesse sentido, os nós que efetuam, por exemplo, a retransmissão proativa de conteúdos, podem utilizar-se dessa técnica para, simultaneamente, encaminhar também um pacote de interesse, e vice-versa.

Referências

- [1] AFANASYEV, A.; MOISEENKO, I.; ZHANG, L., ET AL. ndnSIM: NDN simulator for NS-3. *University of California, Los Angeles, Tech. Rep* (2012).
- [2] ALVES, R. D. S.; CAMPBELL, I. D. V.; COUTO, R. D. S.; CAMPISTA, M. E. M.; MORAES, I. M.; RUBINSTEIN, M. G.; COSTA, L. H. M.; DUARTE, O. C. M.; ABDALLA, M. Redes veiculares: Princípios, aplicações e desafios. *Minicursos do SBRC* (2009), 199–254.
- [3] AMADEO, M.; CAMPOLO, C.; MOLINARO, A. Content-centric networking: is that a solution for upcoming vehicular networks? In *ACM international workshop on Vehicular inter-networking, systems, and applications* (2012), pp. 99–102.
- [4] AMADEO, M.; CAMPOLO, C.; MOLINARO, A. CRoWN: Content-centric networking in vehicular ad hoc networks. *IEEE Communications Letters* 16, 9 (2012), 1380–1383.
- [5] AMADEO, M.; CAMPOLO, C.; MOLINARO, A. Enhancing content-centric networking for vehicular environments. *Computer Networks* 57, 16 (2013), 3222–3234.
- [6] AMADEO, M.; CAMPOLO, C.; MOLINARO, A.; RUGGERI, G. Content-centric wireless networking: A survey. *Computer Networks* (2014).
- [7] AMADEO, M.; MOLINARO, A.; RUGGERI, G. E-CHANET: Routing, forwarding and transport in information-centric multihop wireless networks. *Computer Communications* 36, 7 (2013), 792 – 803.
- [8] AMBIEL, L. M. B.; ROTHENBERG, C. E.; MAGALHAES, M. F. Redes orientadas a conteúdo: Abordagem no nível de enlace. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)* (2013).
- [9] ARNOULD, G.; KHADRAOUI, D.; HABBAS, Z. A self-organizing content centric network model for hybrid vehicular ad-hoc networks. In *ACM international symposium on Design and analysis of intelligent vehicular networks and applications* (2011), pp. 15–22.
- [10] BAI, F.; KRISHNAMACHARI, B. Exploiting the wisdom of the crowd: localized, distributed information-centric VANETs. *IEEE Communications Magazine* 48, 5 (2010), 138–146.
- [11] BERNSEN, J.; MANIVANNAN, D. Unicast routing protocols for vehicular ad hoc networks: A critical comparison and classification. *Pervasive and Mobile Computing* 5, 1 (2009), 1–18.

