

DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO ORIENTADA À TRAJETÓRIA
EM REDES VEICULARES

Vitor Borges Coutinho da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Miguel Elias Mitre Campista

Rio de Janeiro

Junho de 2015

DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO ORIENTADA À TRAJETÓRIA
EM REDES VEICULARES

Vitor Borges Coutinho da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Miguel Elias Mitre Campista, D.Sc.

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa, Dr.

Prof. Igor Monteiro Moraes, D.Sc.

Prof. Daniel Fernandes Macedo, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2015

Silva, Vitor Borges Coutinho da

Distribuição de Conteúdo Orientada à Trajetória
em Redes Veiculares/Vitor Borges Coutinho da Silva. –
Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XVI, 86 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Miguel Elias Mitre Campista

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de
Engenharia Elétrica, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 82 – 86.

1. Redes Veiculares. 2. Redes Orientadas a Conteúdo.
3. Distribuição de Conteúdo. I. Campista, Miguel Elias
Mitre. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

À minha família.

Agradecimentos

Agradeço a meus pais Iêda e Julio por sempre me apoiarem e por investirem em minha formação. Ainda, agradeço por minha educação como pessoa, pelos conselhos e pelo carinho. Agradeço à minha irmã Patricia pelo convívio, conselhos e brincadeiras. Agradeço a toda minha família pela atenção e carinho. Agradeço à minha namorada Luiza Ferreira por me aturar, me apoiar e me fazer feliz.

Agradeço a todos os meus amigos, em especial, Pedro Freitas, Vitor Rosa, Cristiano Barbosa, Vitor Antunes, Jonathan Gois e Duda Brasil por tornarem a vida mais divertida e agradável.

Agradeço à equipe do Grupo de Teleinformática e Automação pelo apoio durante este trabalho. Também gostaria de agradecer aos amigos no GTA que me ajudaram profissionalmente e tornaram o trabalho mais divertido, Rodrigo Couto, Dianne Medeiros, Fábio Vieira, Alyson dos Santos, Marcus Braga, João Batista, Tatiana Sciamarella, Marcelo Rubinstein, Igor Moraes, Pedro Velloso, Otto Duarte, Lino Ferraz, Andrés Piedrahita, Dayro Hernandez, Diogo Mattos e Martin Lopez. Também gostaria de agradecer aos funcionários da COPPE/UFRJ, em especial à Daniele, Rosa e Mauricio pela dedicação ao trabalho e boa vontade.

Em especial, agradeço aos meus orientadores Miguel Campista e Luís Costa pela dedicação e auxílio nesta dissertação e pela paciência nesses quase 4 anos de GTA.

Agradeço também aos professores Luís Costa, Igor Moraes e Daniel Macedo por participarem da banca avaliadora deste trabalho, pela atenção e pelos comentários que certamente ajudarão a melhorar esta dissertação.

Agradeço aos órgãos CNPq, FAPERJ e CAPES pelo suporte financeiro.

Por fim, agradeço a Deus por estar presente em minha vida.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO ORIENTADA À TRAJETÓRIA EM REDES VEICULARES

Vitor Borges Coutinho da Silva

Junho/2015

Orientador: Miguel Elias Mitre Campista

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho explora o uso de redes orientadas a conteúdo no cenário veicular. Nesses cenários, pontos de acesso (APs) instalados ao longo das ruas das cidades formam uma rede de acesso sem fio. A velocidade dos veículos no cenário veicular faz com que a obtenção de conteúdos nem sempre seja possível, devido aos contatos de curta duração entre veículos e APs. Assim, a ideia principal deste trabalho é proativamente agendar e realizar o *download* dos conteúdos dos usuários nos APs onde eles provavelmente vão passar. Assim, os usuários não precisam aguardar o *download* dos conteúdos nos APs, pois eles já terão sido recebidos. O agendamento proposto provê um uso mais eficiente dos contatos entre APs e veículos, resultando em mais conteúdos entregues aos usuários. Para que isso seja possível, é necessário adicionar a posição geográfica do destino dos usuários nos pacotes de interesse e utilizar a rede de acesso para encaminhar interesses entre APs. Usando esse conceito, duas estratégias de encaminhamento geográfico de interesses são desenvolvidas. As estratégias criadas são avaliadas através de simulações em um cenário rodoviário, em um cenário urbano e em um cenário com a topologia da cidade de Colônia. Os resultados das simulações mostram que a utilização conjunta da rede entre os APs e das estratégias propostas melhoram tanto a fração de interesses satisfeitos como a rapidez com que as respostas são recebidas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TRAJECTORY ORIENTED CONTENT DISTRIBUTION
IN VEHICULAR NETWORKS

Vitor Borges Coutinho da Silva

June/2015

Advisor: Miguel Elias Mitre Campista

Department: Electrical Engineering

This paper explores the use of content oriented networks in vehicular scenarios. In these scenarios, access points installed along city roads form an integrated wireless access network. Vehicles' speed in the vehicular scenario makes content retrieval not always possible, due to short-lived contacts between vehicles and access points (APs). Hence, the key idea addressed in this work is to schedule and download in advance content requested by users over the access points along their paths to their destinations. This way, users do not have to wait the download of their content in the APs where they pass, since their content will be already available. The proposed scheduling provides a more efficient use of the contacts between APs and vehicles, resulting in more content delivered to users. To accomplish this, we add information regarding the destination of users in interest packets and use the network formed by the access points to forward interests between access points. Using this concept, two forwarding strategies consistent with the content oriented paradigm are developed in addition to a neighborhood discovery protocol required by the strategies. The results obtained through simulations in highway, urban, and Cologne scenarios show that the joint utilization of the network between access points and the proposed strategies increases the fraction of interests satisfied as well as how quick they are satisfied compared to the default strategy.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Abreviaturas	xv
1 Introdução	1
2 CCN em Redes Veiculares	8
2.1 Arquitetura CCN	8
2.2 Adaptação da CCN às VANETs e Trabalhos Relacionados	11
2.2.1 Armazenamento Promíscuo de Conteúdos	13
2.2.2 Content-Centric Vehicular Networking	13
2.2.3 Controle de Acesso ao Meio com Temporizadores	14
2.2.4 Controle do Broadcast Storm com Probabilidade de Encami- nhar Interesses	16
2.2.5 GeoZone	17
2.2.6 Outros Trabalhos	17
3 Estratégias para Distribuição de Conteúdos em Redes Veiculares	19
3.1 Premissas	19
3.2 Tipos de Pacote	21
3.3 Roteamento e Esquema de Nomeação de Interesses e Conteúdos	23
3.4 Operação dos Usuários	25
3.5 Operação dos APs	27
3.5.1 Protocolo de Descoberta de Vizinhança	29
3.5.2 Encaminhamento em Área Triangular	29

3.5.3	Encaminhamento por Minimização de Distância	36
3.5.4	Recepção de Conteúdos pelos APs	37
3.5.5	Modelagem da Estrutura de Armazenamento dos IVs	39
4	Testes e Resultados	42
4.1	Cenários e Parâmetros das Simulações	42
4.2	Pedidos Pendentes de Conteúdos da Internet	49
4.3	Resultados	53
4.3.1	Cenário Rodoviário	53
4.3.2	Cenário Urbano	63
4.3.3	Cenário de Colônia	73
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	79
	Referências Bibliográficas	82

Lista de Figuras

1.1	Divisão em canais da banda DSRC.	3
2.1	Exemplo da estrutura de um nó CCN.	9
2.2	Funcionamento da arquitetura CCN: (a) Requisição: o usuário envia um interesse para solicitar um conteúdo; (b) Encaminhamento do interesse: o interesse é roteado na direção do nó da rede que possui o conteúdo, a cada salto o interesse é adicionado a PIT dos nós que não possuem o conteúdo; (c) Encaminhamento do conteúdo: os nós da rede encaminham o conteúdo à interface pela qual o interesse foi recebido, satisfazendo as PITs e armazenando o conteúdo nas CSs; (d) Entrega do conteúdo: o conteúdo alcança o emissor original do interesse, o interesse é removido da PIT do usuário e o conteúdo é entregue a ele.	10
3.1	Ideia básica da proposta: (a) Requisição: a seta em (1) representa a requisição de um conteúdo, enquanto a seta em (2) representa o encaminhamento dessa requisição aos APs na direção do destino D. (b) Disponibilidade: APs que possuam o conteúdo solicitado ou parte dele já podem satisfazer as requisições dos usuários. Respectivamente, as setas em (1) e (2) indicam mais uma vez o pedido do conteúdo pelo usuário e o encaminhamento desse pedido pelo AP. A seta em (3) indica a entrega do conteúdo já disponível em cache. (c) Comunicação entre veículos: a seta em (4) representa a requisição de um conteúdo de um veículo sendo recebida por um veículo próximo. O veículo próximo possuindo o conteúdo pedido em cache envia o conteúdo, o que é representado pela seta em (5).	20

3.2	Exemplo de FIBs: AP com uma interface sem fio e duas interfaces entre APs; veículo com uma interface sem fio.	24
3.3	Fluxograma da operação do nó do usuário ao receber um pacote.	27
3.4	Esquema do triângulo de cobertura.	31
3.5	Fluxograma do processo de encaminhamento de IAPs em área triangular.	33
3.6	Cenário de exemplo de funcionamento das estratégias de encaminhamento. Uma linha ligando dois APs representa a comunicação cabeada entre eles, nesse caso os APs são vizinhos.	34
3.7	Exemplo de funcionamento da estratégia de encaminhamento em área triangular: (a) Pedido e Encaminhamento: o veículo saindo de A para B pede um conteúdo ao AP mais próximo, indicado pela seta saindo do veículo e indo até o AP. Esse AP cria o triângulo de cobertura e inicia o encaminhamento do pedido entre os APs, os encaminhamentos são indicados pelas setas entre APs; (b) Disponibilidade: Dos APs que receberam o pedido, somente os dentro do triângulo agendam o recebimento do conteúdo solicitado, os APs com o conteúdo ou parte dele já podem satisfazer as requisições dos usuários.	35
3.8	Exemplo de funcionamento da estratégia de encaminhamento por minimização de distância: (a) Pedido e Encaminhamento: o veículo saindo de A para B pede um conteúdo ao AP mais próximo, indicado pela seta saindo do veículo e indo até o AP. Esse AP inicia o encaminhamento do pedido entre os APs, os encaminhamentos são indicados pelas setas entre APs e minimizam a distância até o destino B a cada salto; (b) Disponibilidade: Todos os APs que receberam o pedido agendam o recebimento do conteúdo solicitado, os APs com o conteúdo ou parte dele já podem satisfazer as requisições dos usuários.	38
3.9	Fluxograma do processo de recepção de conteúdos pelos APs.	39
4.1	Cenário rodoviário.	43
4.2	CDF das velocidades no cenário rodoviário.	43
4.3	Mapa das velocidades de 100 veículos na rodovia de 100 km/h.	44
4.4	Segmento do cenário urbano.	45

4.5	CDF das velocidades no cenário urbano para diferentes quantidades de veículos no cenário.	46
4.6	Mapa das velocidades no cenário urbano.	46
4.7	Região geográfica de Colônia usada nas simulações.	47
4.8	CDF das velocidades dos veículos no cenário de Colônia.	48
4.9	Mapa das velocidades dos veículos no cenário de Colônia.	49
4.10	(a) Taxa de entrega variando o número de veículos; (b) Fração de IVs satisfeitos variando o número de veículos.	52
4.11	Taxa de entrega de conteúdos variando o número de APs na rodovia com todos os conteúdos de 180 kB. Legenda: algoritmo-número de APs.	54
4.12	Taxa de entrega de conteúdos variando o tamanho dos conteúdos em kB com 8 APs distribuídos na rodovia. Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.	55
4.13	Fração de IVs satisfeitos variando o tamanho dos conteúdos em kB com 8 APs distribuídos na rodovia. Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.	58
4.14	Fração de IVs satisfeitos variando o número de APs na rodovia com todos os conteúdos de 180 kB. Legenda: algoritmo-número de APs.	59
4.15	Distância média entre onde um IV foi solicitado “i” e onde ele foi satisfeito “d”, variando o tamanho dos conteúdos em kB com 8 APs distribuídos na rodovia. Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.	61
4.16	Número acumulado de IVs satisfeitos de acordo com a distância entre onde um IV foi solicitado “i” e onde ele foi satisfeito “d”, com conteúdos de 180 kB e 8 APs distribuídos na rodovia. Legenda: algoritmo-número de veículos.	62
4.17	Distância média entre onde um conteúdo foi solicitado “I” e onde ele foi entregue “D”, variando o tamanho dos conteúdos em kB com 8 APs distribuídos na rodovia. Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.	64
4.18	Taxa de entrega de conteúdo: (a) Variando o tamanho dos conteúdos em kB com 36 APs distribuídos no cenário urbano; (b) Variando o número de APs no cenário urbano com conteúdos de 180 kB.	66

4.19	Fração de IVs satisfeitos: (a) Variando o número de APs no cenário urbano com conteúdos de 180 kB; (b) Variando o tamanho dos conteúdos em kB com 36 APs distribuídos no cenário urbano.	68
4.20	Distância média entre onde um IV ou conteúdo foi solicitado “i” ou “I” e onde ele foi satisfeito “d” ou “D”, variando o tamanho dos conteúdos em kB com 36 APs distribuídos no cenário urbano. Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.	71
4.21	(a) IVs satisfeitos de acordo com a distância; (b) Sobrecarga das estratégias de encaminhamento: número total de IAPs enviado durante 30 rodadas de simulação.	74
4.22	(a) Fração de IVs satisfeitos variando a largura de banda da Internet dos APs; (b) Taxa de entrega de conteúdos variando a largura de banda da Internet dos APs.	75
4.23	IVs satisfeitos de acordo com a distância variando o tamanho dos conteúdos: (a) Largura de banda de acesso à Internet por AP = 256 kb/s; (b) Largura de banda de acesso à Internet por AP = 1024 kb/s.	77

Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros de simulação.	50
4.2	Comparação da fração de IVs satisfeitos com 36 APs no cenário e conteúdos de 180 kB.	69
4.3	Carga na rede de acesso à Internet no cenário urbano.	70
4.4	Capacidade máxima teórica da rede de acesso à Internet no cenário urbano.	72
4.5	Carga na rede de acesso à Internet no cenário de Colônia.	78
4.6	Capacidade máxima teórica da rede de acesso à Internet no cenário de Colônia.	78

Lista de Abreviaturas

A-Int	<i>Advanced Interest</i> , p. 13
AP	<i>Access Point</i> , p. 2
B-Int	<i>Basic Interest</i> , p. 13
CCN	<i>Content Centric Networking</i> , p. 5
CCVN	<i>Content-Centric Vehicular Networking</i> , p. 13
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> , p. 43, 44, 46
CDN	<i>Content Delivery Network</i> , p. 11
CON	<i>Content-Oriented Network</i> , p. 5
CPT	<i>Content Provider Table</i> , p. 14
CS	<i>Content Store</i> , p. 9
DLR	<i>German Aerospace Center</i> , p. 45
DMF	<i>Distance Minimization Forwarding</i> , p. 36
DSRC	<i>Dedicated Short Range Communications</i> , p. 1
DTN	<i>Delay and Disruption-Tolerant Networks</i> , p. 4
FCC	<i>U.S. Federal Communications Commission</i> , p. 1
FIB	<i>Forwarding Information Base</i> , p. 9
HCAP	Horário de Chegada ao AP, p. 40
I2I	<i>Infrastructure-to-Infrastructure</i> , p. 2

IAP	Interesse de Ponto de Acesso, p. 23
IV	Interesse Veicular, p. 22
LIFO	<i>Last In, First Out</i> , p. 40
LRU	<i>Least Recently Used</i> , p. 21, 49
MTU	<i>Maximum Transmission Unit</i> , p. 8
PIF	<i>Probabilistic Interest Forwarding</i> , p. 16
PIT	<i>Pending Interest Table</i> , p. 9
ReCIF	<i>Retransmission-Counter-based Interest Forwarding</i> , p. 16
SUMO	<i>Simulation of Urban MObility</i> , p. 42
TAF	<i>Triangular Area Forwarding</i> , p. 29
TTL	<i>Time To Live</i> , p. 13
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i> , p. 2
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i> , p. 2
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> , p. 1

Capítulo 1

Introdução

Um objetivo buscado incessantemente pela comunidade científica e pela indústria é prover conectividade em rede em todo lugar e a todo o momento. Novas possibilidades de conectividade permitem a criação de novas aplicações. Por sua vez, novas aplicações permitem o aumento do conforto, da qualidade de vida, da segurança e da produtividade das pessoas em geral. Nesse contexto, um dos cenários ao qual a academia e a indústria vêm se esforçando para aumentar a conectividade é o veicular.

A busca pela conectividade no cenário veicular é estimulada principalmente pelas aplicações de segurança que se tornam viáveis com a comunicação entre veículos. Essas aplicações têm o objetivo louvável de evitar acidentes no trânsito. É simples notar o porquê desse esforço, ao ver que, por todo o planeta, aproximadamente 1,3 milhões de pessoas morrem em acidentes de trânsito por ano [1, 2]. Além das perdas humanas, esses acidentes também são responsáveis por perdas financeiras anuais da ordem de 500 bilhões de dólares ao redor do mundo [2].

O marco inicial pela busca de conectividade em cenários veiculares ocorreu em 1999, quando a *U.S. Federal Communications Commission* (FCC) alocou 75 MHz do espectro do *Dedicated Short Range Communications* (DSRC), para ser utilizado nas comunicações do cenário veicular. A faixa de espectro alocada abrange dos 5,850 GHz até os 5,925 GHz. Apesar de essa faixa ser gratuita, ela é licenciada, o que limita seu uso a apenas os dispositivos que sigam as regras de utilização e os padrões definidos pelo FCC para a faixa.

A escolha do DSRC para uso nas redes veiculares em detrimento do WiMAX

e das redes celulares ocorre por duas razões: taxa de dados e custo. Observe que as redes celulares mais recentes têm alcance da ordem de dez quilômetros e taxa de transmissão de dados da ordem de 100 megabits por segundo. Enquanto isso, o WiMAX possui taxa de dados da ordem de 70 megabits por segundo e alcance da ordem de dezenas de quilômetros. Por sua vez, o padrão DSRC, ao usar o IEEE 802.11p como interface de rede sem fio, tem alcance da ordem de centenas de metros e taxa de transferência de até 27 megabits por segundo. Considerando o cenário veicular, onde há possibilidade de uma grande densidade de nós em uma região, a tecnologia que provê a maior taxa de dados ao usuário é o DSRC. Isso ocorre pois o número de usuários alcançados que irão compartilhar banda é menor devido ao curto alcance [3]. Em relação ao custo associado às diferentes tecnologias de comunicação, o custo para o usuário realizar uma comunicação pela rede celular é maior que pela rede WiMAX [3]. Por sua vez, o WiMAX tem um custo maior para realizar uma transmissão do que a tecnologia DSRC [3]. O uso do DSRC no ambiente veicular também é justificado pelo fato das aplicações de segurança não precisarem de alcance da ordem de quilômetros para funcionar. Assim, as comunicações veiculares são DSRC e têm como principal objetivo a prevenção de acidentes de trânsito. Isso pode ser alcançado através da troca de mensagens de segurança entre os veículos, por exemplo, fazendo um veículo alertar os veículos a seu redor de eventos inesperados como freadas bruscas e obstáculo na via.

Uma rede veicular é constituída de dois tipos de nós, Pontos de Acesso (*Access Point* - AP), e veículos. Os APs são instalados pela cidade ao longo das vias, formando uma rede integrada de acesso. Já os veículos possuem interfaces de rede instaladas que permitem que eles se comuniquem com outros veículos ou com APs. As comunicações que envolvem apenas veículos são chamadas de *Vehicle-to-Vehicle* (V2V), as que só envolvem APs são chamadas de *Infrastructure-to-Infrastructure* (I2I), e as comunicações entre veículos e APs são chamadas de *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I). Existem ainda as comunicações híbridas que envolvem saltos de enlaces de diferentes classificações.

As comunicações veiculares podem envolver pontos de acesso. Os pontos de acesso são utilizados para aumentar a conectividade no cenário veicular. Vale notar que as comunicações DSRC não são o único tipo de comunicação sem fio presente nas

redes veiculares. Por exemplo, as redes celulares coexistem no cenário veicular com as comunicações DSRC. O principal objetivo das comunicações DSRC é atender as necessidades de aplicações de segurança. Dessa forma, canais exclusivos para segurança são criados para impedir que aplicações privadas afetem a latência das aplicações de segurança, como pode ser visto na Figura 1.1.

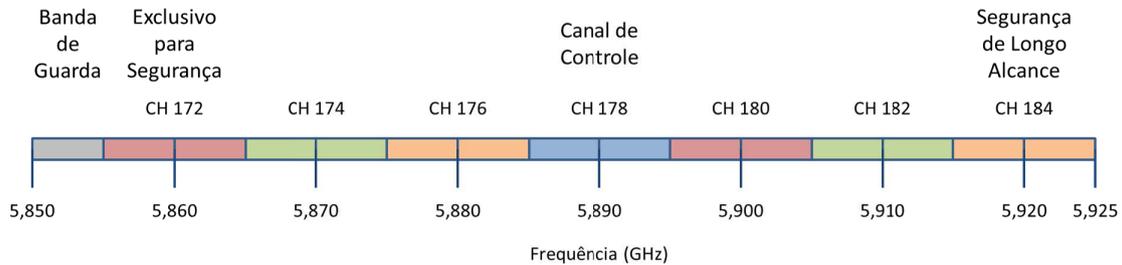


Figura 1.1: Divisão em canais da banda DSRC.

Apesar da alocação do espectro ser inicialmente motivada pelas aplicações de segurança pública, aplicações privadas também são permitidas em alguns canais da faixa de frequência alocada. Isso é realizado para acelerar o processo de adoção da tecnologia e para distribuir o custo de implantação. Assim, duas grandes classes de aplicações coexistem: as aplicações de segurança e outras aplicações de caráter informativo ou para entretenimento, por exemplo, distribuição de conteúdos. Essas classes de aplicação têm objetivos distintos e, portanto, seus requisitos funcionais também são diferentes. Por exemplo, aplicações de segurança devem possuir o menor atraso possível, o que não é essencial à distribuição de conteúdos.

Dentre as aplicações que não são de segurança se destacam as aplicações informativas e de entretenimento. Diferentemente das aplicações de segurança que exigem baixo atraso de entrega de mensagem [4], as aplicações informativas e de entretenimento geralmente são mais exigentes em relação à largura de banda. Este trabalho se concentra nessas aplicações.

Apesar dos muitos cenários de aplicação, a adoção das redes veiculares em larga escala ainda está em progresso. Como consequência, a infraestrutura de rede no cenário veicular é composta por ilhas de conectividade delimitadas pelo alcance do rádio de cada AP [5]. Além disso, o movimento dos veículos pode tornar as conexões curtas e intermitentes, devido a mudanças na topologia da rede e ao movimento dos veículos [5]. Essas características impõem uma barreira ao uso dos protocolos

tradicionais baseados na pilha TCP/IP, visto que não há garantia que um caminho fim-a-fim exista ou venha a existir entre os nós da rede [6].

Nas aplicações de entretenimento do cenário veicular, as redes tolerantes a atrasos e desconexões (*Delay and Disruption-Tolerant Networks* - DTN) podem ser usadas [6], pois elas empregam comutação de mensagens com transferência de custódia para contornar a conectividade intermitente. Dessa forma, ao invés de um nó da rede encaminhar as mensagens recebidas imediatamente, ele as armazena e as replica ao encontrar contatos oportunos. Caso em uma transmissão algum problema de comunicação aconteça, a mensagem não é perdida, já que o nó que enviou a mensagem ainda a possui. Portanto, as DTNs introduzem o conceito de persistência no encaminhamento de mensagens como forma de minimizar os problemas de conectividade das redes veiculares.

De fato, as DTNs contornam o problema de conectividade do cenário veicular. Contudo, elas ainda requerem que os nós da rede saibam *a priori* para qual nó um conteúdo deve ser solicitado. Ou seja, as DTNs seguem o paradigma de comunicação orientado à estação. Ainda, as DTNs não consideram a coexistência de múltiplas fontes de conteúdo, o que pode tornar a solução menos eficiente. Considerando o paradigma orientado à estação nas redes veiculares, para solicitar uma informação, um usuário em um veículo deve saber que usuário em um outro veículo ou qual AP possui a informação desejada, o que pode não ser prático nem eficiente. A não praticidade vem do fato do cliente precisar conhecer o identificador (endereço ou nome) do usuário e do veículo ou do AP que possui a informação desejada. Além disso, como usando o paradigma orientado à estação a rede não considera a possibilidade de existirem múltiplos servidores para uma informação, a rede se torna ineficiente no contexto. Por exemplo, diversos usuários próximos de um usuário interessado na música “M” podem possuí-la. Todavia, o paradigma orientado à estação exige que o cliente interessado especifique um servidor para solicitar “M”. Assim, é possível que o cliente escolha receber “M” de um servidor mais longe do que o necessário por desconhecimento da existência de outros servidores de “M” mais próximos. Outra opção para um usuário solicitar uma informação é ele pedir essa informação à Internet através de um AP.

Alternativamente ao paradigma orientado à estação, um paradigma de distri-

buição de informação foi proposto, o das redes orientadas a conteúdo (*Content-Oriented Networks* - CONs). Essas redes podem ser uma alternativa às DTNs nos cenários veiculares. Nessas redes, ao invés de especificar um servidor onde existe um determinado conteúdo, o cliente simplesmente especifica qual conteúdo deseja. A partir daí, a rede se responsabiliza por encaminhar esse conteúdo ao cliente a partir de um nó que o possua [7, 8, 9]. Pode-se ver que o objetivo da rede é entregar conteúdos aos usuários, e não estabelecer uma comunicação com outro nó [9]. Assim, as CONs eliminam a necessidade de identificar os nós da rede [10], como feito na arquitetura *Content Centric Networking* (CCN), a arquitetura de implementação mais conhecida de redes orientadas a conteúdo [11].

Na arquitetura CCN, a comunicação ocorre de forma simples. Os nós da rede disseminam pacotes de interesse para solicitar os conteúdos que desejam. Ao receber um interesse, um nó pode encaminhá-lo aos outros nós, caso não possua o conteúdo especificado, ou enviar o conteúdo solicitado, caso o possua armazenado. Assim, nota-se que uma característica intrínseca da CCN é a persistência de conteúdos, algo que já é explorado pelas DTNs para resolver os problemas das conexões curtas e intermitentes do cenário veicular. Contudo, por não utilizar o paradigma orientado à estação, o uso da CCN no cenário veicular pode ser promissor, o que é avaliado neste trabalho. Contudo, a CCN não pode ser aplicada diretamente no cenário veicular, pois ela foi inicialmente projetada para uso em redes cabeadas. Então, são necessárias algumas adaptações para que a utilização da CCN em redes sem fio aconteça de forma eficiente. Os benefícios e modificações necessárias para aplicar a CCN no cenário veicular são explorados no Capítulo 2. Neste trabalho, a arquitetura CCN modificada para atuar no cenário veicular é utilizada tanto nos APs quanto nos veículos.

No escopo de entrega de conteúdos da Internet, um grande problema dos cenários veiculares é a curta duração dos contatos entre os nós da rede. Os contatos curtos muitas vezes fazem com que a obtenção de conteúdos seja pouco provável. Então, é importante que o número de oportunidades que um usuário tem para obter os conteúdos solicitados seja aumentado ao longo de sua trajetória, mesmo considerando o uso de múltiplas fontes de conteúdo [12, 13]. Em outras palavras, um conteúdo deve poder ser recebido mesmo se o usuário sair da cobertura do AP a

quem ele solicitou o conteúdo pela primeira vez. Adicionalmente, já que os contatos são de curta duração, é importante que os contatos entre veículos e APs sejam usados o mais eficientemente possível, a fim de maximizar a satisfação dos interesses dos usuários. O uso da trajetória dos veículos juntamente com o paradigma de redes orientadas a conteúdo ainda não foi explorado na literatura para aumentar a entrega de conteúdos.

O presente trabalho explora o uso de *cache* proativo nos APs para aumentar a probabilidade de entrega de conteúdos no cenário veicular, bem como para utilizar os contatos V2I de curta duração de maneira mais eficiente. A ideia consiste em, conhecendo o destino geográfico dos usuários, encaminhar os interesses dos usuários aos APs onde eles provavelmente irão passar em suas trajetórias até seus destinos. Portanto, um AP proativamente solicita e recebe da Internet os conteúdos pedidos pelos usuários antes que eles alcancem a cobertura sem fio do AP. Assim, quando o usuário entra no alcance de um AP em sua trajetória, seu conteúdo já está disponível no AP. Isso evita que o usuário precise esperar o conteúdo da Internet ser obtido pelo AP durante o tempo de contato entre ele e o AP, aumentando a eficiência do uso dos contatos curtos. Para alcançar esse objetivo, duas estratégias de encaminhamento de pacotes de interesse entre APs e um protocolo de descoberta de vizinhança são propostos. Uma das estratégias de encaminhamento propostas usa um triângulo para delimitar a área onde o usuário provavelmente vai passar no caminho até seu destino e, em seguida, encaminha o pedido do usuário aos APs dentro do triângulo. Já na outra estratégia de encaminhamento proposta, os APs encaminham o pedido do usuário de modo a minimizar a distância até o destino geográfico do usuário. Vale notar que apesar do foco do trabalho estar em aproveitar melhor os contatos V2I, as comunicações V2V também são utilizadas no trabalho.

As estratégias de encaminhamento são testadas em dois cenários veiculares simulados: urbano e rodoviário. Além disso, avaliam-se as estratégias em uma fração do traço de mobilidade dos veículos de Colônia [14] para submeter as estratégias a um cenário mais próximo da realidade. Nos experimentos conduzidos são avaliadas: a fração de interesses dos usuários atendidos, a taxa de entrega de conteúdos e o quão rápido os usuários tem seus interesses satisfeitos. As estratégias de encaminhamento propostas são comparadas com a CCN sem encaminhamento. Os resultados

mostram que as estratégias de encaminhamento sempre satisfazem mais interesses e os satisfazem mais rapidamente que a CCN sozinha, alcançando ganhos na fração de interesses atendidos de quase 50% no cenário urbano. Este trabalho teve publicação aceita no SBRC 2015 [15].

Esta dissertação de mestrado está organizada da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta detalhes da arquitetura CCN, seu uso no cenário veicular, bem como trabalhos relacionados na área. O Capítulo 3 descreve as estratégias de encaminhamento de interesses e o protocolo de descoberta de vizinhança desenvolvidos. No Capítulo 4, os cenários de teste são descritos e os resultados mostrados. Finalmente, o Capítulo 5 conclui o trabalho e apresenta direções futuras.

Capítulo 2

CCN em Redes Veiculares

Neste capítulo, primeiramente é descrita a arquitetura CCN tradicional. Em seguida, descreve-se como trabalhos relacionados recentes modificam a arquitetura CCN a fim de torná-la mais adequada aos cenários veiculares.

2.1 Arquitetura CCN

A CCN é uma arquitetura de redes orientadas a conteúdo cujo principal objetivo é viabilizar a requisição e entrega de conteúdos. Para tanto, dois tipos de pacote são definidos: interesse e conteúdo. O primeiro é responsável por formalmente solicitar um conteúdo à rede, enquanto o segundo é o próprio conteúdo solicitado ou parte dele. Os conteúdos da Internet não têm restrição de tamanho, entretanto, as tecnologias de rede geralmente impõem um tamanho máximo de pacote, chamado *Maximum Transmission Unit (MTU)*. Dessa forma, os conteúdos usualmente são divididos em pedaços menores que respeitam a MTU da tecnologia de rede para evitar fragmentação.

Na CCN, para solicitar um conteúdo completo ou ainda apenas um pedaço do conteúdo deve-se conhecer o identificador do que se deseja solicitar à rede. Na arquitetura CCN, tanto conteúdos como pedaços de conteúdo são identificados por nomes. Esses nomes devem ser únicos na rede CCN e seguem uma hierarquia constituída de um número variável de componentes, similar ao endereço de um sítio da Internet. Por exemplo, `\gta\publicacoes\2015\10.pdf\3` é o identificador do terceiro pedaço do arquivo `10.pdf`, sendo `gta` o primeiro componente do nome,

publicações o segundo e assim por diante. Dessa forma, um pacote de interesse é formado essencialmente pelo nome do pedaço do conteúdo solicitado. Contudo, pacotes de interesse podem possuir campos adicionais, como por exemplo, o campo **SCOPE** que limita o número de saltos de um pacote de interesse. Vale notar que um pacote de interesse com campo **SCOPE** igual a 3 tem sua propagação limitada a dois saltos.

Além dos tipos de pacote, a arquitetura CCN também define a estrutura dos nós da rede e como eles agem para alcançar as principais funcionalidades da CCN. Um exemplo de estrutura de um nó CCN pode ser visto na Figura 2.1. Nessa figura, pode-se ver que um nó CCN é composto de três estruturas: **FIB** (*Forwarding Information Base*), **PIT** (*Pending Interest Table*) e **CS** (*Content Store*). A **FIB** é similar a uma tabela de roteamento IP, mas ao invés de relacionar endereços IPs a uma interface de rede, a **FIB** relaciona nomes de conteúdo às interfaces para encaminhar pacotes de interesse. A **PIT** armazena os interesses recebidos que ainda não foram atendidos, juntamente com as interfaces de rede de onde esses interesses vieram. Finalmente, a **CS** armazena os conteúdos e pedaços de conteúdo recebidos e possui políticas de descarte para caso ela fique cheia. A interação do nó CCN com o mundo externo é feita através de abstrações de interface, essas abstrações são chamadas de **Face**. As **Faces** tornam a CCN independente das tecnologias de transmissão abaixo dela e das aplicações acima dela na pilha de protocolos, como pode ser visto na Figura 2.1.

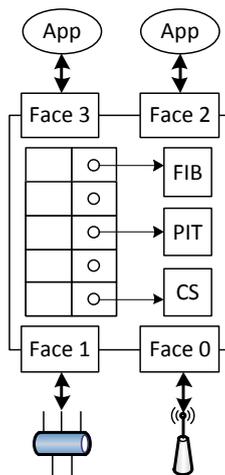


Figura 2.1: Exemplo da estrutura de um nó CCN.

Na arquitetura CCN, os nós da rede enviam pacotes de interesse para requisitar os conteúdos que eles desejam, como pode ser visto na Figura 2.2(a). De modo geral, os pacotes de interesse criam entradas nas PITs dos nós no caminho até o conteúdo solicitado, esse processo é ilustrado na Figura 2.2(b). Uma vez que um nó com o conteúdo pedido é alcançado, o pacote de conteúdo segue a trilha de entradas nas PITs deixada pelo interesse que o solicitou até alcançar o emissor original do interesse, como ilustrado nas Figuras 2.2(c) e 2.2(d) respectivamente. Note que se outro usuário solicitar o mesmo conteúdo a um dos roteadores da Figura 2.2(d), a resposta será obtida mais rapidamente, já que o conteúdo já se encontra em cache nos roteadores. Mais especificamente, ao receber um interesse, um nó da rede verifica se ele possui o conteúdo ou parte do conteúdo requisitado pelo interesse em sua CS. Caso não possua, o nó encaminha o interesse a outros nós e o adiciona à sua PIT. Todavia, se o nó possuir o que foi solicitado armazenado na CS, ele envia o conteúdo ou parte de conteúdo que atende o interesse através da interface pela qual o interesse foi recebido.

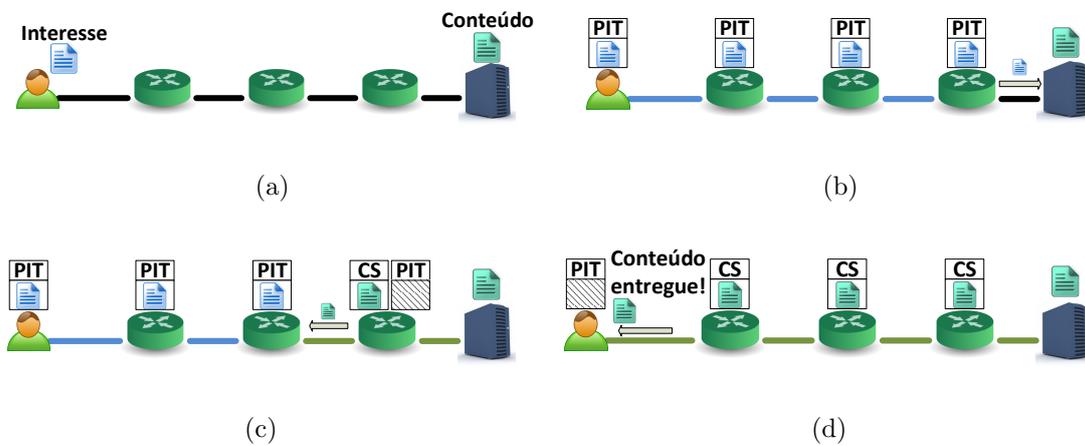


Figura 2.2: Funcionamento da arquitetura CCN: (a) Requisição: o usuário envia um interesse para solicitar um conteúdo; (b) Encaminhamento do interesse: o interesse é roteado na direção do nó da rede que possui o conteúdo, a cada salto o interesse é adicionado a PIT dos nós que não possuem o conteúdo; (c) Encaminhamento do conteúdo: os nós da rede encaminham o conteúdo à interface pela qual o interesse foi recebido, satisfazendo as PITs e armazenando o conteúdo nas CSs; (d) Entrega do conteúdo: o conteúdo alcança o emissor original do interesse, o interesse é removido da PIT do usuário e o conteúdo é entregue a ele.

Pode-se notar que a característica chave da arquitetura CCN é o armazenamento de conteúdos em *cache*, o que também pode ser visto como uma forma de persistência de conteúdo. Vale notar que na CCN o tempo de vida máximo de um pacote de conteúdo é definido por um campo de 32 bits em seu cabeçalho [16], sendo o tempo especificado em segundos. Isso resulta em um período máximo de persistência de conteúdo superior a 138 anos [16]. Entretanto, como o paradigma orientado à estação não é usado na CCN, as réplicas de conteúdo armazenadas na rede podem ser usadas para satisfazer qualquer cliente que deseje o mesmo conteúdo. Isso não pode ser feito nas DTNs, pois o paradigma orientado à estação faz com que cada pacote seja específico para um cliente.

Os benefícios de armazenar e replicar conteúdos de forma descentralizada nos cenários veiculares são investigados na literatura [17]. Ademais, armazenar réplicas de conteúdo na rede é uma solução conhecida para acelerar a entrega de dados aos usuários, já que as cópias dos conteúdos podem estar mais próximas dos clientes do que a fonte. Por exemplo, esse conceito é usado por *Content Delivery Networks* (CDNs) para oferecer uma melhor qualidade de serviço aos usuários da Web [18].

Apesar dos benefícios, a replicação de conteúdo implica a necessidade de uma maior capacidade de armazenamento da rede como um todo, já que existe redundância dos conteúdos armazenados. Logo, os nós também precisam de uma capacidade de armazenamento maior do que precisariam se não houvesse a redundância, o que implica em um aumento do custo dos nós da rede, no caso, dos veículos. Apesar disso, espaço de armazenamento é uma das necessidades da computação mais baratas, e a adição de um disco rígido não afeta de forma significativa o valor final de um veículo.

Na seção seguinte apresentam-se as adaptações necessárias para utilizar a arquitetura CCN no cenário veicular e os trabalhos relacionados.

2.2 Adaptação da CCN às VANETs e Trabalhos Relacionados

Já que a arquitetura CCN não foi originalmente projetada para redes sem fio, empregá-la no cenário veicular requer adaptações. Por exemplo, em redes cabeadas

o encaminhamento de um interesse pela mesma interface de rede por onde ele foi recebido é proibido para não causar laços (*loops*) na rede. Apesar disso, em cenários sem fio, é possível que existam nós da rede com apenas uma interface de rede, fazendo com que a restrição anterior não seja aplicável. Assim, a restrição deve ser removida, já que esses nós também devem encaminhar interesses.

Outro problema que ocorre ao aplicar a CCN ao cenário sem fio é chamado de *broadcast storm* de pacotes de interesse [19]. Esse problema ocorre quando a rede é inundada com retransmissões em *broadcast* de pacotes de interesse. No caso da CCN em redes veiculares, isso ocorre devido à política de roteamento dos pacotes de interesse. Como visto anteriormente, um nó que não possua o conteúdo solicitado por um interesse recebido deve retransmiti-lo a seus vizinhos.

Cientes do problema, os trabalhos que aplicam a arquitetura CCN em cenários veiculares geralmente usam métodos de controle de acesso ao meio para evitar que transmissões redundantes sejam realizadas. Por exemplo, existem trabalhos que propõem a utilização de temporizadores para controlar o acesso ao meio de forma que nós vizinhos não transmitam o mesmo pacote de interesse em um curto intervalo de tempo [10, 20]. Nesses trabalhos [10, 20], os nós agendam a transmissão de interesses e escutam o meio de comunicação por um período de tempo aleatório. Caso o nó escute o interesse agendado para transmissão sendo transmitido por outro nó, a transmissão agendada é suprimida. O mesmo vale para pacotes com parte de um conteúdo, evitando ambos *broadcast storm* de pacotes de interesse e retransmissões de conteúdo desnecessárias.

Por outro lado, utilizar a CCN em um meio de difusão também possui benefícios. Como na CCN as mensagens enviadas de interesse e de conteúdo não possuem um destinatário específico, uma transmissão recebida por múltiplos nós pode ser utilizada por todos eles, economizando largura de banda. Dessa maneira, se um conteúdo é de interesse de múltiplos usuários no alcance de um AP, esse AP só precisará transmitir o conteúdo uma vez para atender todos os usuários. Adicionalmente, se os nós realizarem armazenamento promíscuo de conteúdos como proposto em [21], i.e., armazenando conteúdos mesmo que eles não sejam de interesse, a disponibilidade de conteúdos pode crescer na rede sem nenhum custo adicional à rede.

A implantação da arquitetura CCN no cenário veicular é um tema recente que

vem sendo estudado pela comunidade científica. Esse esforço existe pelos benefícios que o paradigma de orientação a conteúdo traz para o cenário veicular em relação ao antigo paradigma de orientação a estação.

Os trabalhos na área investigaram o uso da arquitetura CCN no cenário veicular propondo formas de evitar o *broadcast storm*, o armazenamento promíscuo de conteúdos, esquemas de nomeação e arquiteturas.

2.2.1 Armazenamento Promíscuo de Conteúdos

Em [21], os autores desenvolvem um esquema para nomear os conteúdos nas redes veiculares e mostram um caso de uso do esquema em uma aplicação de disseminação de informação do tráfego. Ainda em [21], os autores propõem o uso do armazenamento promíscuo de conteúdos, armazenando conteúdos mesmo que eles não sejam de interesse para aumentar a disponibilidade sem custo adicional à rede. No trabalho [21], os autores impõem TTL igual a 1 aos pacotes de interesse enviados, de maneira que os interesses nunca são encaminhados pelos veículos. Ainda assim, os veículos em contato direto com um determinado veículo podem satisfazer os interesses desse veículo caso possuam os conteúdos solicitados por ele. Adicionalmente, os autores não consideram o uso de APs para propagar interesses ou conteúdos. Assim, a única forma de um veículo receber informação é encontrando outro veículo agindo como mula de dados.

O armazenamento promíscuo proposto em [21] é usado nesta dissertação. Além disso, nesta dissertação o TTL dos interesses também é limitado a 1 através do campo SCOPE dos pacotes de interesse para evitar o problema do *broadcast storm*. Entretanto, esta dissertação considera o uso dos APs para propagar os interesses dos usuários entre APs e para prover conteúdos aos usuários.

2.2.2 Content-Centric Vehicular Networking

No trabalho [22], os autores criam a arquitetura *Content-Centric Vehicular Networking* (CCVN) baseada na CCN. Na arquitetura CCVN existem dois tipos de pacotes, os de interesses e os de conteúdos. Todavia, os pacotes de interesse são divididos em duas categorias, B-Int (*Basic Interest*) e A-Int (*Advanced Interest*). Um B-Int é enviado para receber o primeiro pedaço de um determinado conteúdo,

que pode ser formado por mais de um pedaço de conteúdo. Por sua vez, A-Ints são enviados aos nós descobertos pelo B-Int que possuem o conteúdo desejado para solicitar as partes restantes do conteúdo. Ao identificar os nós de quem um conteúdo deve ser obtido, essa proposta se aproxima do paradigma orientado à estação.

Na arquitetura CCVN [22], os autores ainda introduzem a estrutura *Content Provider Table* (CPT). A CPT é responsável por armazenar as informações dos nós descobertos que possuem os conteúdos desejados. A CCVN também contém as estruturas usuais da CCN, PIT e CS. Entretanto, a FIB é removida da arquitetura sob a justificativa de que os nós sempre possuem apenas uma interface de rede, o que tornaria a FIB inútil. Contudo, essa suposição não é sempre verdadeira. Por exemplo, APs geralmente possuem além da interface sem fio, interfaces de rede para comunicação com outros APs. Adicionalmente, o trabalho não considera a utilização de armazenamento promíscuo de conteúdos na CCVN, descartando os conteúdos que não são do interesse dos usuários no veículo.

O trabalho [22] é o primeiro a avaliar o desempenho de uma arquitetura similar a CCN (CCVN) no cenário veicular através de simulação. A arquitetura CCVN é comparada com o TCP/IP no cenário veicular através de um simulador de redes. As métricas de taxa de entrega e atraso de entrega são avaliadas. Os resultados mostram que a arquitetura baseada em CCN supera o TCP/IP no cenário veicular especificado.

Enquanto o trabalho [22] remove a FIB, nesta dissertação a FIB é utilizada devido aos APs precisarem de mais de uma interface de rede para formar a rede de acesso à Internet. As categorias de interesse A-Int e B-Int não são usadas nesta dissertação, todavia, a ideia de dividir interesses em categorias é utilizada.

2.2.3 Controle de Acesso ao Meio com Temporizadores

Em [10], os autores dão continuidade ao trabalho [21] desenvolvendo uma aplicação de disseminação de informação de tráfego que usa o arcabouço de nomeação de conteúdos proposto em [21]. Os autores não restringem o número de saltos dos interesses a 1 como faziam no trabalho anterior [21], o que propicia o *broadcast storm*. Cientes dos problemas causados pelas colisões e pela incapacidade de detectar colisões no meio sem fio, os autores propõem um conjunto de tempori-

zadores guiados pelo nome nos pacotes para regular o acesso ao meio de forma a minimizar a chance de colisões. O conjunto de temporizadores é formado por quatro temporizadores distintos: o *collision-avoidance timer*, o *pushing timer*, o *NDN-layer retransmission timer* e o *application retransmission timer*.

O *collision-avoidance timer* [10] define o intervalo de tempo aleatório que um nó deve aguardar antes de uma transmissão. Caso outro nó transmita antes o mesmo pacote, a transmissão do pacote é cancelada.

O *pushing timer* [10] tem a função de priorizar que nós mais distantes do nó que contém a informação a retransmitam. Isso é benéfico para a aplicação criada no trabalho já que a informação do trânsito é mais valiosa longe do local onde foi produzida. Contudo isso não necessariamente é válido para qualquer aplicação.

Como pacotes enviados em *broadcast* não tem a entrega confirmada, o *NDN-layer retransmission timer* [10] serve para repetir uma transmissão até que um número máximo de vezes seja alcançado, ou até que o nó ouça outro nó transmitindo a mensagem, o que é considerado uma confirmação de entrega implícita.

O *application retransmission timer* [10] é responsável por retransmitir um interesse no nível de aplicação, caso ele não seja atendido.

A aplicação criada pelos autores em [10] é implementada no ndnSIM [23], um simulador de redes orientadas a conteúdo implementado sobre o ns-3. Todavia, o modelo de mobilidade usado na avaliação da aplicação é muito simples, com todos os carros andando no mesmo sentido, com a mesma velocidade e igualmente espaçados. Além disso, o cenário de testes é muito simples, com apenas um nó criando conteúdos e um cliente os solicitando, todos os outros carros agem apenas como nós intermediários. Os autores avaliam a velocidade em km/s de propagação do conteúdo, o atraso de entrega e a vazão fim-a-fim obtidas pela aplicação.

Dentre os temporizadores do trabalho [10], o único que tenta evitar colisões de forma genérica é o *collision-avoidance timer*, assim esse temporizador é usado nesta dissertação.

2.2.4 Controle do Broadcast Storm com Probabilidade de Encaminhar Interesses

O trabalho [24] adota outra abordagem para minimizar o *broadcast storm* de pacotes de interesse. No trabalho, três mecanismos são propostos para redes em malha sem fio: o *Probabilistic Interest Forwarding* (PIF), o *Retransmission-Counter-based Interest Forwarding* (ReCIF) e o ReCIF+PIF.