- [12] CABRAL, C.; ROTHENBERG, C. E.; MAGALHÃES, M. F. Mini-CCNx: fast prototyping for named data networking. In *ACM SIGCOMM workshop on Information-centric networking* (2013), ACM, pp. 33–34.
- [13] CAMPISTA, M.; RUBINSTEIN, M.; MORAES, I.; COSTA, L.; DUARTE, O. Challenges and research directions for the future internet networking. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16, 2 (2014), 1050–1079.
- [14] CHEN, W.; GUHA, R. K.; KWON, T. J.; LEE, J.; HSU, Y.-Y. A survey and challenges in routing and data dissemination in vehicular ad hoc networks. *Wireless Communications and Mobile Computing* 11, 7 (2011), 787–795.
- [15] DE BRITO, G. M.; VELLOSO, P. B.; MORAES, I. M. Redes orientadas a conteúdo: Um novo paradigma para a Internet. *Minicursos do SBRC 2012* (2012), 211–264.
- [16] DE BRITO, G. M.; VELLOSO, P. B.; MORAES, I. M. *Information Centric Networks: A New Paradigm for the Internet*. Wiley-ISTE, 2013.
- [17] DE BRITO, G. M.; VELLOSO, P. B.; MORAES, I. M. Uma análise do desempenho de redes sem-fio orientadas a conteúdo. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)* (2014).
- [18] GASTI, P.; TSUDIK, G.; UZUN, E.; ZHANG, L. DoS and DDoS in named data networking. In *IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)* (2013), pp. 1–7.
- [19] GRASSI, G.; PESAVENTO, D.; PAU, G.; VUYYURU, R.; WAKIKAWA, R.; ZHANG, L. VANET via named data networking. In *IEEE INFOCOM* (April 2014), pp. 410–415.
- [20] HARTENSTEIN, H.; LABERTEAUX, K. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine* 46, 6 (2008), 164–171.
- [21] JACOBSON, V.; SMETTERS, D. K.; THORNTON, J. D.; PLASS, M. F.; BRIGGS, N. H.; BRAYNARD, R. L. Networking named content. In *ACM international conference on Emerging networking experiments and technologies (CoNEXT)* (2009), pp. 1–12.
- [22] JOHNSON, D.; PERKINS, C.; ARKKO, J., ET AL. Mobility support in IPv6. In *RFC 3775* (2004).
- [23] KATTI, S.; RAHUL, H.; HU, W.; KATABI, D.; MÉDARD, M.; CROWCROFT, J. XORs in the air: practical wireless network coding. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* (2006), vol. 36, ACM, pp. 243–254.
- [24] KIM, D.-H.; KIM, J.-H.; KIM, Y.-S.; YOON, H.-S.; YEOM, I. Mobility support in content centric networks. In *ICN workshop on Information-centric networking* (2012), ACM, pp. 13–18.
- [25] KNISS, J.; LOQUES, O.; ALBUQUERQUE, C. V. Um protocolo baseado em localização para restringir as mensagens de descoberta e resposta de serviços em redes ad hoc móveis com nós cooperativos. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)* (2009).

- [26] LEONTIADIS, I.; MASCOLO, C. Opportunistic spatio-temporal dissemination system for vehicular networks. In *International MobiSys workshop on Mobile opportunistic networking* (2007), ACM, pp. 39–46.
- [27] LI, F.; WANG, Y. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. *IEEE Vehicular Technology Magazine* 2, 2 (2007), 12–22.
- [28] LIEW, S. C.; ZHANG, S.; LU, L. Physical-layer network coding: Tutorial, survey, and beyond. *Physical Communication* 6 (2013), 4–42.
- [29] LLORET, J.; GHAFOR, K. Z.; RAWAT, D. B.; XIA, F. Advances on network protocols and algorithms for vehicular ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications* 18, 6 (2013), 749–754.
- [30] MEISEL, M.; PAPPAS, V.; ZHANG, L. Ad hoc networking via named data. In *ACM international workshop on Mobility in the evolving internet architecture* (2010), pp. 3–8.
- [31] MEISEL, M.; PAPPAS, V.; ZHANG, L. Listen first, broadcast later: Topology-agnostic forwarding under high dynamics. In *Annual Conference of International Technology Alliance in Network and Information Science* (2010), pp. 1–8.
- [32] MOHAMMAD, S. A.; RASHEED, A.; QAYYUM, A. VANET architectures and protocol stacks: a survey. 95–105.
- [33] NAUMOV, V.; BAUMANN, R.; GROSS, T. An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces. In *ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing* (2006), ACM, pp. 108–119.
- [34] PAN, J.; PAUL, S.; JAIN, R. A survey of the research on future internet architectures. *Communications Magazine, IEEE* 49, 7 (2011), 26–36.
- [35] PANICHPAPIBOON, S.; PATTARA-ATIKOM, W. A review of information dissemination protocols for vehicular ad hoc networks. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* 14, 3 (2012), 784–798.
- [36] PERKINS, C. E.; ROYER, E. M. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In *IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications* (1999), IEEE, pp. 90–100.
- [37] PRATES, A. A.; MORAES, I. M. GeoZone: Um framework eficiente de difusão de interesses em redes veiculares orientadas a conteúdo. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)* (2014).
- [38] RAO, Y.; ZHOU, H.; GAO, D.; LUO, H.; LIU, Y. Proactive caching for enhancing user-side mobility support in named data networking. In *International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS)* (2013), pp. 37–42.
- [39] RIBEIRO, I.; GUIMARÃES, F. Q.; KAZIENKO, J. F.; ROCHA, A.; VELLOSO, P.; MORAES, I.; ALBUQUERQUE, C. Segurança em redes centradas em conteúdo: Vulnerabilidades, ataques e contramedidas. *Simpósio Brasileiro em Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais (SBSeg)* (2012), 151–195.