Quando um nó está em cenários com alta densidade de nós, o PIF [24] define uma probabilidade para que um nó encaminhe pacotes de interesse. Por outro lado, quando um nó está em cenários com densidade mais baixa de nós os interesses são encaminhados normalmente. A ideia é suprimir transmissões em cenários com alta concentração de nós, onde o problema do *broadcast storm* é mais provável de ocorrer.

O ReCIF [24] adiciona um campo aos pacotes de interesse para contabilizar o número de vezes que eles foram encaminhados. Assim, quando um nó está em cenários com alta densidade de nós, ele verifica se um interesse foi encaminhado mais vezes que um limiar antes de transmiti-lo. Caso o contador de saltos do interesse ultrapasse o limiar, o interesse não é encaminhado. Já quando um nó está em cenários menos densos, o mecanismo não interfere no encaminhamento de interesses.

O ReCIF+PIF [24] é formado pela simples união do ReCIF e do PIF. Os resultados obtidos no trabalho mostram que os mecanismos podem reduzir de fato o *broadcast storm* permitindo que mais conteúdos sejam entregues com um atraso menor.

A abordagem PIF para minimizar o *broadcast storm* proposta em [24] é ortogonal a estratégia de limitar o número de saltos dos pacotes de interesse utilizada nesta dissertação. Dessa forma, essa estratégia poderia ser utilizada em conjunto com o limite do número de saltos. Entretanto, como o TTL dos pacotes de interesse é igual a 1, nesta dissertação o *broadcast storm* de pacotes de interesse não acontece e o uso do PIF não é necessário. Vale notar que a estratégia ReCIF é similar a estratégia usada quando os veículos estão em cenários densos, quando os encaminhamentos são limitados por número de saltos.

2.2.5 GeoZone

O trabalho [25] propõe um arcabouço para minimizar o *broadcast storm* das CCNs no cenário veicular. O arcabouço é composto de um esquema de nomeação georeferenciado e um mecanismo que encaminha pacotes de interesse. A proposta é implementada no ndnSIM e comparada ao trabalho [10], e ao CCN sem nenhuma modificação. Os resultados mostram que definir escopos geográficos para os pacotes de interesse em adição ao uso dos temporizadores para controlar o acesso ao meio reduz ainda mais o *broadcast storm* [25].

2.2.6 Outros Trabalhos

Existem ainda trabalhos que propõem outras formas de distribuição de conteúdo em VANETs, por exemplo, trabalhos que usam codificação na rede [26, 27]. Contudo a arquitetura CCN pode obter conteúdos mais rápido ao custo de possíveis *broadcast storms* causadas pelos pacotes de interesse [28]. Todavia, esse problema pode ser reduzido de múltiplas formas. Ainda, em [29], os autores focam principalmente em avaliar a influência de usar diferentes políticas de *cache* nos nós da rede CCN em cenários veiculares.

No trabalho [30], os autores propõem um modelo de predição de mobilidade baseado na técnica de *fog-of-war*, comumente utilizada em jogos. Em adição, uma arquitetura que integra ambas as redes celular e infraestruturada com APs é proposta. Essa arquitetura utiliza servidores centralizados para tratar e predizer a informação do tráfego dos veículos e ainda para gerenciar as requisições dos usuários. Os autores mostram os benefícios de usar o modelo de predição de mobilidade para proativamente receber o conteúdo dos usuários ao longo de suas rotas através de análises e simulações. Entretanto, os autores não definem os protocolos de rede utilizados na arquitetura o que impossibilita comparações.

Apesar de existirem trabalhos que propõem o uso da arquitetura CCN nas redes veiculares, nesses trabalhos não é formalmente definido como a rede de acesso formada pelos APs pode ser explorada de forma a aumentar a taxa de entrega [10, 20, 21, 31, 30]. Adicionalmente, nenhum trabalho utiliza a informação do destino da trajetória dos usuários para aumentar as taxas de entrega em redes CCN de forma distribuída, como feito para redes orientadas à estação em [12]. Este tra-

balho preenche essa lacuna como pode ser visto no Capítulo 3. Então, a CCN com a proposta é comparada à CCN sem a proposta a fim de avaliar as vantagens e as desvantagens do uso da informação do destino dos usuários na entrega de conteúdos no Capítulo 4.

Capítulo 3

Estratégias para Distribuição de Conteúdos em Redes Veiculares

Este capítulo apresenta as estratégias propostas para que a distribuição de conteúdos em redes veiculares se torne orientada à trajetória. O funcionamento da rede é descrito, sendo mostrado como os usuários e APs agem para solicitar e prover conteúdos, respectivamente. Finalmente, um protocolo de descoberta de vizinhança, necessário para o funcionamento das estratégias, é definido.

Esta dissertação propõe o uso de cache proativo nos APs ao longo da trajetória do usuário para melhorar a distribuição de conteúdos em cenários veiculares. A ideia básica consiste em proativamente disponibilizar nos APs ao longo da trajetória dos usuários até o destino os conteúdos solicitados. Dessa forma, os conteúdos dos usuários já estarão disponíveis nos APs em cache antes dos usuários chegarem ao alcance deles. A ideia básica pode ser vista na Figura 3.1.

3.1 Premissas

Os veículos possuem uma interface de rede sem fio IEEE 802.11p e um GPS. Os APs conhecem a própria posição geográfica e possuem além de uma interface IEEE 802.11p, interfaces cabeadas conectando um AP a seus APs vizinhos e uma conexão à Internet independente das interfaces anteriores e dos APs vizinhos. Note que dois APs são ditos vizinhos se existe uma interface cabeada conectando os dois diretamente. A interface sem fio dos veículos permite que os usuários solicitem

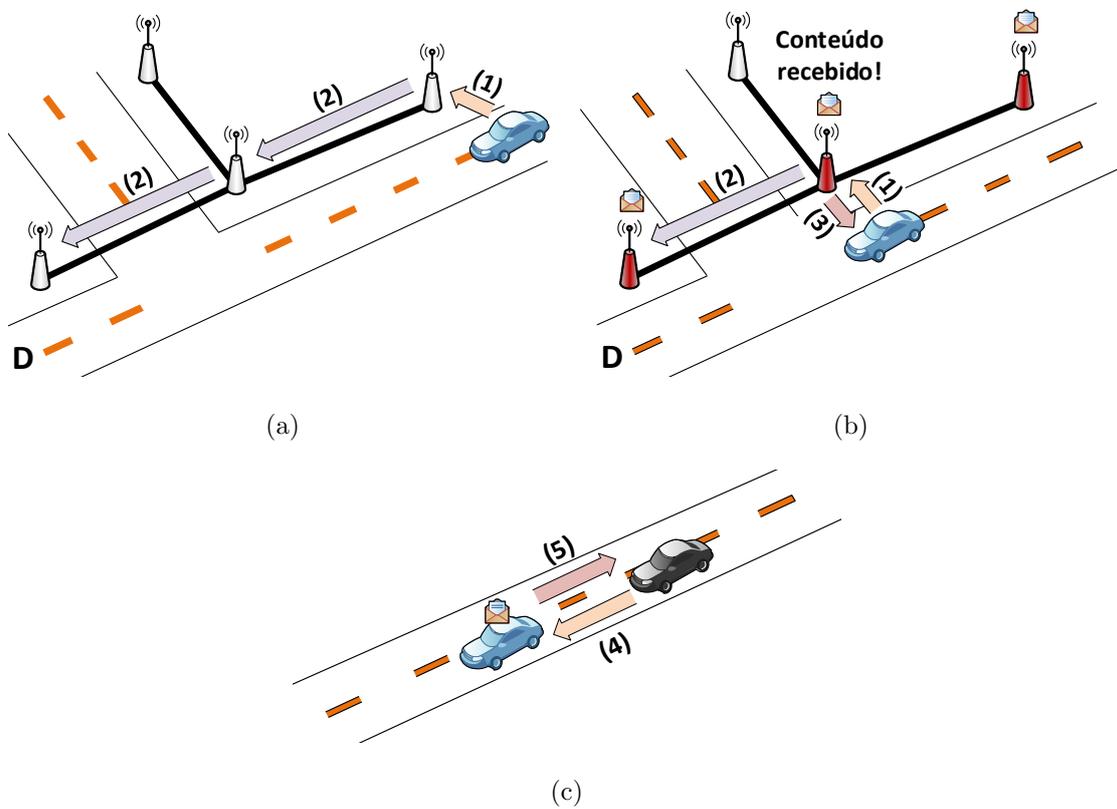


Figura 3.1: Ideia básica da proposta: (a) Requisição: a seta em (1) representa a requisição de um conteúdo, enquanto a seta em (2) representa o encaminhamento dessa requisição aos APs na direção do destino D. (b) Disponibilidade: APs que possuam o conteúdo solicitado ou parte dele já podem satisfazer as requisições dos usuários. Respectivamente, as setas em (1) e (2) indicam mais uma vez o pedido do conteúdo pelo usuário e o encaminhamento desse pedido pelo AP. A seta em (3) indica a entrega do conteúdo já disponível em cache. (c) Comunicação entre veículos: a seta em (4) representa a requisição de um conteúdo de um veículo sendo recebida por um veículo próximo. O veículo próximo possuindo o conteúdo pedido em cache envia o conteúdo, o que é representado pela seta em (5).

conteúdos aos APs e veículos próximos. Um AP ou veículo recebendo um pedido e possuindo o conteúdo que atende o pedido, transmite o conteúdo solicitado pela interface sem fio. Dessa forma, tanto APs quanto veículos podem satisfazer o pedido de um veículo. A interface cabeada que interconecta os APs aos APs vizinhos é usada apenas para encaminhar os pedidos dos usuários quando as estratégias de encaminhamento propostas são utilizadas. Os conteúdos dos usuários não são encaminhados entre APs. A conexão dos APs à Internet é usada pelos APs para receber os conteúdos pedidos pelos usuários que ainda não estão no cache do AP.

Esta dissertação se baseia na arquitetura CCN e todos os veículos e APs da rede são nós da rede CCN. Como consequência, tanto veículos como APs possuem as três estruturas básicas da CCN: FIB, PIT e CS. A política de descarte de conteúdos usada na CS de todos os nós da rede é a política *Least Recently Used* (LRU). Nessa política, caso seja necessário descartar um conteúdo, o conteúdo a ser descartado é o conteúdo que foi usado pela última vez há mais tempo. Todos os veículos e APs utilizam cache promíscuo. Dessa forma, caso um veículo ou AP escute a transmissão de um conteúdo, eles armazenam esse conteúdo na CS mesmo que ele não tenha sido solicitado. Contudo, somente um AP usando as estratégias de encaminhamento realiza cache proativo, solicitando à Internet os pedidos dos usuários encaminhados por outros APs. Na seção seguinte os tipos de pacotes usados na proposta são descritos.

3.2 Tipos de Pacote

Na arquitetura CCN existem dois tipos de pacotes, pacotes de interesse e pacotes de conteúdo. Nesta dissertação esses dois tipos são subdivididos. Os pacotes de interesse são divididos em pacotes de interesse veicular e pacotes de interesse de ponto de acesso. Os pacotes de interesse veicular são utilizados pelos usuários para pedir conteúdos. Já os pacotes de interesse de ponto de acesso são pacotes de interesse de controle usados pelos pontos de acesso para descobrir os APs vizinhos ou para encaminhar os pedidos dos usuários a outros APs. Os pacotes de conteúdo são divididos em dois tipos, conteúdo dos usuários e conteúdo de descoberta de vizinhança. O primeiro tipo representa os próprios conteúdos solicitados pelos usuários, enquanto

o segundo tipo é um pacote de conteúdo de controle usado pelo protocolo de descoberta de vizinhança. Note que apesar dos interesses de ponto de acesso usados para encaminhar os pedidos dos usuários serem por definição pacotes de interesse, eles nunca são satisfeitos, já que não existem conteúdos associados a eles.

Para que os APs prevejam a trajetória dos usuários, propõe-se a inserção de três campos no cabeçalho dos pacotes de interesses veiculares (IVs). Esses campos armazenam a posição geográfica atual do usuário, a posição geográfica do seu destino e a hora estimada de chegada do usuário ao destino. Essas três informações podem ser obtidas a partir dos GPSs nos celulares ou veículos dos usuários. O formato dos IVs pode ser visto na Lista 3.1.

Para o encaminhamento dos pedidos dos usuários (IVs) ser realizado geograficamente e na direção dos destinos indicados nos próprios IVs, assume-se que cada AP conhece a própria posição geográfica e a posição de todos os APs vizinhos de 1 salto. A primeira suposição pode ser realizada através de configurações durante a instalação dos APs, já que eles não se movem. Já a segunda suposição é atendida na dissertação através de um protocolo de descoberta de vizinhança que é proposto respeitando o paradigma orientado a conteúdo.

0										1										2										3									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Versão										0x00										Comprimento do Pacote																			
SCOPE										Flags/Reservado										Comprimento do Cabeçalho																			
Tipo da Mensagem																				Comprimento da Mensagem																			
										Nome de Comprimento Variável																													
										Latitude Posição Atual																													
										Longitude Posição Atual																													
										Latitude do Destino do Usuário																													
										Longitude do Destino do Usuário																													
										Hora Estimada de Chegada ao Destino																													
										Tempo de Vida do IV em ms (Opcional)																													

Lista 3.1: Formato dos pacotes de interesse veiculares.

Com os APs conhecendo a própria posição e a posição de seus vizinhos, eles podem encaminhar os IVs encapsulados em pacotes de interesse de ponto de acesso

(IAPs) a outros APs. Portanto, o conteúdo de um usuário pode ser solicitado à Internet em APs onde é previsto que o usuário vai passar, antes que ele chegue lá.

Como nas CCNs o roteamento é baseado em nomes, esquemas de nomeação de interesses e conteúdos devem ser definidos, a Seção 3.3 detalha ambos.

3.3 Roteamento e Esquema de Nomeação de Interesses e Conteúdos

Neste trabalho, o seguinte esquema de nomeação é proposto para os IVs: `\iv\contentID\chunkID`. O primeiro componente define o escopo veicular. O segundo componente do esquema identifica o conteúdo solicitado pelo usuário, enquanto o terceiro componente identifica as partes de conteúdo que formam o conteúdo completo. Quando um conteúdo é solicitado, IVs são enviados para cada uma das partes de conteúdo que formam o conteúdo solicitado. Por exemplo, um IV com nome `\iv\gta\publicacoes\2015\10.pdf\3` solicita a parte 3 do conteúdo `\gta\publicacoes\2015\10.pdf` no escopo veicular.

A seguir, define-se o esquema de nomeação dos interesses de ponto de acesso (IAPs) como: `\iap\protocolID\outInterfaceID\apID\iapID`. O primeiro componente do esquema de nomeação define o escopo do IAP, restringindo seu uso à rede entre APs. O segundo componente indica a qual protocolo ou estratégia um IAP pertence, por exemplo, a estratégia de encaminhamento de interesses ou ao protocolo de descoberta de vizinhança. O terceiro componente define a interface de saída usada para encaminhar um IAP, enquanto o quarto identifica o AP que criou o IAP e o quinto identifica o próprio IAP. Por exemplo, um IAP com nome `\iap\fw\1\AP1\1234` é identificado pelo número 1234, foi criado pelo AP1 e encaminhado pela interface 1 do AP1. Ainda, esse IAP corresponde ao protocolo de encaminhamento de IVs, contendo um IV encapsulado, e é restrito ao escopo entre os APs.

Para descrever como interesses são roteados nas CCNs também é necessário descrever as FIBs dos nós da rede. Neste trabalho, as FIBs dos veículos possuem apenas uma entrada: (`\iv`). Essa entrada é responsável por encaminhar os IVs pela interface sem fio, como pode ser visto na Figura 3.2. Vale notar que neste

trabalho assume-se que os veículos possuem apenas uma interface de rede, do padrão IEEE 802.11p. Por outro lado, as FIBs dos APs possuem além da entrada que permite o encaminhamento e recepção de IVs pela interface sem fio, duas entradas para cada interface de rede conectando APs. Ambas as entradas seguem a regra de formação: $\backslash\text{iap}\backslash\text{protocolID}\backslash\text{outInterfaceID}\backslash\text{apID}$.

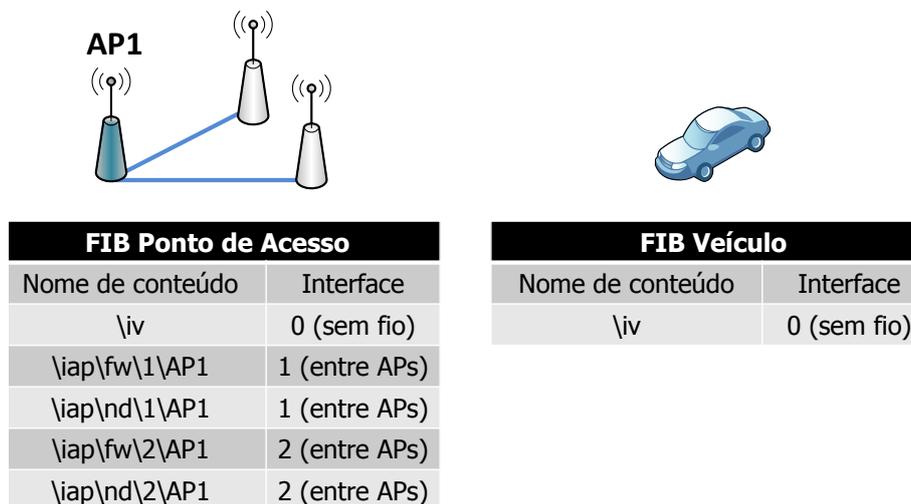


Figura 3.2: Exemplo de FIBs: AP com uma interface sem fio e duas interfaces entre APs; veículo com uma interface sem fio.

Na Figura 3.2, além da FIB de um veículo com uma interface sem fio, pode-se ver um exemplo das entradas na FIB de um ponto de acesso com uma interface sem fio e duas interfaces de rede entre APs. Uma das duas entradas configura o encaminhamento dos IAPs do protocolo de descoberta de vizinhança, p. ex. $\backslash\text{iap}\backslash\text{nd}\backslash 1\backslash\text{AP1}$ na Figura 3.2, enquanto a outra entrada é específica à estratégia de encaminhamento de IVs encapsulados, p. ex. $\backslash\text{iap}\backslash\text{fw}\backslash 1\backslash\text{AP1}$ na Figura 3.2. Nota-se que o segundo componente da regra de formação muda de acordo com a entrada sendo configurada. O terceiro componente da regra de formação muda para cada interface de rede sendo configurada na FIB. Por exemplo, $\backslash\text{iap}\backslash\text{nd}\backslash 1\backslash\text{AP1}$ na Figura 3.2 é uma regra que se refere à interface entre APs de número 1. Note que o quarto componente da regra de formação inclui o identificador do próprio AP, p. ex. AP1 na Figura 3.2. Como o nome dos IAPs também inclui o identificador do AP que o enviou no quarto componente, isso significa que um AP só possui regras para encaminhar IAPs que ele criou aos outros APs. Isso está de acordo com as estratégias de roteamento de IAP

salto-a-salto desenvolvidas neste trabalho. Dessa forma, quando um IAP é recebido, o IV contido no IAP é desencapsulado. Em seguida, o IV é encapsulado novamente para ser encaminhado por mais um salto ao vizinho escolhido ou aos vizinhos escolhidos pelo AP atual. Nota-se que a rede toma decisões de encaminhamento de maneira distribuída.

Definidos o esquema de nomeação de interesses e conteúdos e as configurações das FIBs dos nós da rede, a seguir define-se como os usuários dentro dos veículos solicitam e recebem conteúdos.

3.4 Operação dos Usuários

Quando um usuário está dentro de um veículo, ele pode solicitar um conteúdo da Internet. Por exemplo, música, o jornal do dia ou ainda horários de cinemas. Como conteúdos podem ser compostos de múltiplos pedaços, quando um usuário deseja um conteúdo, ele deve utilizar uma aplicação que envie IVs para cada um dos pedaços de conteúdo que formam o conteúdo completo. Para que a aplicação do usuário saiba quantas partes de conteúdo solicitar, assume-se que a aplicação do cliente conhece previamente o tamanho do conteúdo que vai solicitar, e que todos os conteúdos são divididos em partes de um tamanho máximo conhecido, por exemplo, o MTU do Ethernet ou do WiFi. Uma forma da aplicação conhecer o tamanho do conteúdo seria enviando um interesse específico para esse fim. Esse interesse conteria o nome do conteúdo que o usuário deseja, e a resposta a esse interesse conteria o tamanho do conteúdo desejado pelo usuário. Outra possibilidade para uma aplicação descobrir o tamanho de um conteúdo seria se no cabeçalho do primeiro pedaço desse conteúdo existisse um campo indicando o tamanho do conteúdo completo.

Após a aplicação enviar os IVs, uma entrada para cada um dos IVs é criada na PIT, e somente após esse passo a transmissão dos IVs é agendada pela interface sem fio de acordo com as regras na FIB. Como em cenários móveis e veiculares não se pode garantir que uma requisição sempre é satisfeita, a retransmissão de IVs que não forem satisfeitos após algum tempo pode ser necessária. Então, as aplicações devem possuir uma fila para armazenar as requisições dos usuários (IVs) que ainda não foram satisfeitas para futuras retransmissões.

Enquanto solicitar conteúdos é simples, o processo seguido pelo nó do usuário ao receber um pacote não é. Para facilidade de entendimento, esse processo é apresentado como um fluxograma na Figura 3.3. Quando um pacote é recebido pela interface sem fio do usuário, verifica-se se há uma transmissão pendente agendada para a interface sem fio do pacote recebido. Se houver, a transmissão agendada é cancelada, já que outro nó acabou de transmitir o mesmo pacote e uma nova transmissão representaria apenas uma duplicata. Em seguida, é verificado se o pacote é um interesse ou um conteúdo.

Se o pacote recebido for um IV, verifica-se se o IV recebido já está registrado na PIT do usuário. Caso não esteja, uma entrada na PIT é criada para o IV recebido, e procura-se na CS o conteúdo pedido pelo IV. Caso o conteúdo pedido pelo IV seja encontrado, a transmissão do conteúdo é agendada na interface sem fio. Caso contrário, o IV é encaminhado seguindo as regras da FIB. No caso de o IV recebido já estar registrado na PIT, apenas atualiza-se a entrada na PIT para o IV recebido, sendo o contador que expira a entrada na PIT reinicializado.

Se o pacote recebido pelo usuário for um pedaço de conteúdo, verifica-se se esse pedaço foi solicitado pelo usuário, ou seja, se existe uma entrada na PIT. Caso o conteúdo tenha sido solicitado, e ainda não exista na CS do usuário, então, o conteúdo é adicionado à CS do usuário e sua retransmissão é agendada na interface sem fio, se outro usuário próximo tiver pedido o conteúdo. Em seguida, a entrada na PIT referente ao pedaço de conteúdo recebido é removida e o pedaço de conteúdo é encaminhado à aplicação que o solicitou. Entretanto, se o pedaço de conteúdo não tiver sido solicitado, ele é apenas armazenado na CS do usuário, já que o cache promíscuo é utilizado.

Após o pedaço de conteúdo ser entregue à aplicação, o IV relativo a ele é removido da fila de retransmissão da aplicação. Além disso, o conteúdo é reconstruído e entregue ao usuário caso todos os seus pedaços tenham sido recebidos.

Através do fluxograma na Figura 3.3, pode-se notar que pedaços de conteúdo não solicitados pelo usuário também são armazenados em cache, isso caracteriza o uso de cache promíscuo. Entretanto, vale ressaltar que apenas os conteúdos solicitados são retransmitidos para minimizar o congestionamento do canal sem fio.

Após definir como o nó dos usuários interage com a rede, é possível descrever

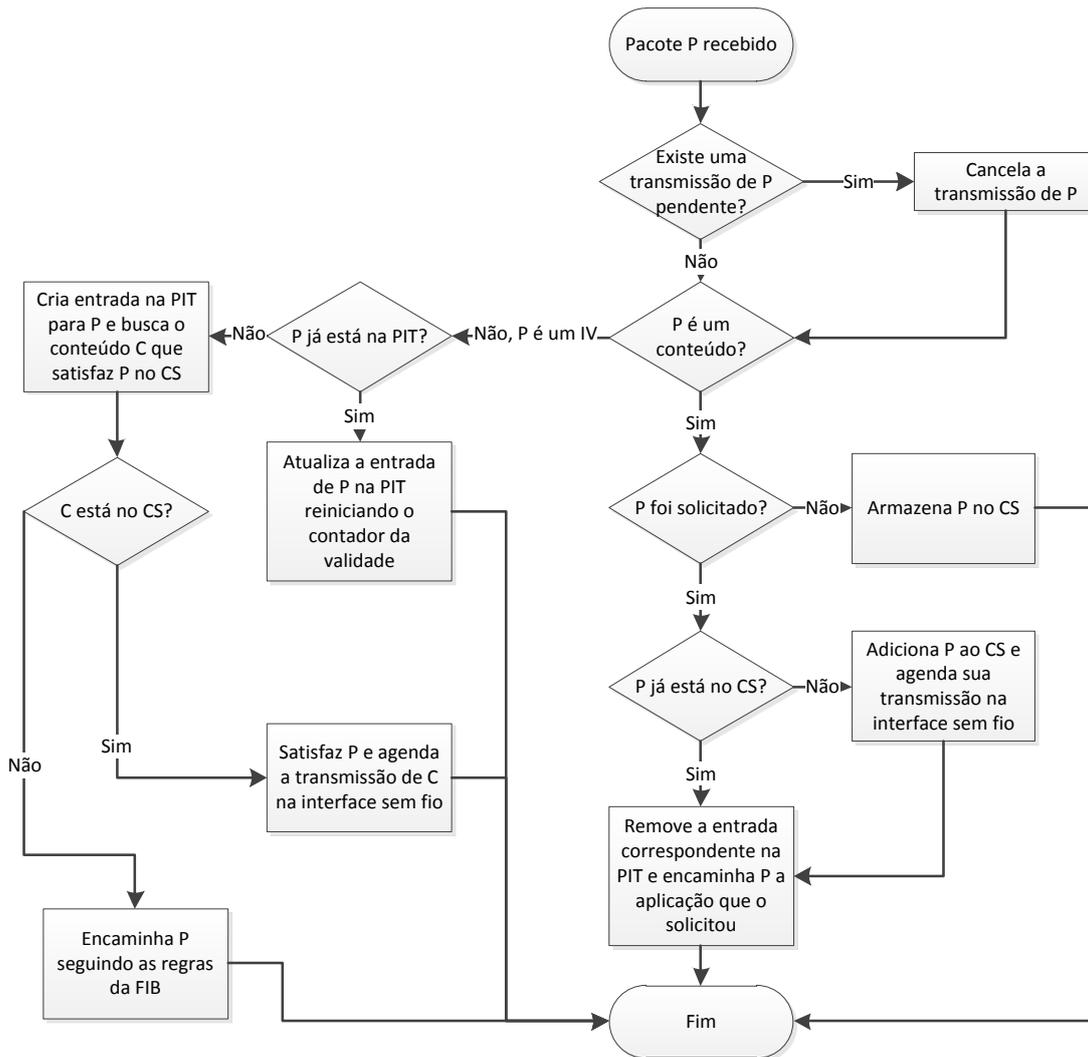


Figura 3.3: Fluxograma da operação do nó do usuário ao receber um pacote.

como os APs agem para entregar conteúdos da Internet aos usuários.

3.5 Operação dos APs

Sem usar o cache proativo proposto, os APs somente recebem os conteúdos da Internet que são diretamente solicitados pelos usuários pela interface sem fio. Todavia, essa estratégia, combinada à curta duração dos contatos entre veículos e APs, afeta a entrega de conteúdos aos usuários. Então, propõe-se fazer os APs encaminharem os IVs enviados pelos usuários a outros APs. Encaminhar cada IV para todos os APs seria ineficiente já que o usuário não passará por todos eles. Portanto, os APs devem encaminhar os IVs apenas aos APs onde é mais provável que o usuário que

solicitou o conteúdo passe.

Neste trabalho, assume-se que os APs somente conhecem a posição atual e o destino dos usuários, ao invés da trajetória completa deles. Isso é feito, pois, caso o conhecimento da trajetória completa fosse utilizado, ou cada IV teria que conter toda a trajetória, ou ainda, os APs deveriam possuir a topologia completa das vias da cidade para calcular a trajetória a partir da origem e destino dos usuários. O primeiro caso resultaria em um aumento no tamanho dos IVs, e o segundo caso em uma sobrecarga de processamento nos pontos de acesso. Dessa forma, optou-se por utilizar apenas a posição atual do usuário e destino e, a partir dessas posições, estimar por onde o usuário vai passar em sua trajetória até o destino.

Como consequência de não conhecer precisamente a trajetória dos usuários, os IVs podem ser encaminhados para regiões onde os usuários não irão passar. Contudo, a retransmissão de IVs não satisfeitos dá outra chance para que as estratégias de encaminhamento prevejam a trajetória dos usuários corretamente. Isso ocorre porque a posição dos usuários muda com o tempo, e assim as estratégias podem prever trajetórias diferentes para um usuário com o passar do tempo.

Ao receber um IV pela interface sem fio, o AP agenda a retransmissão do IV, extrai as informações inseridas no cabeçalho do IV (posição atual do usuário, destino e hora estimada de chegada ao destino) e adiciona o IV na estrutura de dados que armazena as requisições de conteúdo da Internet pendentes. No que se segue, o AP encaminha as informações do IV para a estratégia de encaminhamento que irá enviar o IV encapsulado em um IAP aos outros APs. Vale lembrar que os IAPs de encaminhamento, apesar de serem pacotes de interesse, nunca são satisfeitos, pois não existem conteúdos associados a eles. Apenas os IVs e IAPs do protocolo de descoberta de vizinhança possuem conteúdos associados e, portanto são respondidos e satisfeitos.

Para escolher o AP a quem o IAP com o IV será encaminhado, um AP deve conhecer seus vizinhos. Para isso, um protocolo de descoberta de vizinhança que utiliza o paradigma orientado a conteúdo é desenvolvido para atender as CCNs. Esse protocolo é detalhado a seguir.

3.5.1 Protocolo de Descoberta de Vizinhança

O protocolo de descoberta de vizinhança permite aos APs conhecer a posição de seus vizinhos e a interface de rede através da qual cada um deles é alcançado. Essa informação, em adição à configuração das FIBs, permite que o encaminhamento de IVs seja geograficamente direcionado.

O protocolo de descoberta de vizinhança inicia assim que o AP é ligado e envia IAPs de descoberta em todas as interfaces de rede do AP com outros APs. Quando um AP recebe um IAP de descoberta, ele responde o IAP com um conteúdo contendo sua própria identificação e posição geográfica. O nome que identifica o conteúdo de resposta é igual ao nome que identifica o IAP de descoberta. Por sua vez, o nome do IAP de descoberta contém a interface pela qual o IAP foi enviado, seguindo o esquema de nomeação proposto. Então, para cada vizinho descoberto, o AP registra a identificação do vizinho, a posição e a interface de saída usada para alcançar aquele vizinho. Os dois primeiros itens vêm do conteúdo recebido em resposta ao IAP de descoberta enquanto o terceiro vem do próprio nome do conteúdo recebido.

Uma vez que a vizinhança tenha sido descoberta, os APs são capazes de decidir a qual dos APs vizinhos um IV encapsulado em um IAP deve ser encaminhado. O algoritmo detalhado do protocolo de descoberta de vizinhança executado pelos APs pode ser visto no Algoritmo 1.

A seguir, apresenta-se a primeira estratégia de encaminhamento de IVs desenvolvida, a estratégia de encaminhamento em área triangular (*Triangular Area Forwarding* - (TAF)).

3.5.2 Encaminhamento em Área Triangular

A ideia básica dessa estratégia é escolher uma forma geométrica para delimitar a área onde um usuário provavelmente passará em sua trajetória. Então, um AP nessa área receberá antecipadamente os conteúdos do usuário.

No cenário veicular, a probabilidade de prever a posição futura de um veículo corretamente diminui com o aumento da distância da posição atual. Consequentemente, a área onde é possível que o veículo passe também cresce com a distância a partir da última posição conhecida do veículo. Adicionalmente, espera-se que os veículos tendam a ir para os seus destinos usando trajetórias que aproximam linhas

Algoritmo 1: Protocolo de descoberta de vizinhança dos APs.

Entrada: lista de interfaces do AP I .

Saída: lista dos vizinhos do AP N .

```
1 ao inicializar faça início
2   | para todo  $i$  na lista de interfaces  $I$  faça
3   |   | enviaIAPdeDescoberta ( $i$ );
4   | fim
5 fim
6 ao tempoRespostaExpirou (interface  $i$ ) faça início
7   | enviaIAPdeDescoberta ( $i$ );
8 fim
9 ao receberIAP ( $iap$ ) faça início
10  | se  $iap$  é um IAP de descoberta então
11  |   | conteudoRespostaIAP.nome =  $iap.nome$ ;
12  |   | conteudoRespostaIAP.adicionaIDdoAP ( $AP.id$ );
13  |   | conteudoRespostaIAP.adicionaPosicaoAP ( $AP.posicao$ );
14  |   | respondeIAPdeDescoberta (conteudoRespostaIAP);
15  | fim
16 fim
17 ao receberRespostaIAPdeDescoberta (conteudoRespostaIAP) faça início
18  | novo Vizinho  $n$ ();
19  |  $n.id$  = conteudoRespostaIAP.APID;
20  |  $n.posicao$  = conteudoRespostaIAP.APPosition;
21  |  $n.FaceSaida$  = recuperaFaceSaidaDoNome (conteudoRespostaIAP.name);
22  |  $N.adicionaVizinho$  ( $n$ );
23 fim
```

retas. Por essas razões, escolheu-se o triângulo como figura geométrica delimitadora. Uma forma de visualizar o triângulo como figura delimitadora é como uma lanterna apontando para o destino do veículo. A luz da lanterna ilumina uma seção maior quanto maior a distância da origem, mas ainda assim aponta na direção do destino. Neste trabalho, o triângulo que define o escopo de encaminhamento é chamado de triângulo de cobertura.

Nessa estratégia, ao receber um IV pela interface sem fio, o AP utiliza as informações do usuário contidas no IV para criar o triângulo de cobertura associado ao próprio IV. O triângulo de cobertura é definido pela posição R do AP que recebeu o IV; o destino geográfico D do usuário que enviou o IV; e um ângulo de abertura α . Os vértices do triângulo de cobertura são R , $D1$ e $D2$.

O vértice R já é conhecido já que o AP conhece sua própria posição, todavia os outros dois pontos devem ser calculados. O ângulo de abertura α define os ângulos $\angle D1RD$ e $\angle DRD2$. Dados esses ângulos e sendo o triângulo de cobertura isósceles no que diz respeito aos lados $D1R$ e $D2R$, as posições de $D1$ e $D2$ podem ser calculadas, formando o triângulo $\triangle RD1D2$. A Figura 3.4 ilustra o esquema do triângulo de cobertura.

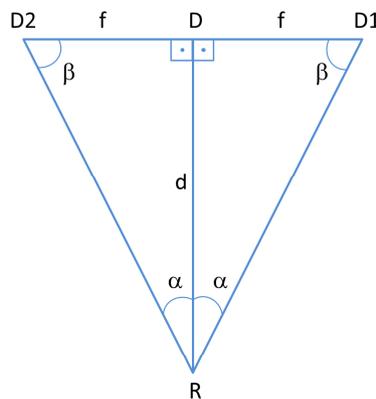


Figura 3.4: Esquema do triângulo de cobertura.

Para calcular os vértices $D1$ e $D2$, primeiramente deve-se obter a distância de D a R , chamada de d . Para que os ângulos $\angle RDD1$ e $\angle RDD2$ sejam retos é necessário encontrar o vetor que é perpendicular ao vetor que vai de D para R . Para isso, inicialmente calcula-se o vetor unitário que aponta de D para R , chamado de \vec{v} . O vetor calculado \vec{v} é da forma $\vec{v} = (v_x, v_y)$, assim o vetor perpendicular a ele, chamado

\vec{v}_p , pode ser calculado como: $\vec{v}_p = (-v_y, v_x)$. Então, a partir do ângulo de abertura α e da distância d , pode-se obter a distância f entre D e $D1$ com a Equação 3.1.

$$f = \tan(\alpha) * d. \quad (3.1)$$

Finalmente, com a posição D , o vetor \vec{v}_p e a distância f , pode-se calcular $D1$ e $D2$ com as equações 3.2 e 3.3, respectivamente.

$$D1 = D - f * \vec{v}_p. \quad (3.2)$$

$$D2 = D + f * \vec{v}_p. \quad (3.3)$$

Após definir o triângulo de cobertura, o AP insere os vértices do triângulo e o IV junto com todas as suas informações em um IAP de encaminhamento e inicia o processo de encaminhamento desse IAP aos outros APs.

Basicamente, o processo de encaminhamento dos IAPs na área triangular se baseia em duas regras. A primeira regra é que se um AP está dentro da área definida pelo triângulo de cobertura ele encaminha o IAP para todos os seus APs vizinhos de 1 salto. A segunda regra define que se um AP está fora do triângulo de cobertura ele encaminha o IAP apenas aos seus APs vizinhos de 1 salto que estão dentro da área definida pelo triângulo de cobertura. Isso é possível porque os APs conhecem tanto o triângulo como a posição geográfica de seus vizinhos.

O processo de encaminhamento é iniciado pelo AP que recebeu o IV pela interface sem fio, e que é o vértice R do triângulo de cobertura. Esse AP por definição está dentro do triângulo de cobertura e como consequência encaminha o IAP criado por ele a todos os seus vizinhos. O fluxograma detalhado desse processo de encaminhamento pode ser visto na Figura 3.5.

Como pode ser visto no fluxograma da Figura 3.5, quando um AP recebe um IAP e verifica que ele está dentro do triângulo de cobertura, ele adiciona o IV encapsulado à estrutura que armazena os pedidos pendentes de conteúdos da Internet. Isso é feito já que o AP está dentro da região geográfica onde é esperado que o usuário que solicitou o conteúdo passe em sua trajetória até seu destino.

Como também pode ser observado no fluxograma da Figura 3.5, após receber um IAP, o AP verifica se o IAP recebido está na lista de últimos IAPs recebidos. Isso

é necessário já que pelas regras da estratégia de encaminhamento, os APs podem receber réplicas de IAPs encaminhados. Então, para impedir que um encaminhamento continue indefinidamente, cada AP possui uma lista com os K últimos IAPs recebidos, e os APs somente encaminham os IAPs que não estão nessa lista.

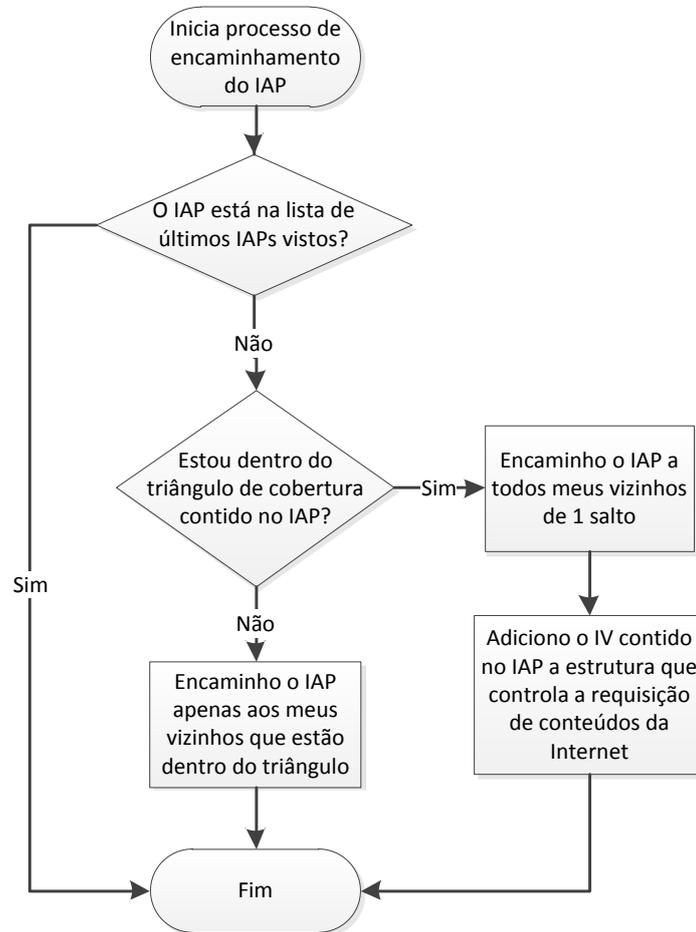


Figura 3.5: Fluxograma do processo de encaminhamento de IAPs em área triangular.

Para ilustrar o funcionamento das estratégias de encaminhamento a Figura 3.6 apresenta um cenário de exemplo. No cenário um veículo está próximo de um dos APs e realizará a trajetória saindo do ponto A e indo até o ponto B. Por sua vez, os APs estão interconectados pelo meio cabeado como mostrado na Figura 3.6. Os IAPs de encaminhamento são encaminhados pelas interfaces cabeadas até seus vizinhos escolhidos pela estratégia de encaminhamento.

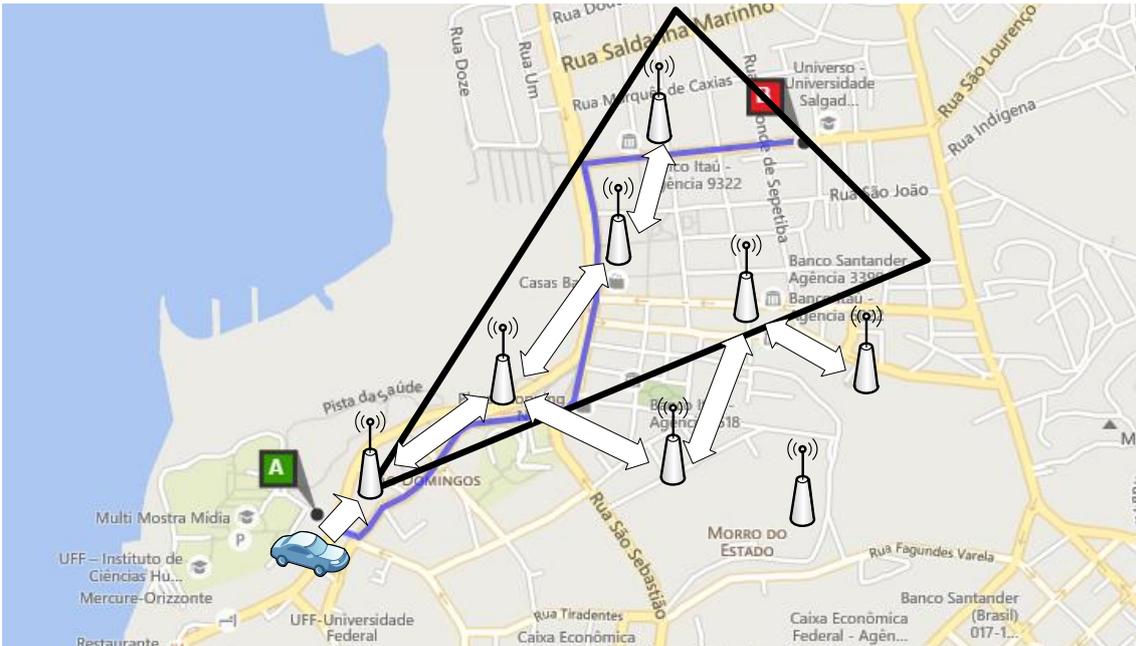
A forma de funcionamento da estratégia de encaminhamento em área triangular no cenário de exemplo da Figura 3.6 pode ser visto na Figura 3.7. Na Figura 3.7(a)



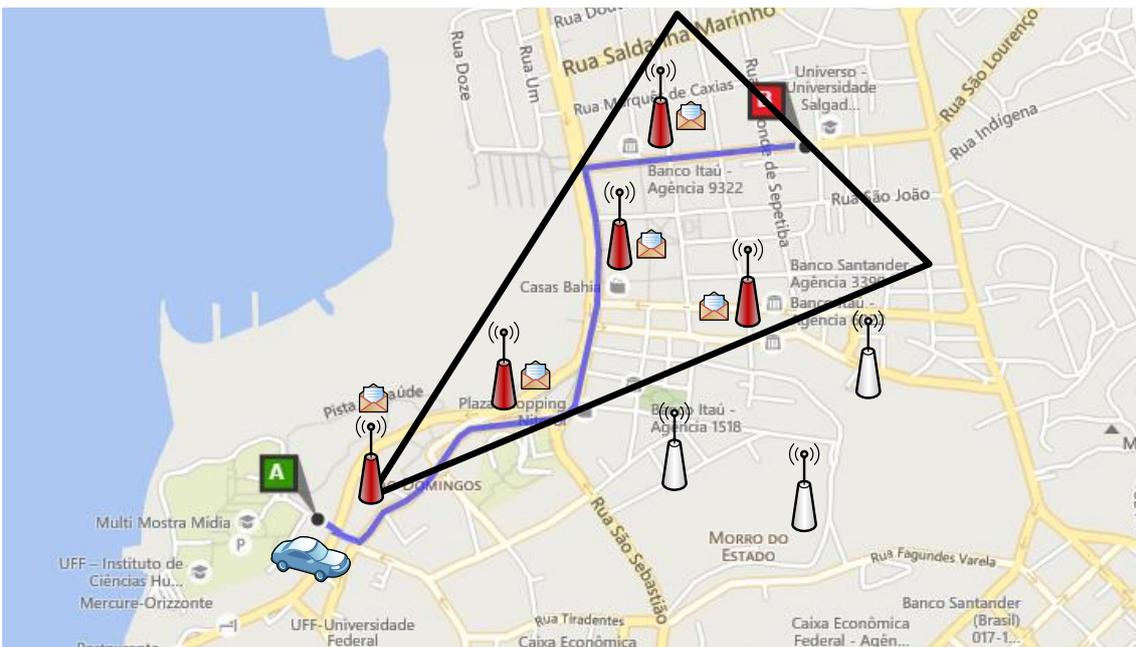
Figura 3.6: Cenário de exemplo de funcionamento das estratégias de encaminhamento. Uma linha ligando dois APs representa a comunicação cabeada entre eles, nesse caso os APs são vizinhos.

pode-se notar que existem APs fora do triângulo de cobertura recebendo o pedido do veículo e que existem APs recebendo o mesmo pedido até três vezes. Comparando as Figuras 3.7(a) e 3.7(b) é possível observar que os APs fora do triângulo de cobertura, apesar de receberem o interesse, não solicitam o conteúdo à Internet. Isso é feito pois esses APs estão fora da área onde é esperado que o usuário passe no trajeto até seu destino, definida pelo triângulo de cobertura. Entretanto, também pode-se observar pela Figura 3.7(a) que o AP dentro do triângulo próximo ao banco Santander só recebe o IAP de um AP que está fora do triângulo, o que ocorre devido a segunda regra do encaminhamento em área triangular. Ainda, verifica-se pela Figura 3.7(b) que se o veículo mudar de trajetória e passar próximo ao banco Santander, ao invés de próximo ao banco Itaú, ainda assim ele passará por um AP com o seu conteúdo em cache. Isso ocorre devido à abrangência da estratégia de encaminhamento em área triangular. Vale notar que nenhuma das estratégias propostas conhece de antemão a trajetória do usuário.

A estratégia de encaminhamento em área triangular tem a vantagem de cobrir uma área mais ampla. Todavia, ela introduz réplicas de IAP. Para minimizar esse



(a)



(b)

Figura 3.7: Exemplo de funcionamento da estratégia de encaminhamento em área triangular: (a) Pedido e Encaminhamento: o veículo saindo de A para B pede um conteúdo ao AP mais próximo, indicado pela seta saindo do veículo e indo até o AP. Esse AP cria o triângulo de cobertura e inicia o encaminhamento do pedido entre os APs, os encaminhamentos são indicados pelas setas entre APs; (b) Disponibilidade: Dos APs que receberam o pedido, somente os dentro do triângulo agendam o recebimento do conteúdo solicitado, os APs com o conteúdo ou parte dele já podem satisfazer as requisições dos usuários.

problema, a seguir é definida a estratégia alternativa que escolhe um AP para encaminhar um IAP através da minimização da distância até o destino. Essa segunda estratégia apesar de ser menos abrangente em relação ao número de APs cobertos, introduz menos IAPs na rede e não introduz nenhuma réplica de IAP.

3.5.3 Encaminhamento por Minimização de Distância

O propósito da estratégia de encaminhamento por minimização de distância (*Distance Minimization Forwarding* - DMF) é restringir o número de APs aos quais os IAPs são encaminhados. Conseqüentemente, o número de APs onde um conteúdo é solicitado à Internet também diminui. A redução de encaminhamentos ocorre devido à ausência de réplicas na rede e devido a essa estratégia encaminhar IAPs para uma interface por salto no máximo.