- [40] ROSENSWEIG, E.; MENASCHE, D.; KUROSE, J. On the steady-state of cache networks. In *IEEE INFOCOM* (April 2013), pp. 863–871.
- [41] SANGUESA, J. A.; FOGUE, M.; GARRIDO, P.; MARTINEZ, F. J.; CANO, J.-C.; CALAFATE, C. T. Using topology and neighbor information to overcome adverse vehicle density conditions. *Transportation Research Part C* 42 (2014), 1–13.
- [42] SHAREF, B. T.; ALSAQOUR, R. A.; ISMAIL, M. Vehicular communication ad hoc routing protocols: A survey. *Journal of Network and Computer Applications* (2014), 363 – 396.
- [43] TONGUZ, O.; WISITPONGPHAN, N.; PARIKH, J.; BAI, F.; MUDALIGE, P.; SADEKAR, V. On the broadcast storm problem in ad hoc wireless networks. In *BROAD-NETS Conference* (2006), pp. 1–11.
- [44] TOUTOUH, J.; GARCÍA-NIETO, J.; ALBA, E. Intelligent OLSR routing protocol optimization for VANETs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 61, 4 (2012), 1884–1894.
- [45] VARVELLO, M.; RIMAC, I.; LEE, U.; GREENWALD, L.; HILT, V. On the design of content-centric MANETs. In *International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS)* (2011), IEEE, pp. 1–8.
- [46] VASILAKOS, X.; SIRIS, V. A.; POLYZOS, G. C.; POMONIS, M. Proactive selective neighbor caching for enhancing mobility support in information-centric networks. In *ACM ICN SIGCOMM Wkshp.* (2012), pp. 61–66.
- [47] WANG, J.; WAKIKAWA, R.; ZHANG, L. DMND: Collecting data from mobiles using named data. In *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)* (2010), pp. 49–56.
- [48] WANG, L.; AFANASYEV, A.; KUNTZ, R.; VUYYURU, R.; WAKIKAWA, R.; ZHANG, L. Rapid traffic information dissemination using named data. In *ACM workshop on Emerging Name-Oriented Mobile Networking Design-Architecture, Algorithms, and Applications* (2012), pp. 7–12.
- [49] WANG, L.; WAKIKAWA, R.; KUNTZ, R.; VUYYURU, R.; ZHANG, L. Data naming in vehicle-to-vehicle communications. In *NOMEN Wkshp.* (2012), pp. 328–333.
- [50] YI, C.; AFANASYEV, A.; WANG, L.; ZHANG, B.; ZHANG, L. Adaptive forwarding in named data networking. *ACM SIGCOMM* 42, 3 (2012), 62–67.
- [51] YU, Y.-T.; PUNIHAOLE, T.; GERLA, M.; SANADIDI, M. Content routing in the vehicle cloud. In *IEEE MILCOM* (2012).
- [52] ZHU, Z.; AFANASYEV, A.; ZHANG, L. A new perspective on mobility support. *Named-Data Networking Project, Tech. Rep* (2013).