Ao receber um IV pela interface sem fio, usando a posição do destino do usuário, o AP escolhe para qual AP ele irá encaminhar o IAP com o IV encapsulado. Para isso, o AP seleciona seu vizinho cuja distância para o destino é a menor. Caso o vizinho selecionado esteja mais próximo do destino que o próprio AP, o IAP é encaminhado para o vizinho selecionado. Caso contrário, o processo de encaminhamento do IAP termina. Um AP recebendo um IAP encaminhado realiza o mesmo procedimento para continuar ou terminar o encaminhamento. Vale notar que não há um limite máximo de saltos para o encaminhamento, visto que não existe a possibilidade do processo de encaminhamento prosseguir indefinidamente.

Diferente do que ocorre na estratégia de encaminhamento em área triangular, nesta estratégia todos os nós que recebem um IAP inserem o IV encapsulado na estrutura de pedidos pendentes de conteúdos da Internet.

Um exemplo de como a estratégia de encaminhamento por minimização de distância funciona pode ser visto na Figura 3.8. Na Figura 3.8(a) pode-se notar que somente os APs que minimizam a distância até o destino salto-a-salto recebem o pedido do veículo e que nenhum AP recebe réplicas. Comparando as Figuras 3.8(a) e 3.8(b) é possível observar que todos os APs que recebem o interesse solicitam o conteúdo pedido à Internet. Assim, a estratégia de minimização de distância introduz menos sobrecarga na rede de acesso entre APs. Entretanto, essa estratégia também agenda o recebimento proativo do conteúdo dos usuários em um menor

número de APs. Então, por exemplo, se o veículo mudar de trajetória e passar próximo ao banco Santander, ao invés de próximo ao banco Itaú, ele não passará por nenhum AP com o seu conteúdo em cache. Essa é a desvantagem da estratégia por minimização de distância em relação ao encaminhamento em área triangular.

3.5.4 Recepção de Conteúdos pelos APs

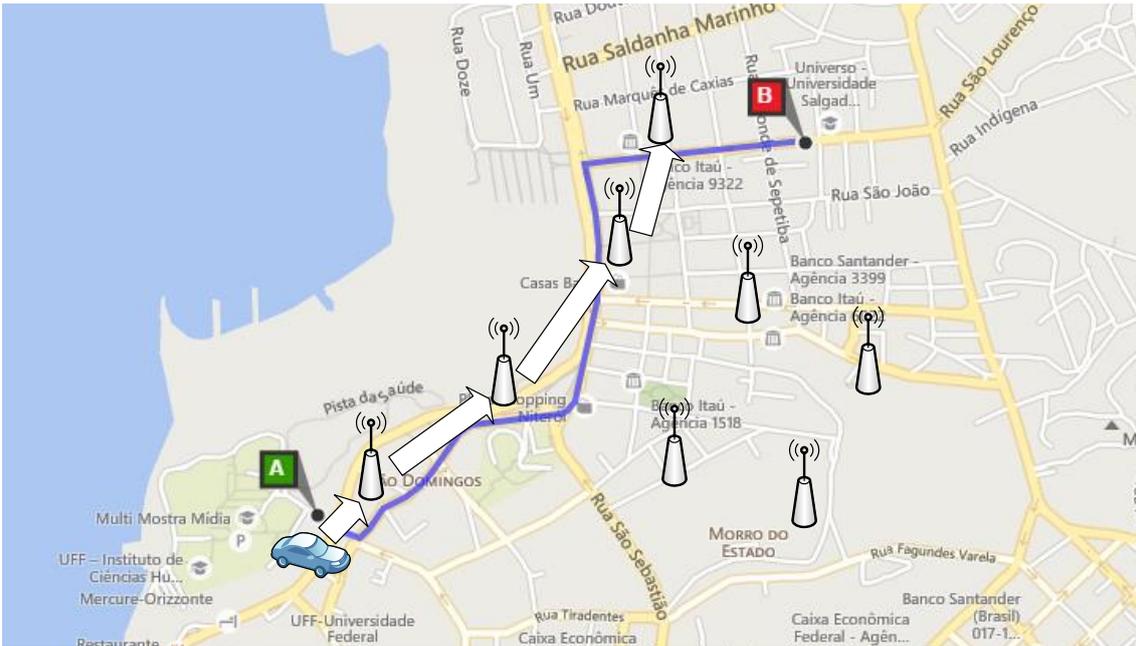
Um AP pode receber um pedaço de conteúdo através da interface sem fio de duas maneiras. Ele pode receber caso escute a transmissão do pedaço de conteúdo devido ao cache promíscuo, ou ainda, caso um usuário que possua o pedaço de conteúdo desejado receba a retransmissão do IV vinda do AP e envie o pedaço desejado. Além disso, um AP pode solicitar e receber pedaços de conteúdo da Internet.

Se um pedaço de conteúdo é recebido através da interface sem fio, o AP verifica se há uma entrada na PIT para aquele pedaço de conteúdo e se o pedaço de conteúdo ainda não está na CS. Então, se o pedaço de conteúdo tiver sido solicitado e for novo ele é adicionado à CS, e sua retransmissão é agendada na interface sem fio. Adicionalmente, verifica-se se o pedaço de conteúdo sendo baixado da Internet no momento é igual ao pedaço de conteúdo que acabou de ser recebido da rede sem fio. Em caso positivo, a recepção da Internet do pedaço de conteúdo é cancelada e a recepção do próximo pedaço de conteúdo é agendada de acordo com a estrutura de dados de pedidos pendentes de conteúdos da Internet.

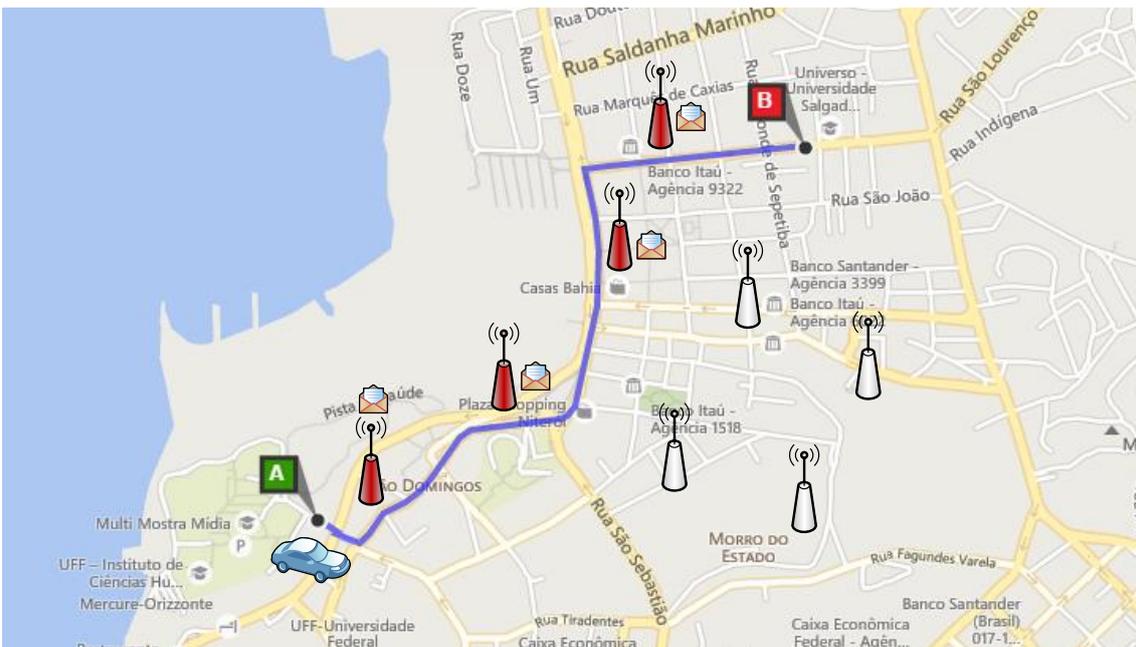
O fluxograma do processo de recepção de conteúdos pelos APs é apresentado na Figura 3.9.

No caso de um pedaço de conteúdo sendo recebido da Internet, as mesmas verificações na PIT e na CS são realizadas, sendo o conteúdo agendado para transmissão na interface sem fio se existir uma requisição por ele na PIT. Entretanto, vale mencionar que para uma entrada na PIT para um pedaço de conteúdo existir, um IV deve ter sido enviado ao AP diretamente por um veículo.

Os IVs que foram encaminhados encapsulados em IAPs, apesar de serem solicitados à Internet, não criam entradas na PIT. Nesses casos os pacotes que criam entradas na PIT são os IAPs de encaminhamento que encapsulam os IVs. Isso é feito para evitar a transmissão no meio sem fio de pedaços de conteúdo recebidos da Internet em APs onde não é garantido que os usuários interessados estejam. Dessa



(a)



(b)

Figura 3.8: Exemplo de funcionamento da estratégia de encaminhamento por minimização de distância: (a) Pedido e Encaminhamento: o veículo saindo de A para B pede um conteúdo ao AP mais próximo, indicado pela seta saindo do veículo e indo até o AP. Esse AP inicia o encaminhamento do pedido entre os APs, os encaminhamentos são indicados pelas setas entre APs e minimizam a distância até o destino B a cada salto; (b) Disponibilidade: Todos os APs que receberam o pedido agendam o recebimento do conteúdo solicitado, os APs com o conteúdo ou parte dele já podem satisfazer as requisições dos usuários.

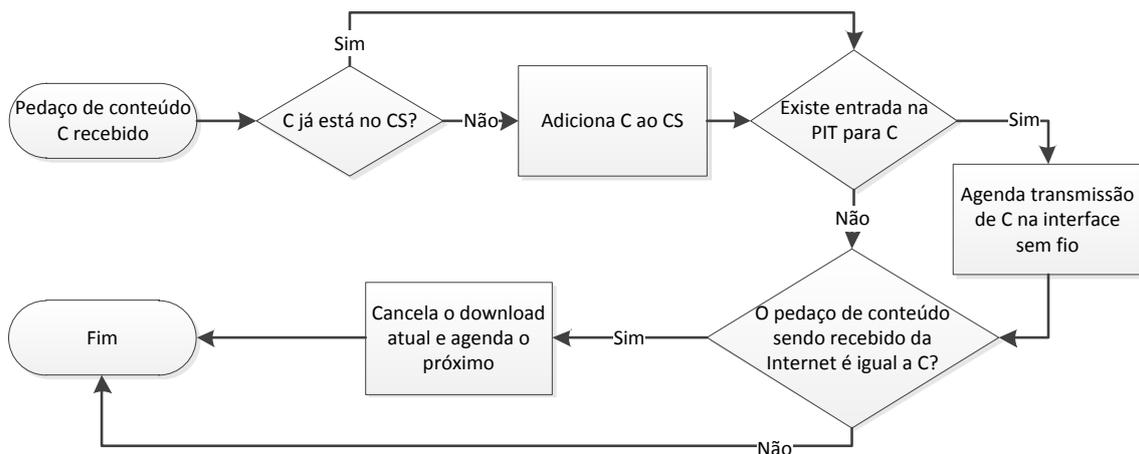


Figura 3.9: Fluxograma do processo de recepção de conteúdos pelos APs.

maneira, as estratégias de cache proativo propostas recebem os conteúdos nos APs antes que os usuários interessados cheguem lá, mas para que os conteúdos sejam de fato entregues ainda é necessário que os usuários peçam o conteúdo diretamente a um AP ou veículo que possua o conteúdo armazenado. Esse pedido é garantido pela retransmissão periódica de IVs não satisfeitos realizada pelos usuários.

3.5.5 Modelagem da Estrutura de Armazenamento dos IVs

Para concluir a implementação das estratégias de encaminhamento descritas é necessário definir formalmente a estrutura de dados que armazena os pedidos pendentes de conteúdo da Internet. Essa estrutura é importante, pois ela regula o acesso à Internet dos APs, dando prioridade e escolhendo qual pedaço de conteúdo deve ser recebido primeiro. A abordagem tradicional para estruturas de *download* é usar filas. Além disso, com a CCN sem encaminhamento todas as solicitações são enviadas aos APs diretamente pelos veículos. Pelos dois motivos anteriores a fila comum é a estrutura usada nas simulações para a CCN modificada.

Quando o encaminhamento de IVs é utilizado, uma solicitação de conteúdo pode ser recebida pelo AP diretamente do veículo, ou ainda de outro AP no caso de IVs encaminhados. Assim, pode-se notar que existirá uma competição pelo acesso à Internet entre IVs encaminhados e IVs diretamente solicitados pelos veículos. Apesar das estratégias propostas encaminharem IVs aos APs onde o usuário provavelmente

vai passar, não é possível garantir que isso de fato acontecerá. Por exemplo, em cenários urbanos existem múltiplas rotas entre dois pontos. Assim, é possível que um usuário escolha uma rota que não passe pelos APs onde seu conteúdo foi agendado para recepção. Dessa forma, as competições entre IVs solicitados diretamente e IVs encaminhados são prejudiciais à rede. Portanto, faz sentido dar maior prioridade a solicitações realizadas diretamente pelos veículos a um AP.

Para impedir que a competição pelo acesso à Internet ocorra quando as estratégias de encaminhamento são usadas, a estrutura de dados que armazena os pedidos pendentes de conteúdo é dividida em duas partes. A primeira parte possui maior prioridade e armazena os IVs recebidos dos veículos através da interface sem fio. A segunda parte tem menor prioridade e guarda os IVs recebidos que foram encaminhados encapsulados em IAPs.

A parte da estrutura de maior prioridade foi modelada de duas formas: como uma fila comum e como uma estrutura similar a uma LIFO, mas com descarte sendo realizado no fundo da estrutura caso ela fique cheia. A forma tradicional novamente é usar a fila. Porém, a topologia das redes veiculares muda rapidamente, com veículos entrando e saindo da cobertura sem fio dos APs. Assim, uma estrutura LIFO ao satisfazer primeiro a solicitação mais recentemente recebida pode atender mais solicitações de veículos próximos e dentro da cobertura sem fio.

A parte da estrutura de menor prioridade que armazena os IVs encaminhados é definida como uma fila de prioridade. A fila de prioridade é usada para ordenar os pedidos pendentes de conteúdos da Internet encaminhados. O pedido cujo horário estimado de chegada do veículo solicitante ao AP (HCAP) do veículo que o solicitou é menor recebe maior prioridade e assim sucessivamente. Portanto, as solicitações dos usuários que provavelmente chegam mais cedo a um AP possuem maior prioridade. O HCAP é estimado a partir das informações contidas em um IV da seguinte forma:

$$HCAP = \left[\left(\frac{dist(uP, APP)}{dist(uP, uDest)} \right) * (destH - currH) \right] + currH, \quad (3.4)$$

onde uP é a posição atual do usuário, $uDest$ seu destino, $destH$ o horário estimado de chegada do usuário a seu destino, $currH$ o horário atual no AP, APP a posição geográfica do AP e $dist(\cdot)$ é uma função que calcula a distância geográfica entre dois pontos. Se, em qualquer momento, o valor de HCAP de um IV se tornar inferior à

hora atual no AP, o IV é descartado da estrutura de pedidos pendentes. Isso é feito pois provavelmente o usuário interessado na solicitação já passou pelo AP.

Dada a estrutura de dados descrita quando o encaminhamento de IVs é usado, para escolher o próximo item a ser recebido da Internet, o AP escolhe primeiro os itens na parte da estrutura de maior prioridade. Os pedidos encaminhados na estrutura de menor prioridade somente são agendados se a estrutura de maior prioridade estiver vazia. Todavia, se um pedido é adicionado à estrutura de maior prioridade durante o recebimento de um item da estrutura de menor prioridade, o recebimento em andamento não é interrompido. É importante notar que os itens sendo recebidos sempre são partes de conteúdo, e não conteúdos completos, e que após a conclusão do recebimento da parte de conteúdo, o item que será recebido será o item da estrutura de maior prioridade.

No Capítulo 4 as propostas são avaliadas em três cenários veiculares, rodoviário, urbano e em uma topologia de cidade real. As propostas são comparadas ao CCN modificado para atuar no cenário veicular, mas se as estratégias propostas, para verificar se o encaminhamento de IVs proposto é benéfico no cenário veicular.

Capítulo 4

Testes e Resultados

Este capítulo tem como objetivo descrever os experimentos realizados para avaliar as estratégias propostas neste trabalho, bem como explicar os resultados alcançados nos experimentos.

4.1 Cenários e Parâmetros das Simulações

As estratégias de encaminhamento propostas foram implementadas no simulador ndnSIM e avaliadas em dois cenários veiculares criados no simulador de mobilidade SUMO (*Simulation of Urban MObility*). Além disso, as estratégias foram avaliadas em uma fração do conjunto de dados que representa o tráfego de Colônia [14], para submeter as estratégias a um cenário mais próximo da realidade.

As propostas foram comparadas com o CCN modificado para atuar no cenário veicular. Vale mencionar que em qualquer dos cenários quando um veículo alcança o seu destino, ele é removido da simulação, não sendo mais capaz de receber ou enviar pacotes.

No cenário rodoviário, inicialmente a velocidade máxima é definida como 50 km/h e em seguida como 100 km/h para avaliar a influência da velocidade dos veículos na entrega de conteúdos. O cenário rodoviário é composto de duas rodovias de pista dupla de 6 km em direções opostas. Entre as pistas há um espaço de 100 metros, no qual os APs são uniformemente distribuídos ao longo da via. A distância entre APs consecutivos no cenário varia entre 1.200 metros, quando o menor número de APs é usado, e 300 metros, quando o maior número de APs é usado. O cenário

rodoviário pode ser visto na Figura 4.1.

Quando a simulação inicia um veículo é adicionado ao cenário a cada segundo até que o número de veículos desejado seja alcançado. Os veículos são adicionados nas extremidades das rodovias, tendo as extremidades igual probabilidade de receber o novo veículo. As simulações terminam após todos os veículos terem atravessado toda a rodovia.

Nas Figuras 4.2(a) e 4.2(b) são apresentadas as CDFs das velocidades que os veículos se movem no cenário rodoviário. Note que os veículos entram na simulação com velocidade nula e aceleram até alcançar o limite de velocidade na rodovia, independente do número de veículos na simulação. Para ilustrar a movimentação o mapa de velocidades do cenário rodoviário com 100 veículos e limite de velocidade de 100 km/h é apresentado na Figura 4.3.

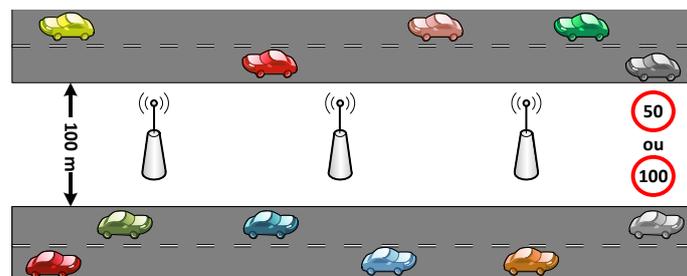
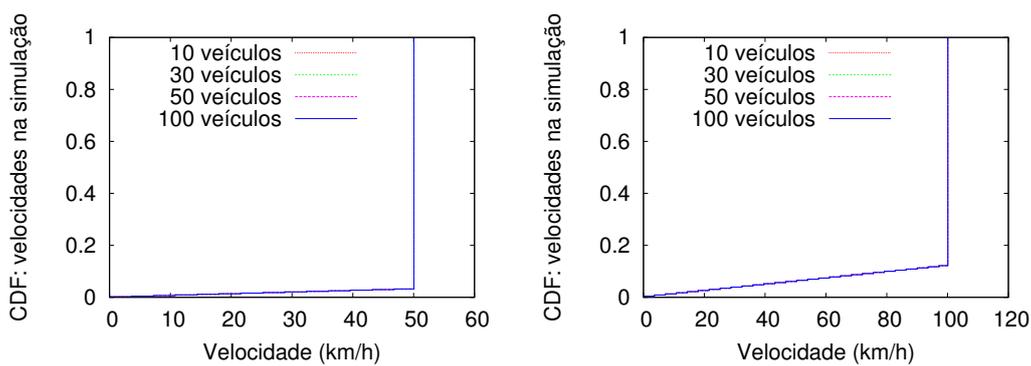


Figura 4.1: Cenário rodoviário.



(a) Limite de velocidade: 50 km/h.

(b) Limite de velocidade: 100 km/h.

Figura 4.2: CDF das velocidades no cenário rodoviário.

No cenário urbano, as ruas têm velocidade máxima permitida igual a 50 km/h. Esse cenário é formado por uma matriz 15 por 15 de quarteirões de 150 m x 150 m, totalizando uma área de 2.250 m x 2.250 m (aproximadamente 5 km^2). Os APs são

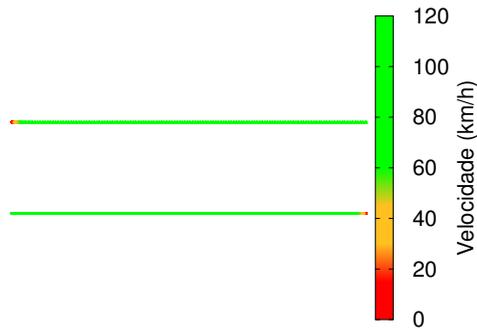


Figura 4.3: Mapa das velocidades de 100 veículos na rodovia de 100 km/h.

uniformemente distribuídos formando uma malha igualmente espaçada nos eixos X e Y. A distância entre APs consecutivos no cenário urbano varia entre 562,5 metros, quando o menor número de APs é usado, e 281,25 metros, quando o maior número de APs é usado. Um exemplo de segmento do cenário urbano descrito formado por uma matriz 3 por 3 pode ser visto na Figura 4.4.

Como no cenário rodoviário, quando a simulação inicia um veículo é adicionado ao cenário a cada segundo até que o número de veículos almejado seja atingido. Entretanto, no cenário urbano tanto a posição inicial como o destino são distribuídos aleatoriamente pelo cenário. A simulação termina após todos os veículos alcançarem seus respectivos destinos.

Na Figura 4.5 são apresentadas as CDFs das velocidades com que os veículos se movem no cenário urbano para 10, 50 e 100 veículos no cenário. Observe que diferentemente do cenário rodoviário, onde os veículos após alcançarem a velocidade máxima permanecem nela, no cenário urbano os carros se movem mais vezes a velocidades próximas à máxima, apesar de sempre inferiores a ela, devido aos cruzamentos. Além disso, na Figura 4.5, pode-se ver que quanto mais veículos estão no cenário, mais vezes as velocidades baixas (menores que 40 km/h) são observadas. Isso ocorre pois com mais carros no cenário a chance de que dois ou mais carros precisem atravessar um cruzamento ao mesmo tempo aumenta. Nesses casos, os carros precisam reduzir a velocidade no cruzamento, o que aumenta o tempo necessário para que um veículo acelere até as velocidades mais próximas à máxima.

Ao verificar a movimentação dos veículos no mapa de velocidades do cenário urbano nas Figuras 4.6(a), 4.6(b) e 4.6(c), nota-se que os pontos de velocidade mais

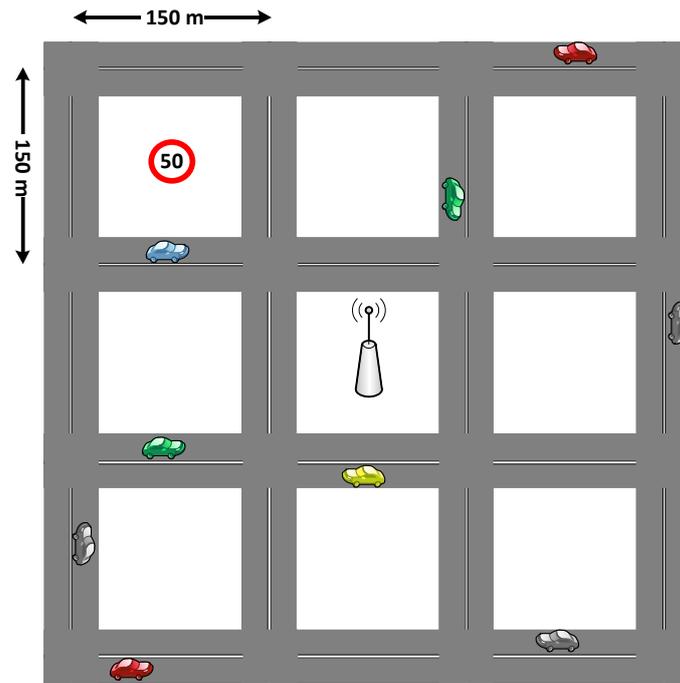


Figura 4.4: Segmento do cenário urbano.

baixa ocorrem nos cruzamentos. Ainda, pode-se notar que não há engarrafamento em qualquer uma das quantidades de veículos nos cenários simulados.

Finalmente, ao utilizar uma fração do conjunto de dados das condições de tráfego de Colônia [14], pretende-se avaliar o desempenho das estratégias em uma estrutura de vias e em condições de tráfego realistas. O conjunto de dados de Colônia é um traço sintético da movimentação dos veículos na cidade de Colônia criado pelo *German Aerospace Center - (DLR)*. Esse traço de mobilidade apesar de sintético mimetiza as condições de tráfego reais da cidade. O conjunto de dados disponível para utilização consiste em um período de duas horas de tráfego intenso, das 6 horas da manhã às 8 horas da manhã.

A partir do conjunto de dados original e do mapa da cidade escolheu-se uma região da cidade que possui ambos os tipos de estruturas viárias: urbano e rodoviário. Nas simulações foi utilizado um período de 10 minutos do conjunto de dados, de 6 horas da manhã às 6 horas e 10 minutos da manhã. A fração do conjunto de dados selecionada abrange uma área de $4,72 \text{ km}^2$ no qual 688 viagens ocorrem. A região geográfica selecionada pode ser vista na Figura 4.7. Como no cenário urbano, os APs são distribuídos uniformemente formando uma malha. Vale notar que existem

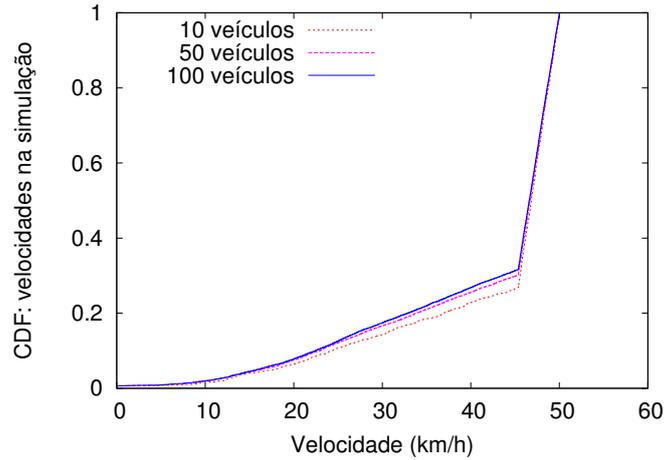


Figura 4.5: CDF das velocidades no cenário urbano para diferentes quantidades de veículos no cenário.

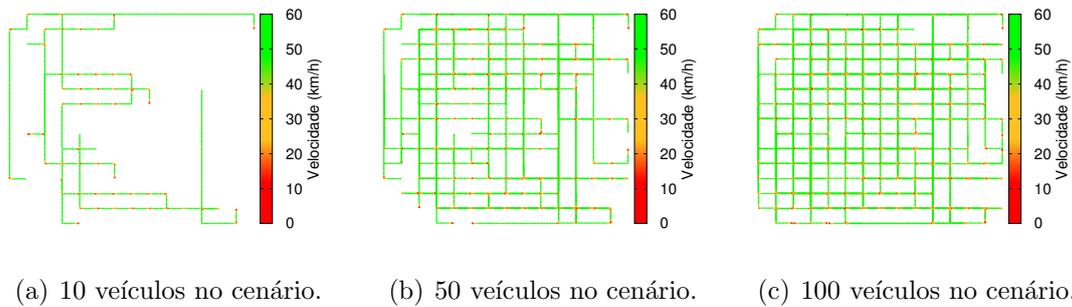


Figura 4.6: Mapa das velocidades no cenário urbano.

trabalhos com foco em selecionar os melhores locais para posicionar os APs de forma a maximizar o desempenho da rede [32, 33].

Como o cenário de Colônia apresenta uma cidade real, diferentemente dos outros cenários usados, as vias podem possuir velocidades máximas permitidas distintas. Dessa forma, para permitir um melhor entendimento da mobilidade dos veículos, a CDF das velocidades assumidas pelos veículos na simulação é apresentada na Figura 4.8. Como a região de Colônia escolhida para a simulação possui partes rodoviárias e partes urbanas, é de se esperar que a velocidade dos veículos varie bastante dependendo da região onde eles estão.

No gráfico da Figura 4.8, são inseridos dois rótulos indicando as áreas onde provavelmente as velocidades foram medidas, por exemplo, velocidades muito altas provavelmente correspondem à região da rodovia, enquanto velocidades muito baixas tem maior probabilidade de corresponder à região urbana.



Figura 4.7: Região geográfica de Colônia usada nas simulações.

Pela Figura 4.8, pode-se notar que mais de 40% dos veículos estão trafegando a velocidades inferiores a 40 km/h, o que demonstra que provavelmente eles estão trafegando na região urbana da cidade. Também é possível notar que mais de 10% das velocidades medidas é igual ou muito próxima de zero, isso é justificado por sinais de trânsito nos cruzamentos, e especificamente por sinais de trânsito nos cruzamentos próximos as alças de acesso à rodovia. Ainda pelo gráfico da Figura 4.8 é possível ver que existem veículos trafegando a velocidades acima de 100 km/h nas rodovias.

Para verificar em que locais as velocidades altas e baixas de fato foram medidas, na Figura 4.9, o mapa das velocidades dos veículos na cidade é apresentado.

Definidos os cenários veiculares das simulações, é necessário detalhar as configurações dos nós da rede e da rede em si utilizadas.

As interfaces de rede sem fio usadas em ambos os veículos e APs são interfaces IEEE 802.11p [34] configuradas com o algoritmo de controle de taxa Minstrel [35]. O meio sem fio é configurado no simulador com os seguintes modelos de propagação: atraso de propagação de velocidade constante, perda de caminho log-distância com três distâncias definidas (perto, médio e longe) e perda de propagação Nakagami-m. A rede de acesso que interliga os APs é formada por interfaces ponto-a-ponto. Essas interfaces possuem largura de banda de 5 Mb/s e o meio cabeado introduz atraso de propagação constante e igual a 2 ms por salto. Cada AP é conectado à Internet de

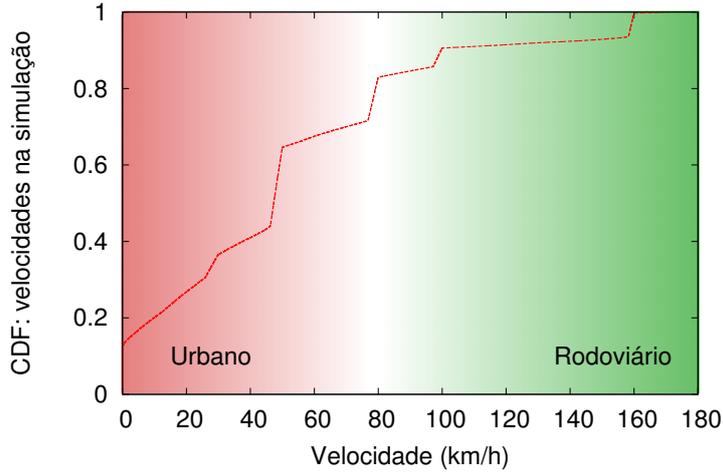


Figura 4.8: CDF das velocidades dos veículos no cenário de Colônia.

forma independente e com largura de banda de 256 kb/s, a não ser quando indicado diferente.

Os IVs tem o campo SCOPE igual a 2 para evitar o *broadcast storm* juntamente com o temporizador de [10] que evita colisões, o valor do campo SCOPE limita a propagação de IVs a 1 salto. Além disso, os IVs expiram após 10 segundos na PIT e são retransmitidos pela aplicação após 11 segundos se ainda não tiverem sido satisfeitos.

Nas simulações existem 1.000 conteúdos completos distintos que são divididos em múltiplos pedaços de 1.500 bytes. Os usuários solicitam conteúdos novos em média a cada 10 segundos de acordo com uma variável aleatória exponencial [36]. A variável aleatória exponencial usada é parametrizada de acordo com os estudos de traços de dados empíricos realizados em [36], esses estudos modelam a chegada de sessões web de usuários a um servidor, o que é uma boa aproximação de como usuários pedem conteúdos. Para efeitos de simulação cada veículo é tratado como um usuário. Os conteúdos solicitados seguem uma distribuição Zipf com parâmetro 0,8. Essa distribuição representa a popularidade dos conteúdos de acordo com análises de traços de dados empíricos [37].

Todos os nós da rede realizam cache promíscuo, armazenando conteúdos mesmo sem que eles tenham sido pedidos. Todavia, apenas os APs com a estratégia proativa de cache proposta realizam cache proativo, solicitando conteúdos da Internet ao

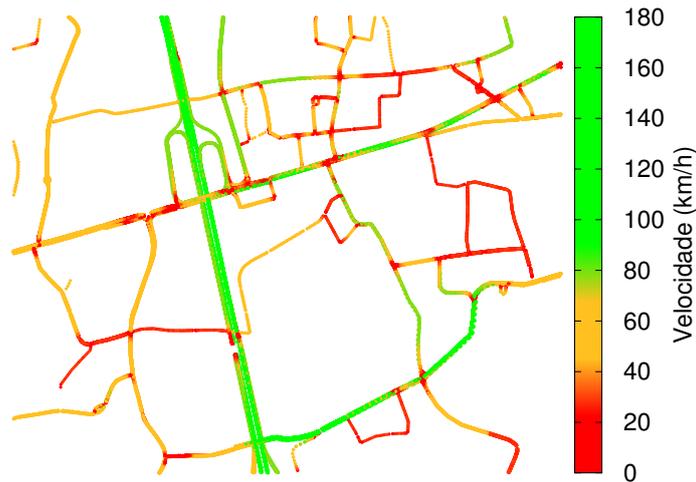


Figura 4.9: Mapa das velocidades dos veículos no cenário de Colônia.

longo das rotas dos usuários. Todos os nós da rede usam a política de descarte de cache *Least Recently Used* (LRU). Vale mencionar que, apesar disso, existem outras políticas de descarte de cache que melhor exploram a popularidade de conteúdos na literatura [29]. A CS dos usuários e dos APs podem armazenar até 1,5 GB, o que equivale a armazenar um milhão de partes de conteúdo de 1.500 bytes.

Nos resultados deste trabalho, DMF se refere ao Encaminhamento por Minimização de Distância da Seção 3.5.3, TAF se refere ao Encaminhamento em Área Triangular da Seção 3.5.2 e CCN é a arquitetura CCN original modificada para o cenário veicular sem encaminhamento de IVs. O objetivo da comparação é avaliar se o encaminhamento de IVs pode ser benéfico à rede CCN em cenários veiculares. Em todos os resultados apresentados a média e o intervalo de confiança de 95% são calculados a partir dos resultados de 30 rodadas de simulação. Os parâmetros de simulação estão reunidos na Tabela 4.1.

4.2 Pedidos Pendentes de Conteúdos da Internet

Como a parte da estrutura que armazena os IVs recebidos diretamente pode ser modelada de duas maneiras conforme a Seção 3.5.5, um experimento foi realizado para verificar qual dos modelos melhor satisfaz os pedidos dos usuários. Para isso, o cenário urbano foi utilizado e o número de veículos variado de 10 a 100, sendo

Tabela 4.1: Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
Algoritmo de controle de taxa das interfaces sem fio	Minstrel
Interface entre APs	Ponto-a-ponto
Largura de banda da interface entre APs	5 Mb/s
Atraso de propagação da interface entre APs	2 ms
Modelos de propagação do meio sem fio	Atraso de velocidade constante Três log-distância Nakagami-m
Enlace dos APs com Internet	256 kb/s
TTL IVs	1
Tempo para IV expirar na PIT	10 segundos
Período entre retransmissão de IVs não satisfeitos	11 segundos
Quantidade de conteúdos existentes	1000
MTU	1500 bytes
Período médio entre pedidos de novos conteúdos	10 segundos
Popularidade de conteúdos	Distribuição Zipf com parâmetro 0,8
Número de rodadas de simulação	30
Intervalo de confiança	95%
Política de cache dos APs e veículos	LRU
Tamanho do cache dos veículos e APs	1,5 GB

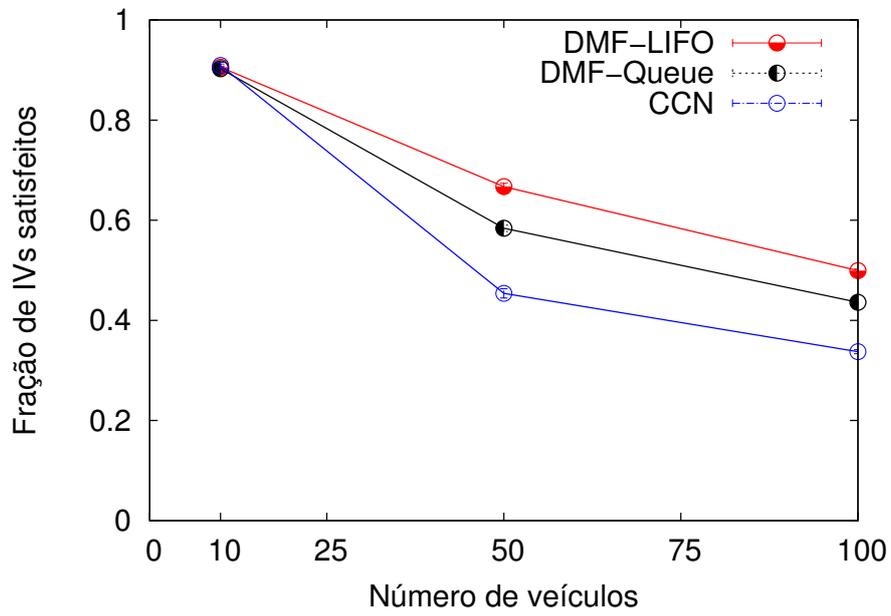
36 APs distribuídos uniformemente no cenário. Além disso, todos os conteúdos têm 180 kB nessas simulações. Então, cada conteúdo é formado por 120 partes, cada uma delas correspondendo a um IV distinto.

Neste experimento inicial, a fração de IVs satisfeitos e a taxa de entrega foram medidas. A fração de IVs satisfeitos é definida como a razão entre o número de IVs enviados pelos usuários que foram atendidos e o número de IVs enviados pelos usuários. Já a taxa de entrega é definida como a razão entre o número de conteúdos solicitados pelos usuários que foram entregues e o número de conteúdos solicitados pelos usuários. Note que a taxa de entrega somente contabiliza um conteúdo como entregue se todas as partes de conteúdo que formam o conteúdo completo tiverem sido entregues. Nos resultados do experimento, a CCN modificada usando a fila comum como estrutura é comparada a duas versões da estratégia DMF, uma com a

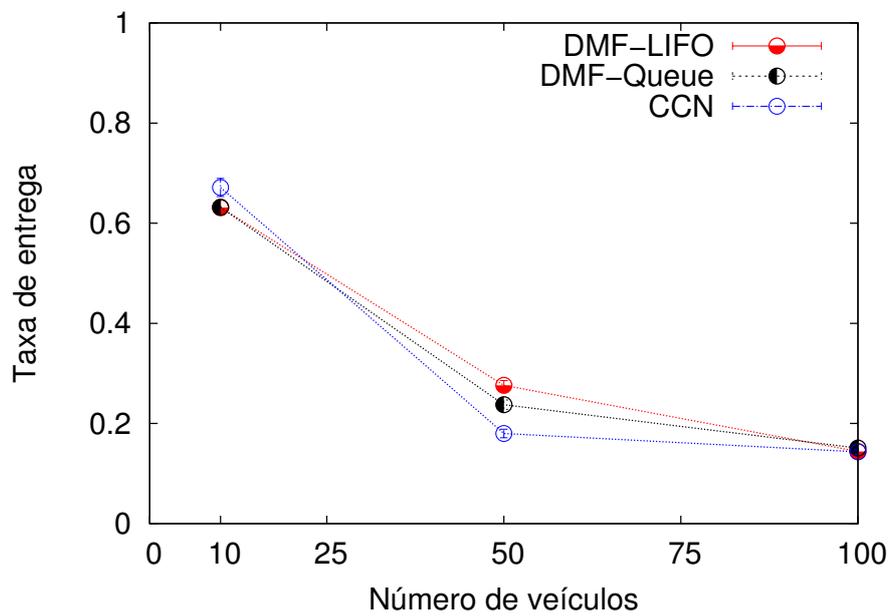
fila comum como a parte de maior prioridade da estrutura dos pedidos pendentes e a outra com a mesma estrutura sendo modelada como uma LIFO. Nos gráficos da Figura 4.10, a CCN modificada é identificada como CCN, o DMF com a fila como DMF-Fila e o DMF com a LIFO como DMF-LIFO.

Nas Figuras 4.10(a) e 4.10(b), pode-se ver que o uso da estratégia DMF apresenta benefícios tanto na taxa de entrega quanto na fração de IVs satisfeitos em comparação com a utilização da CCN modificada, independentemente do modelo usado para a estrutura de pedidos pendentes. Adicionalmente, nota-se que a DMF com a LIFO supera a DMF com a fila padrão corroborando a ideia por trás do uso da LIFO. Por isso, em todas as simulações subsequentes deste trabalho, quando as estratégias de encaminhamento são usadas, a parte de maior prioridade da estrutura para pedidos pendentes é modelada como a LIFO descrita. Ainda pelas Figuras 4.10(a) e 4.10(b), nota-se que com o aumento do número de veículos, a fração de IVs satisfeitos e a taxa de entrega diminuem em todos os casos. Esse comportamento é explicado nos próximos cenários de simulação.

Nas simulações, o tamanho total da estrutura de dados para pedidos pendentes de conteúdos da Internet é limitado em 10.000 solicitações. Vale notar que ao utilizar as estratégias, os tamanhos das estruturas de prioridade superior e inferior são de 300 e 9700, respectivamente, atingindo o mesmo limite imposto para o CCN modificado. O número 300 é escolhido por ser suficiente para acomodar a requisição de cada uma das 200 partes de conteúdo que formam o maior conteúdo simulado (300 kB). Vale notar que não é interessante que o tamanho máximo da fila de maior prioridade seja muito grande, pois um usuário passando pode encher a fila de maior prioridade com suas requisições e ir embora. Isso impede que o AP receba os conteúdos agendados por mais tempo, já que eles possuem menor prioridade. Além disso, o AP estará recebendo conteúdos de um usuário que não está mais ao alcance, usando de forma ineficiente a Internet. Caso o usuário não vá embora, o tamanho máximo não tão grande imposto não é um problema, já que os IVs não satisfeitos são pedidos novamente pela aplicação do usuário.



(a)



(b)

Figura 4.10: (a) Taxa de entrega variando o número de veículos; (b) Fração de IVs satisfeitos variando o número de veículos.

4.3 Resultados

4.3.1 Cenário Rodoviário

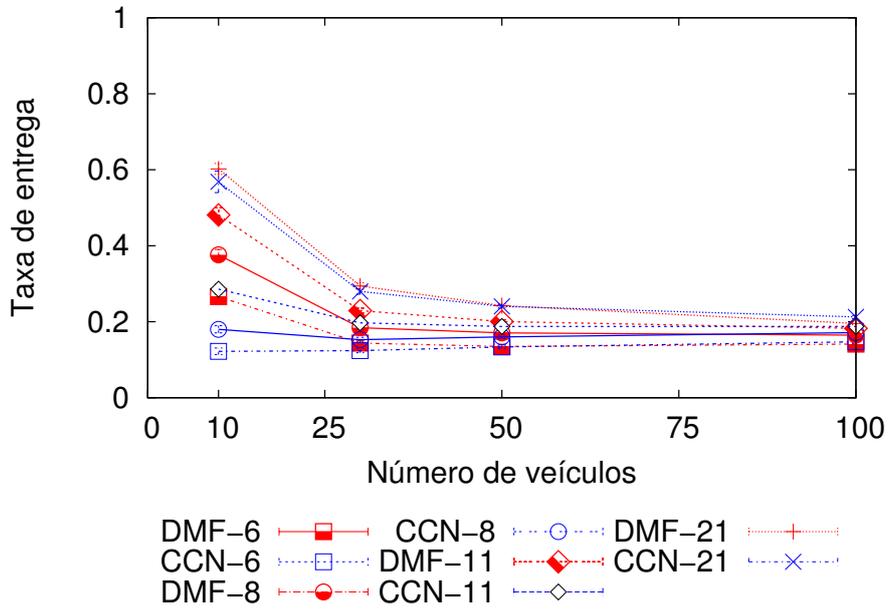
O cenário rodoviário destina-se a avaliar o modo como as estratégias propostas atuam em rodovias, sejam elas dentro de uma cidade ou ainda conectando cidades. Apesar de em rodovias os veículos atingirem velocidades mais altas em comparação com as zonas urbanas, seus movimentos têm menos graus de liberdade, sendo muito mais previsíveis. O cenário rodoviário usado define uma rota linear obrigatória para modelar essa alta previsibilidade da movimentação dos usuários e veículos. Neste cenário, é impossível que um usuário em seu veículo não passe por um AP onde seu conteúdo foi agendado para *download*.

Como a trajetória do cenário rodoviário é uma linha reta pode-se ver que ambas as estratégias TAF e DMF terão o mesmo desempenho, uma vez que a rodovia sempre está dentro do triângulo e uma vez que a minimização de distância encaminha os IVs até que o AP mais próximo do destino seja atingido. Por isso, apenas a estratégia DMF é simulada nesse cenário, já que os resultados da DMF também representam os resultados da estratégia TAF para as métricas avaliadas.

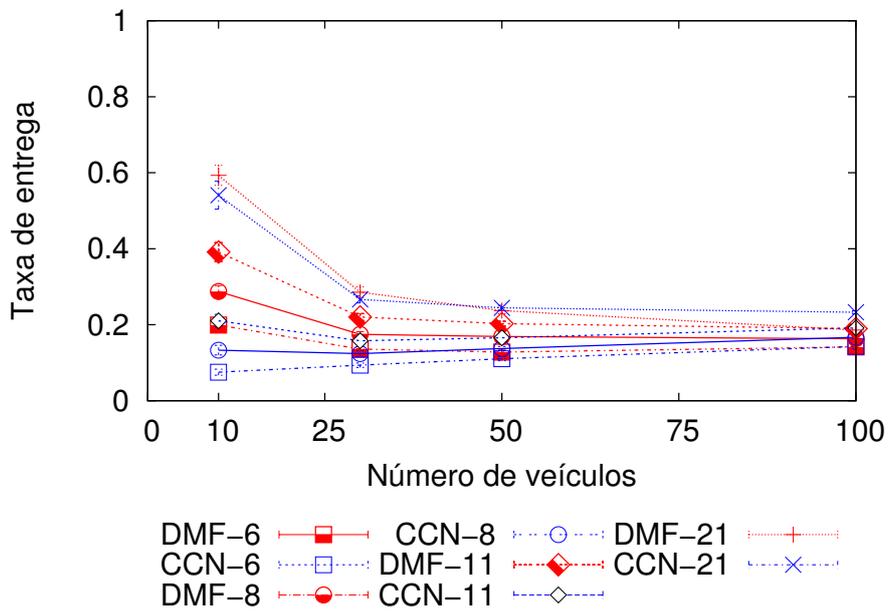
Nas Figuras 4.11 e 4.12, a taxa de entrega de conteúdos alcançada é comparada para diferentes números de veículos na rodovia: 10, 30, 50 e 100.

Nas Figuras 4.11(a) e 4.11(b), o número de APs distribuídos na rodovia varia de 6 a 21 como identificado nas legendas, sendo que com 21 APs o cenário está completamente coberto pelos APs. Mantendo o número de veículos constante, nota-se que quanto maior o número de APs, maior a taxa de entrega usando ou não usando as estratégias propostas. Isso ocorre já que a capacidade da rede de acesso à Internet é maior e já que existem mais oportunidades para os veículos receberem os conteúdos pedidos. Contudo, ao comparar os resultados obtidos pela estratégia DMF com os obtidos pela CCN modificada, verifica-se que a taxa de entrega aumenta com o número de APs.

Nas Figuras 4.11(a) e 4.11(b), ao comparar-se os resultados da rodovia com limite de velocidade de 50 km/h com os da rodovia com limite de velocidade de 100 km/h, nota-se que as estratégias propostas são menos afetadas que a CCN pela alta velocidade. Por exemplo, com 10 veículos, conteúdos de 180 kB e 8 APs no cenário,

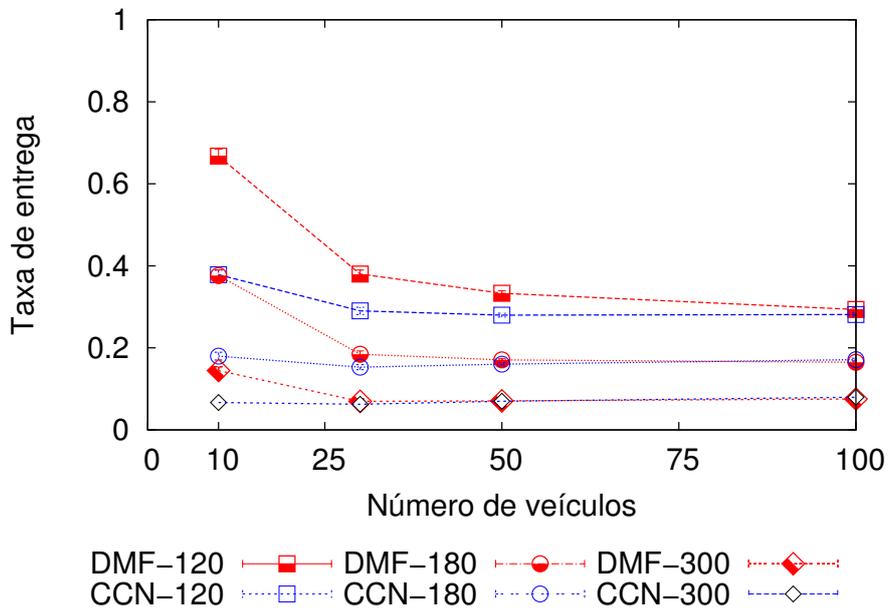


(a) Velocidade: 50 km/h.

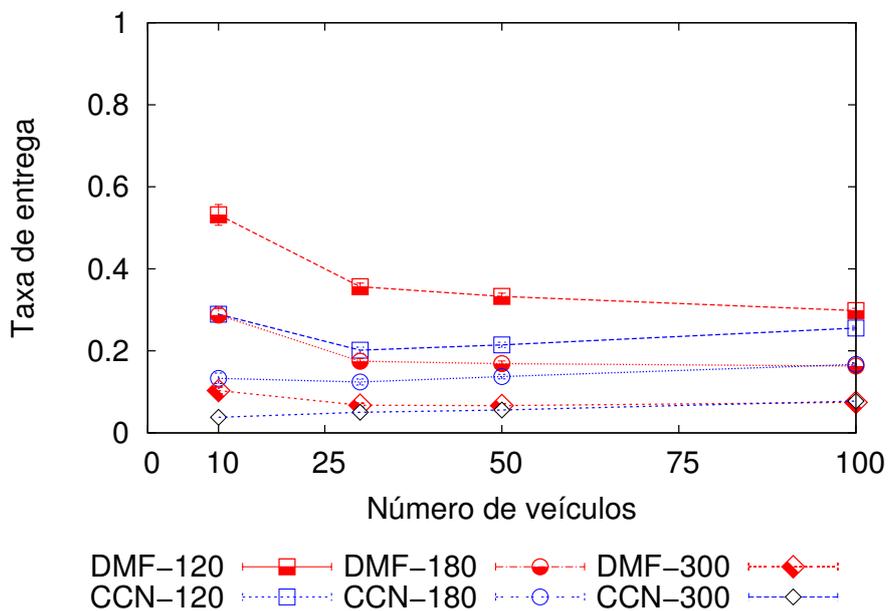


(b) Velocidade: 100 km/h.

Figura 4.11: Taxa de entrega de conteúdos variando o número de APs na rodovia com todos os conteúdos de 180 kB. Legenda: algoritmo-número de APs.



(a) Velocidade: 50 km/h.



(b) Velocidade: 100 km/h.

Figura 4.12: Taxa de entrega de conteúdos variando o tamanho dos conteúdos em kB com 8 APs distribuídos na rodovia. Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.

quando a velocidade aumenta, a taxa de entrega cai 23,4% (0,288/0,376) usando a estratégia proposta, em comparação, a taxa de entrega cai 26,1% (0,133/0,180) quando o encaminhamento não é usado. Isso ocorre pois com o aumento da velocidade, a duração dos contatos entre veículos e APs diminui. Enquanto ao usar o encaminhamento um usuário encontrará o conteúdo no *cache* dos APs mais vezes ao longo de sua trajetória, ao não usar o encaminhamento o usuário precisará aguardar o recebimento do conteúdo da Internet para só então recebê-lo do AP. Essa diferença torna o uso do tempo de contato entre APs e veículos menos eficiente quando o encaminhamento não é usado, devido ao usuário precisar esperar mais vezes o AP receber o conteúdo antes de recebê-lo.

Após comparar como as estratégias se comportam em caso de variação na capacidade da rede de acesso, deve-se avaliar como elas se comportam quando sujeitas a diferentes cargas na rede. As diferentes cargas impostas à rede são alcançadas variando o tamanho dos conteúdos que os usuários pedem, sem mudar a frequência com que os usuários pedem conteúdos. Nas Figuras 4.12(a) e 4.12(b), o tamanho dos conteúdos solicitados pelos usuários varia de 120 kB a 300 kB como identificado nas legendas. Enquanto o tamanho dos conteúdos varia, o número de APs distribuídos no cenário permanece constante e igual a 8. Esse valor foi escolhido por ser o meio termo entre os valores razoáveis simulados 6 e 11, já que 21 APs indicam um cenário completamente coberto e possivelmente inviável em larga escala devido aos custos dos APs.

Como os usuários nos testes em média solicitam conteúdos a cada 10 segundos, os tamanhos dos conteúdos testados são suficientes para simular a carga na rede de usuários solicitando: pequenos vídeos, p. ex. comerciais de TV; áudios, p. ex. músicas; imagens de resolução média, fotos de estabelecimentos próximos ou pontos turísticos; e documentos de texto, tabela de horário de cinemas, previsão do tempo e jornal do dia. Por exemplo, um usuário pedindo conteúdos de 180 kB a cada 10 segundos equivale a carga na rede de um MP3 com 144 kb/s.

Nas Figuras 4.12(a) e 4.12(b), pelos resultados nota-se que mantido o número de veículos constante, quanto maiores os conteúdos, menores as taxas de entrega, independente do uso das estratégias de encaminhamento propostas. Isso acontece, pois a carga na rede aumentou e a capacidade não. Além disso, ao comparar a

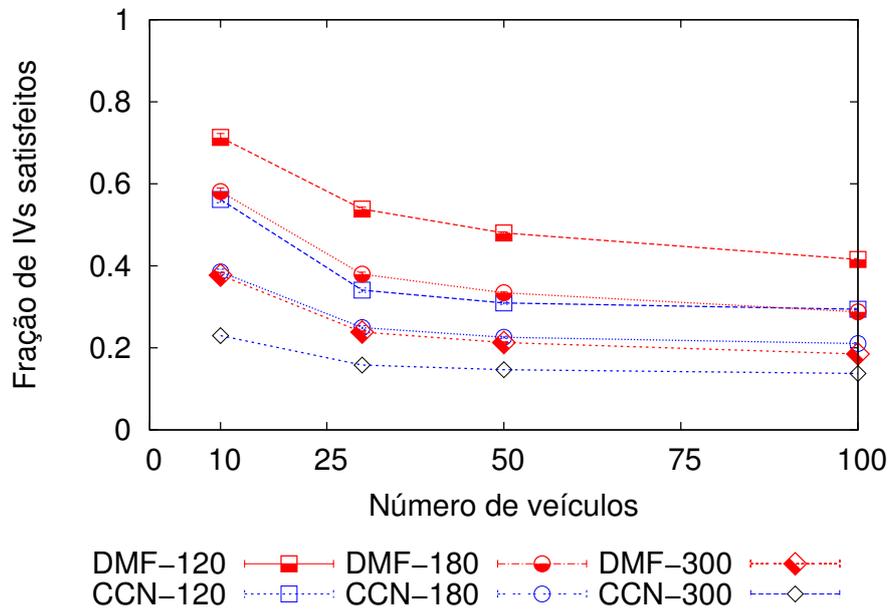
estratégia DMF com a CCN conclui-se que o uso do encaminhamento torna a taxa de entrega menos suscetível a aumentos na carga da rede, nos melhores casos provendo benefícios e nos piores casos empatando com a CCN.

Observando a Figura 4.12 é possível ver que aumentando apenas o número de veículos, a taxa de entrega alcançada pela DMF diminui devido ao aumento na carga da rede. Ao mesmo tempo, verifica-se um aumento na taxa de entrega da CCN, o que resulta em um empate entre as estratégias e a CCN. Esse resultado é explicado pelo armazenamento de conteúdos populares. Enquanto na CCN um usuário precisa que outros usuários pedindo o mesmo conteúdo passem pela mesma trajetória para popular o cache dos APs, nas estratégias propostas um veículo já pode pedir conteúdos aos APs seguintes de sua trajetória devido ao encaminhamento de IVs. Portanto, a eficiência do armazenamento de conteúdos depende mais do número de veículos e de rotas sobrepostas na CCN do que usando os encaminhamentos.

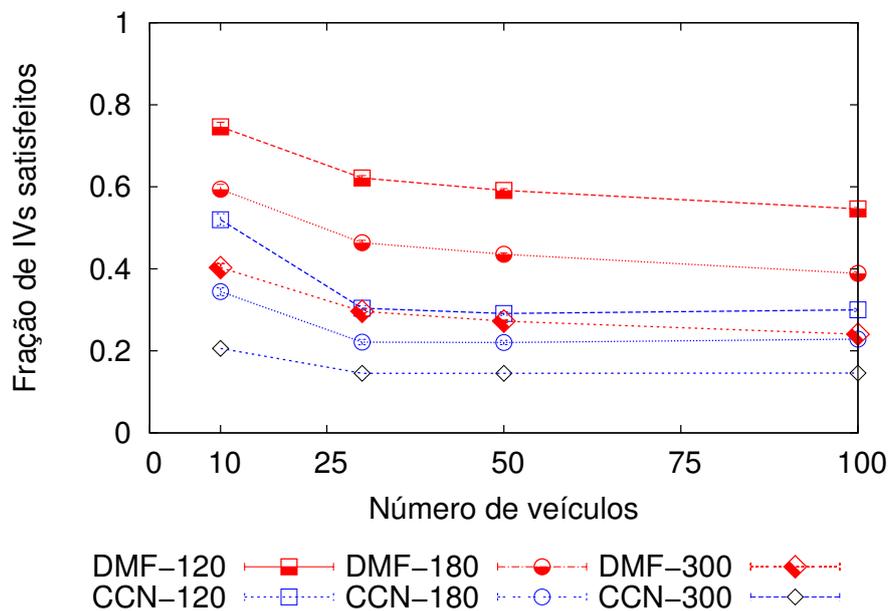
Nos cenários veiculares, os APs na cidade são apenas uma das opções para prover acesso à Internet aos usuários [28]. Outras formas de comunicação podem ainda ajudar na recepção das partes de conteúdo dos IVs não satisfeitos pelos APs, como as redes celulares [28].

O que pode se observar nos resultados das Figuras 4.13 e 4.14 é o mesmo que foi observado para a taxa de entrega. Quando a capacidade da rede de acesso à Internet aumenta, a fração de interesses satisfeitos aumenta também, e se a carga na rede aumenta a fração de IVs satisfeitos diminui. Entretanto, pelos resultados é possível notar que os benefícios do uso do encaminhamento são maiores para a fração de IVs satisfeitos que para a taxa de entrega, sendo as diferenças dos resultados entre usar e não usar as estratégias de encaminhamento de IVs maiores. Isso significa que apesar de o conteúdo completo não ser entregue ao usuário, mais partes dos conteúdos são entregues aos usuários quando as estratégias de encaminhamento propostas são usadas.

Ainda, pode-se observar nas Figuras 4.13 e 4.14 que enquanto a fração de IVs satisfeitos diminuiu ao usar CCN em velocidades mais altas, os resultados para a mesma métrica aumentaram ao usar a estratégia DMF. Por exemplo, com conteúdos de 180 kB e 30 veículos no cenário, com o aumento da velocidade, a fração de interesses satisfeitos aumenta 22,1% (0,464/0,380) quando a estratégia proposta é usada,

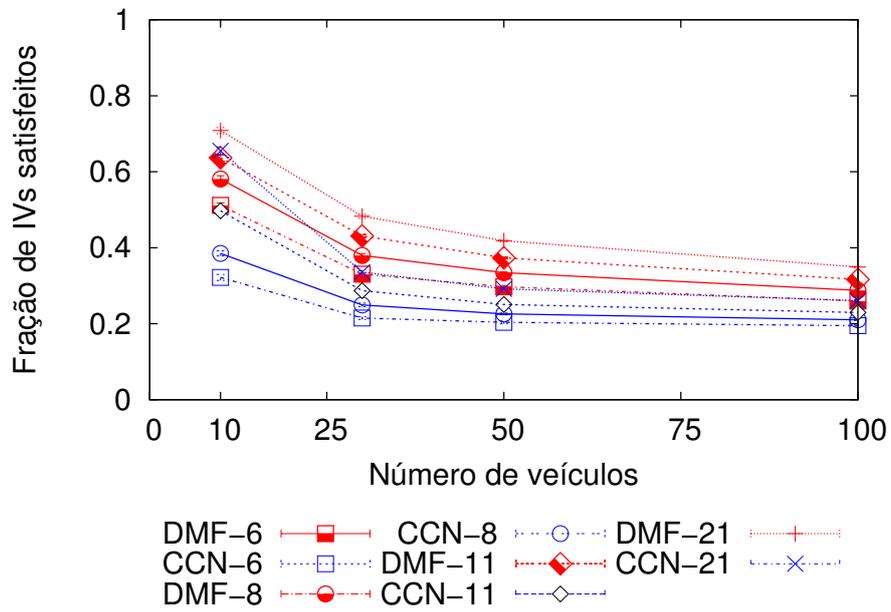


(a) Velocidade: 50 km/h.

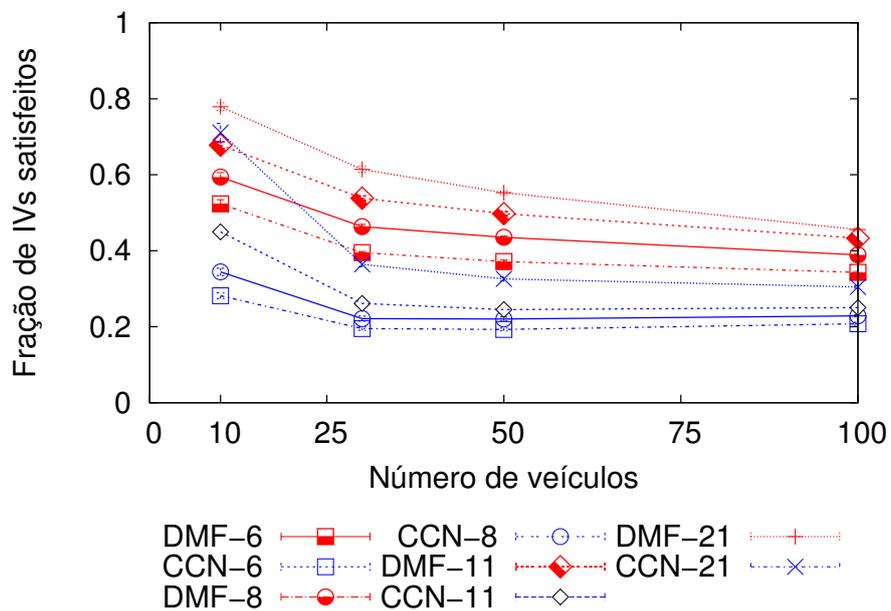


(b) Velocidade: 100 km/h.

Figura 4.13: Fração de IVs satisfeitos variando o tamanho dos conteúdos em kB com 8 APs distribuídos na rodovia. Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.



(a) Velocidade: 50 km/h.



(b) Velocidade: 100 km/h.

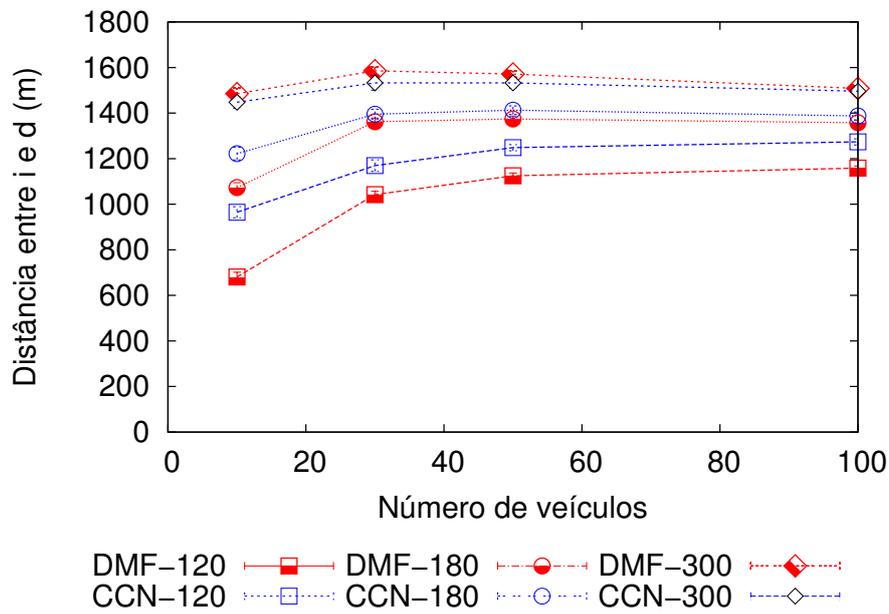
Figura 4.14: Fração de IVs satisfeitos variando o número de APs na rodovia com todos os conteúdos de 180 kB. Legenda: algoritmo-número de APs.

em comparação, quando a estratégia não é usada a fração de interesses satisfeitos cai 11,6% (0,221/0,250). Isso ocorre porque as velocidades mais altas resultam em cargas na rede menores, já que os veículos atravessam a rodovia mais rapidamente, tendo menos tempo para solicitar conteúdos. Por exemplo, se um usuário atravessando os 6 km da rodovia a 50 km/h pede em média 10 conteúdos, a 100 km/h, em média, 5 conteúdos serão pedidos. A queda na carga da rede é mais bem aproveitada pelas estratégias de encaminhamento, enquanto a CCN não consegue fazer o mesmo devido ao já citado uso menos eficiente dos contatos de curta duração.

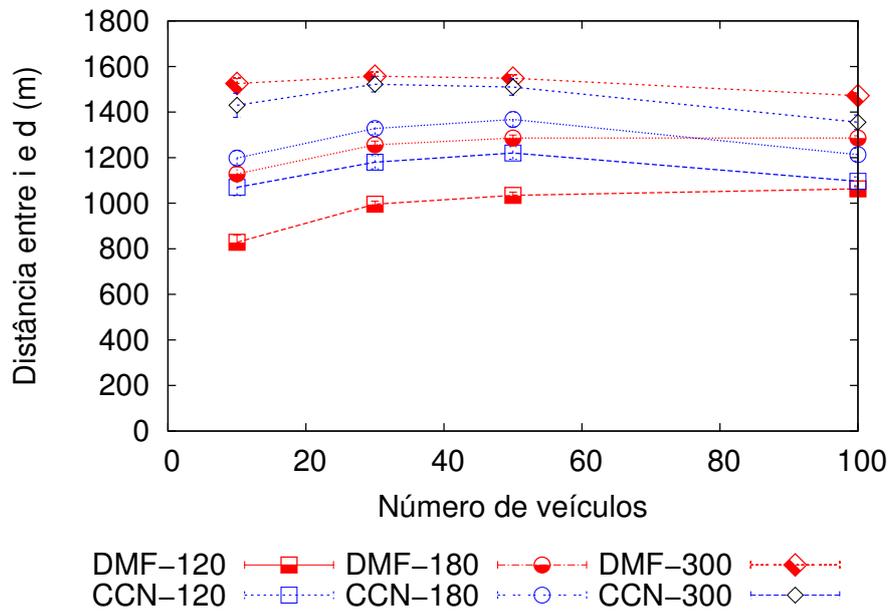
Outras métricas interessantes de serem avaliadas são o quão rápido os usuários recebem um pedaço de conteúdo e o quão rápido eles recebem o conteúdo completo. Essas métricas são analisadas através da medição da distância geográfica entre o ponto onde o pedaço de conteúdo ou conteúdo foi pedido pela primeira vez pelo usuário, e o ponto onde o pedaço de conteúdo pedido foi entregue ou o último pedaço de conteúdo necessário para completar o conteúdo completo foi recebido pelo usuário.

Comparando as Figuras 4.15(a) e 4.15(b), nota-se que o aumento da velocidade dos veículos aumenta a distância média necessária para que um IV seja atendido, o que pode ser mais claramente notado comparando a curva DMF-120 das duas figuras. Por exemplo, o ponto da curva referente a 10 veículos na Figura 4.15(a) de 50 km/h está próximo a 600 metros, enquanto o mesmo ponto na Figura 4.15(b) de 100 km/h está próximo a 800 metros.

Nos resultados relacionados aos pedaços de conteúdo na Figura 4.15, nota-se que quando a carga na rede aumenta, a distância entre solicitar e receber um pedaço de conteúdo aumenta também. Isso ocorre porque com uma maior carga na rede a estrutura de pedidos pendentes dos APs fica mais cheia. Com isso, uma solicitação leva em média mais tempo para ser satisfeita. Também, pode-se verificar que na média as estratégias de encaminhamento entregam pedaços de conteúdo mais rápido que a CCN enquanto os tamanhos dos conteúdos são pequenos. Por outro lado, quando o tamanho dos conteúdos aumenta, as estratégias DMF entregam pedaços de conteúdo mais devagar na média que a CCN. Os fatores chave para entender esse comportamento são o número de IVs satisfeitos e como eles são satisfeitos ao longo da rota dos usuários em respeito à distância.

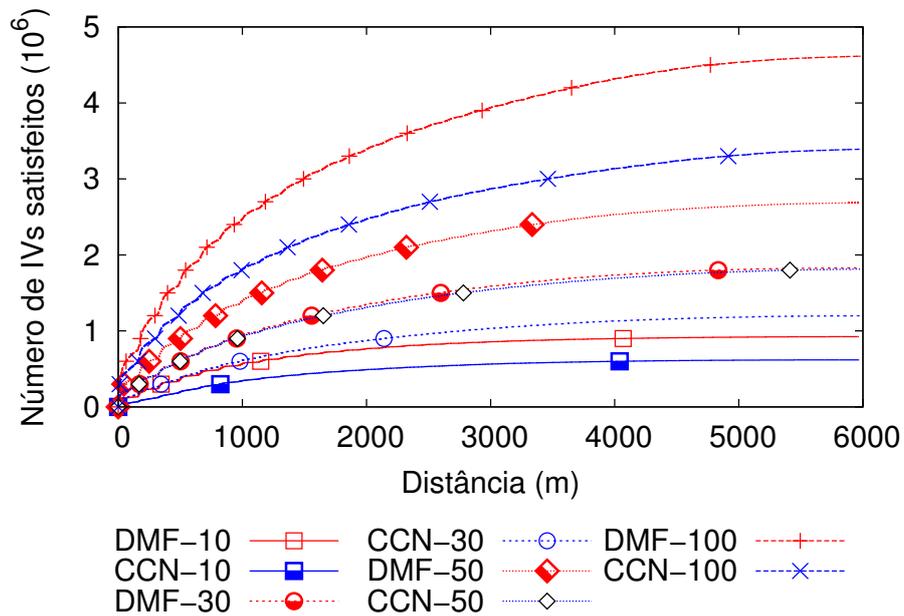


(a) Velocidade: 50 km/h.

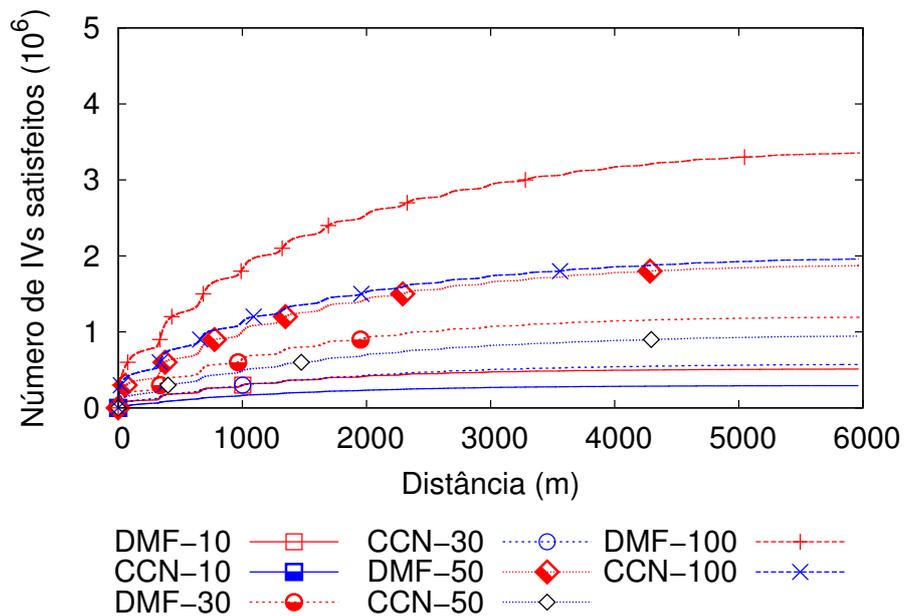


(b) Velocidade: 100 km/h.

Figura 4.15: Distância média entre onde um IV foi solicitado “i” e onde ele foi satisfeito “d”, variando o tamanho dos conteúdos em kB com 8 APs distribuídos na rodovia. Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.



(a) Velocidade: 50 km/h.



(b) Velocidade: 100 km/h.

Figura 4.16: Número acumulado de IVs satisfeitos de acordo com a distância entre onde um IV foi solicitado “i” e onde ele foi satisfeito “d”, com conteúdos de 180 kB e 8 APs distribuídos na rodovia. Legenda: algoritmo-número de veículos.

Para melhor entender os gráficos na Figura 4.15, o número acumulado de IVs satisfeitos por distância de onde ele foi solicitado até onde ele foi satisfeito é apresentado na Figura 4.16. As diferentes curvas mostram a variação do número de veículos na simulação. Nesse gráfico os resultados apresentados correspondem aos resultados das 30 rodadas combinados. A partir das Figuras 4.16(a) e 4.16(b), verifica-se claramente que ao usar as estratégias de encaminhamento mais IVs são satisfeitos em qualquer distância, seja a distância pequena ou grande. Isso afeta a média da distância e faz com que ela se torne maior em alguns casos da Figura 4.15. Portanto, conclui-se que usando as estratégias de encaminhamento não só mais IVs são satisfeitos, mas também mais IVs são satisfeitos mais rapidamente e ao longo da rota dos usuários mesmo a grandes distâncias.

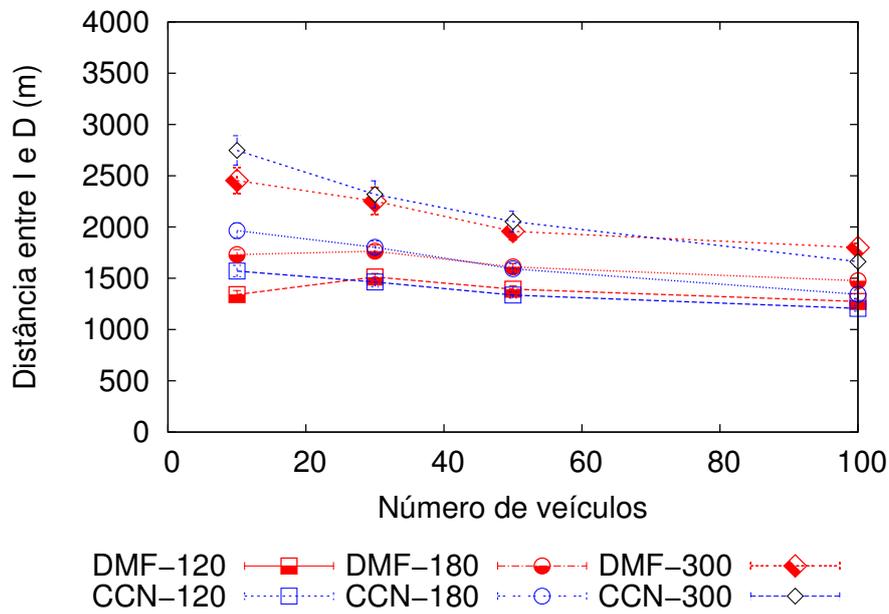
Os resultados relacionados a pedaços de conteúdo mostram que quando a carga na rede aumenta devido ao aumento do tamanho dos conteúdos, a distância entre solicitar e receber um pedaço de conteúdo aumenta também. Da mesma forma, os resultados relacionados à obtenção de conteúdos completos mostra o mesmo comportamento na Figura 4.17. Apesar disso, os resultados na Figura 4.17 também mostram que quando o número de veículos cresce, a distância entre solicitar e receber conteúdos diminui. Como tanto a CCN como a estratégia DMF realizam armazenamento de conteúdos populares, pode-se inferir que com um maior número de veículos os conteúdos populares são entregues mais rapidamente mais vezes por estarem em cache.

Ainda, comparando os resultados nas Figuras 4.17(a) e 4.17(b), observa-se que a distância necessária para a entrega de um conteúdo aumenta com a velocidade.

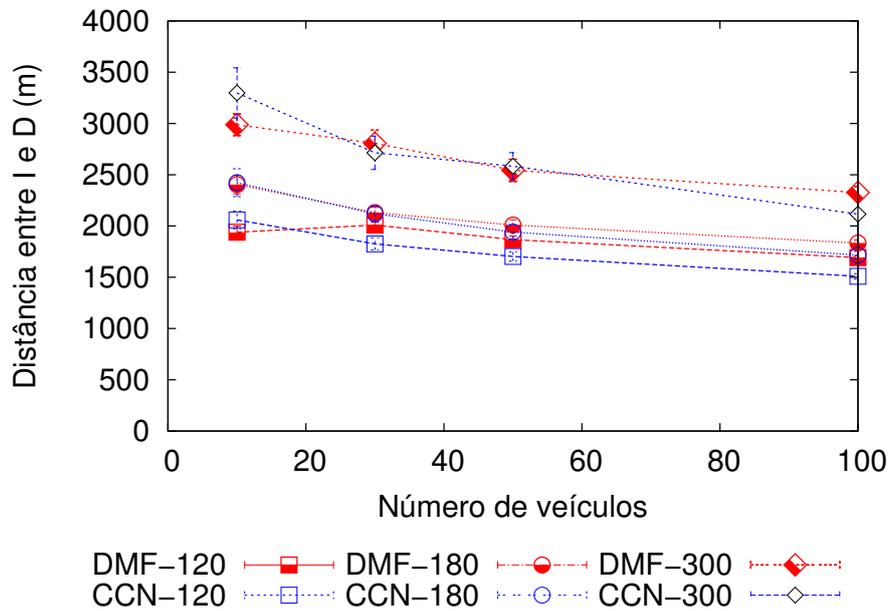
Na seção seguinte os resultados das simulações no cenário urbano são apresentados.

4.3.2 Cenário Urbano

O cenário urbano avalia o desempenho das estratégias propostas em áreas urbanas dentro de uma cidade. Enquanto em áreas urbanas os veículos não alcançam velocidades elevadas como nas rodovias, seus movimentos seguem trajetórias diversas. Assim, no cenário urbano, os movimentos dos veículos são menos previsíveis que no rodoviário, sendo importante avaliar se as estratégias de encaminhamento propos-



(a) Velocidade: 50 km/h.



(b) Velocidade: 100 km/h.

Figura 4.17: Distância média entre onde um conteúdo foi solicitado “I” e onde ele foi entregue “D”, variando o tamanho dos conteúdos em kB com 8 APs distribuídos na rodovia. Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.

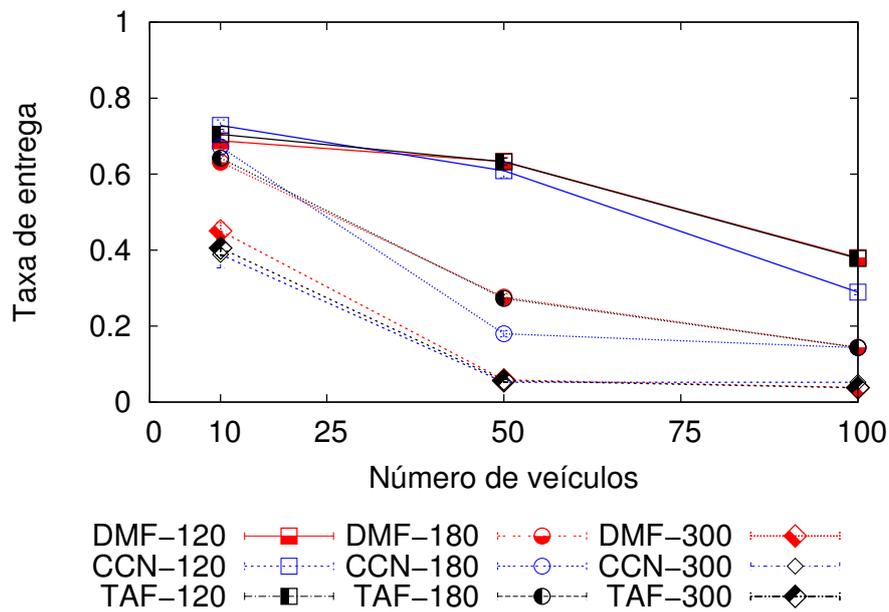
tas conseguem prever as trajetórias para melhorar a distribuição de conteúdos. Vale notar que diferente do cenário rodoviário, neste cenário é possível que um usuário em seu veículo não passe por um AP onde seu conteúdo foi agendado para ser recebido da Internet. As estratégias DMF e TAF serão avaliadas e comparadas ao CCN modificado.

A Figura 4.18 apresenta como a taxa de entrega de conteúdo é afetada por variações no número de veículos, tamanho dos conteúdos (Figure 4.18(a)) e número de APs (Figure 4.18(b)) no cenário.

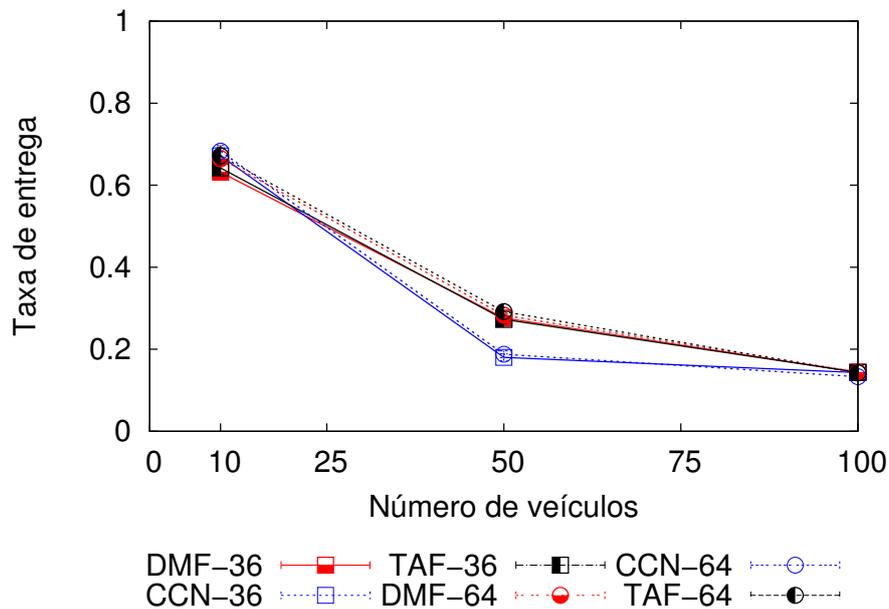
Na Figura 4.18(b) a taxa de entrega é avaliada variando o número de APs distribuídos no cenário. Os resultados mostram que apesar de no cenário rodoviário quanto maior o número de APs maior a taxa de entrega de conteúdos, no cenário urbano isso não necessariamente ocorre. O que acontece é que o cenário urbano é mais denso que o rodoviário. Dessa forma, uma transmissão sem fio cala mais veículos e APs no cenário urbano. Portanto, se o número de nós transmitindo cresce, o uso do meio sem fio pode deteriorar, ocorrendo colisões e fazendo com que os algoritmos de controle de taxa escolham taxas de transmissão menores e mais robustas.

Vale mencionar que os APs são nós que estão principalmente enviando pedaços de conteúdo, ocupando o meio sem fio mais que veículos, já que os pedaços de conteúdo são maiores que os pacotes de interesse. Então, no cenário urbano o número de APs deve ser selecionado de forma cuidadosa de maneira a maximizar a disseminação de conteúdos ao longo da rota de um usuário e ao mesmo tempo minimizar as chances de colisão e o congestionamento do meio sem fio. Diferentes quantidades de APs distribuídas no cenário foram simuladas e a partir dos resultados na Figura 4.18(b) conclui-se que os melhores resultados foram alcançados usando 36 APs no cenário. Portanto, essa quantidade de APs é usada nas simulações onde o número de APs permanece constante para este cenário e para o cenário de Colônia, que possui aproximadamente a mesma área.

Ao comparar as estratégias DMF, TAF e CCN verifica-se que os resultados alcançados pelas estratégias DMF e TAF sempre se sobrepõem. Adicionalmente, quando as estratégias de encaminhamento são usadas, observa-se que a taxa de entrega de conteúdos é menos afetada por variações no número de veículos. Por exemplo, na Figura 4.18(b), com 50 veículos as estratégias TAF e DMF apresen-



(a) Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.



(b) Legenda: algoritmo-número de APs.

Figura 4.18: Taxa de entrega de conteúdo: (a) Variando o tamanho dos conteúdos em kB com 36 APs distribuídos no cenário urbano; (b) Variando o número de APs no cenário urbano com conteúdos de 180 kB.

tam resultados melhores que a CCN. No que se segue, é necessário avaliar como as estratégias se comportam quando submetidas a diferentes cargas na rede.

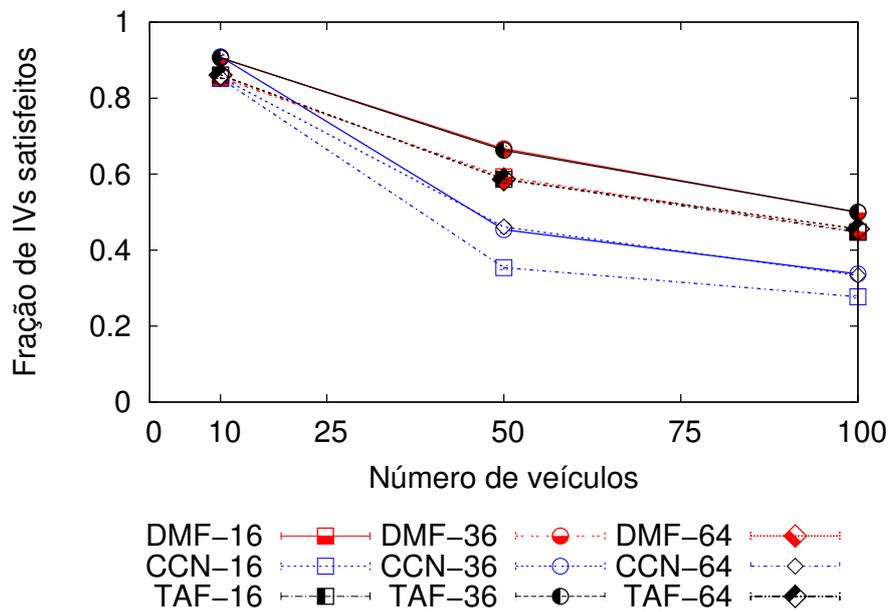
Na Figura 4.18(a), o tamanho dos conteúdos solicitados pelos usuários varia e pode-se notar que mantido o número de veículos, quanto maiores os conteúdos, menores as taxas de entrega. Esse resultado é similar ao obtido no cenário rodoviário. Adicionalmente, ao comparar todas as estratégias conclui-se que as estratégias de encaminhamento tornam a taxa de entrega menos suscetível a aumentos na carga da rede. Isso resulta em benefícios nos melhores casos e empates nos piores casos. Esses resultados também são similares aos obtidos no cenário rodoviário. Isso indica que mesmo em cenários onde os veículos não possuem apenas uma rota possível da origem até o destino, as estratégias propostas conseguem estimar por onde os veículos passarão e usar essa informação de maneira a aumentar a entrega de conteúdos.

Como feito no cenário rodoviário, a fração de IVs satisfeitos também é avaliada para melhor comparar as estratégias propostas com o CCN.

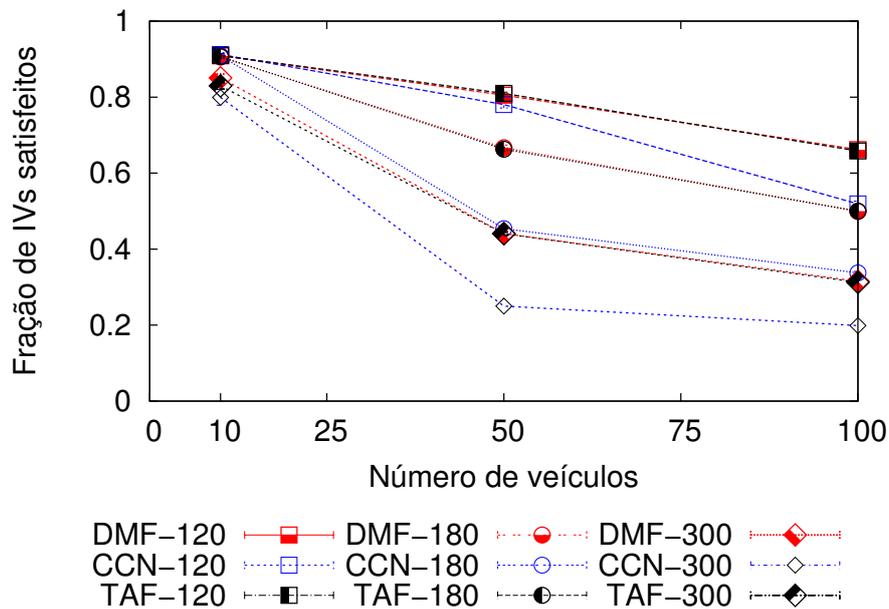
Na Figura 4.19(b), é possível observar que com o aumento no número de veículos e do tamanho dos conteúdos, as estratégias de encaminhamento são capazes de entregar mais pedaços de conteúdo aos usuários. Então, pode-se concluir que as estratégias DMF e TAF são menos afetadas por variações na carga da rede, e são capazes de entregar uma melhor qualidade de serviço aos usuários mesmo com número crescente de usuários e carga na rede.

Pelos resultados apresentados na Figura 4.19(a) nota-se mais claramente que quando o número de APs aumenta o uso do meio sem fio degrada, piorando os resultados tanto com o encaminhamento quanto sem ele. É interessante notar que o cenário também foi simulado com 121 APs e os resultados foram piores que os resultados para 16 APs.

Ainda pode-se verificar na Figura 4.19(a) que independentemente do número de APs o uso das estratégias de encaminhamento supera o CCN sozinho. Além disso, novamente nota-se que não há grandes diferenças entre os resultados das estratégias DMF e TAF. A ausência de diferenças maiores nos resultados da DMF e da TAF pode ser devido ao período de retransmissão usado na simulação, já que a retransmissão de IVs não satisfeitos possibilita que as estratégias de encaminhamento acertem a previsão da trajetória dos usuários. Por exemplo, se a DMF previr



(a) Legenda: algoritmo-número de APs.



(b) Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.

Figura 4.19: Fração de IVs satisfeitos: (a) Variando o número de APs no cenário urbano com conteúdos de 180 kB; (b) Variando o tamanho dos conteúdos em kB com 36 APs distribuídos no cenário urbano.

a trajetória de um usuário erradamente, enquanto a TAF o faz corretamente, a cada retransmissão (11 segundos) a DMF terá outra chance de acertar a previsão se outro AP ouvir a retransmissão do IV.

Na Tabela 4.2, comparam-se os resultados da CCN com as estratégias de encaminhamento com 36 APs distribuídos no cenário e conteúdos de 180 kB. Na última coluna verifica-se que quando as estratégias de encaminhamento são usadas, com o aumento do número de veículos, os resultados apresentam ganhos de quase 50% na fração de IVs satisfeitos. Dessa maneira, acredita-se que o uso dessas estratégias possibilita uma melhor qualidade de serviço aos usuários.

Tabela 4.2: Comparação da fração de IVs satisfeitos com 36 APs no cenário e conteúdos de 180 kB.

Número de veículos	Fração de IVs satisfeitos			$\frac{DMF}{CCN}$
	TAF	DMF	CCN	
10	0,91	0,91	0,91	1
50	0,67	0,67	0,45	1,49
100	0,50	0,50	0,34	1,47

Para melhor entender porque os resultados da fração de IVs satisfeitos e a taxa de entrega de conteúdos são algumas vezes baixos, p. ex., com 100 veículos e conteúdos de 300 kB a CCN satisfaz em torno de 20% dos IVs solicitados e as estratégias TAF e DMF satisfazem 31%, apresentam-se ambas a carga na rede de acesso à Internet na Tabela 4.3, e a capacidade máxima teórica da rede de acesso à Internet na Tabela 4.4.

A carga na rede de acesso à Internet é definida como a soma do tamanho de todos os conteúdos da Internet solicitados pelos usuários durante a simulação. Note que não necessariamente todos os conteúdos contados são entregues.

A capacidade máxima teórica da rede de acesso à Internet é definida como a quantidade máxima de dados que toda a infraestrutura consegue receber da Internet durante o tempo de simulação. Essa capacidade, apresentada na última coluna da Tabela 4.4, é calculada multiplicando a duração da simulação, a largura de banda do acesso à Internet de cada um dos APs e o número de APs no cenário, a segunda, a terceira e a quarta coluna da mesma tabela respectivamente. Em seguida, divide-se

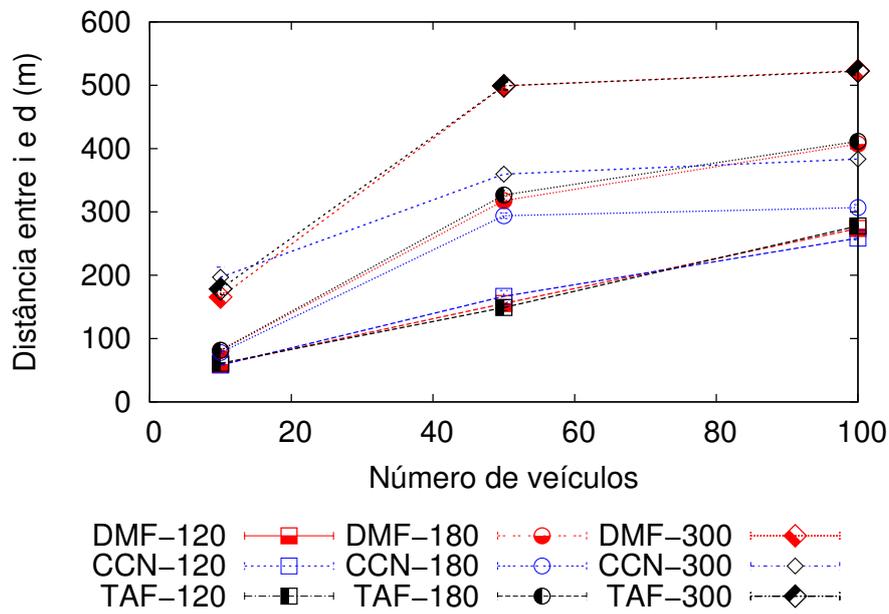
o resultado por 8 para representar o número obtido em bytes e por 1024 para representá-lo em megabytes. Pela definição, essa capacidade máxima só seria alcançada caso todos os APs estivessem recebendo conteúdos durante toda a simulação, o que não ocorre. Além disso, essa capacidade máxima só seria aproveitada pelos veículos se os conteúdos recebidos pelos APs sempre fossem de interesse, e sempre fossem recebidos antes do veículo entrar na cobertura do AP, ou ainda enquanto o veículo estiver no alcance do AP.

A partir das Tabelas 4.3 e 4.4, observa-se que para o caso com 100 veículos e conteúdos de 300 kB mesmo em condições perfeitas os 36 APs não seriam capazes de receber todos os conteúdos solicitados, já que a carga na rede é de 498,90 MB e a capacidade máxima teórica da rede de acesso à Internet com 36 APs é de 426,24 MB. Pelos resultados nas tabelas e pelos resultados da fração de IVs satisfeitos verifica-se que quanto maior a diferença entre capacidade da rede e carga na rede, melhor o desempenho da rede, por exemplo, na Figura 4.19(a) quando o número de APs aumenta de 16 para 36 e a carga na rede é mantida, a fração de interesses atendidos aumenta. Contudo, como visto anteriormente, aumentar a capacidade da rede pela adição de mais APs nem sempre resulta em aumentos nas taxas de entrega, devido ao fato do número de APs ter um limiar a partir do qual adicionar mais APs degrada o desempenho da rede ao invés de melhorá-lo, devido ao congestionamento do meio sem fio.

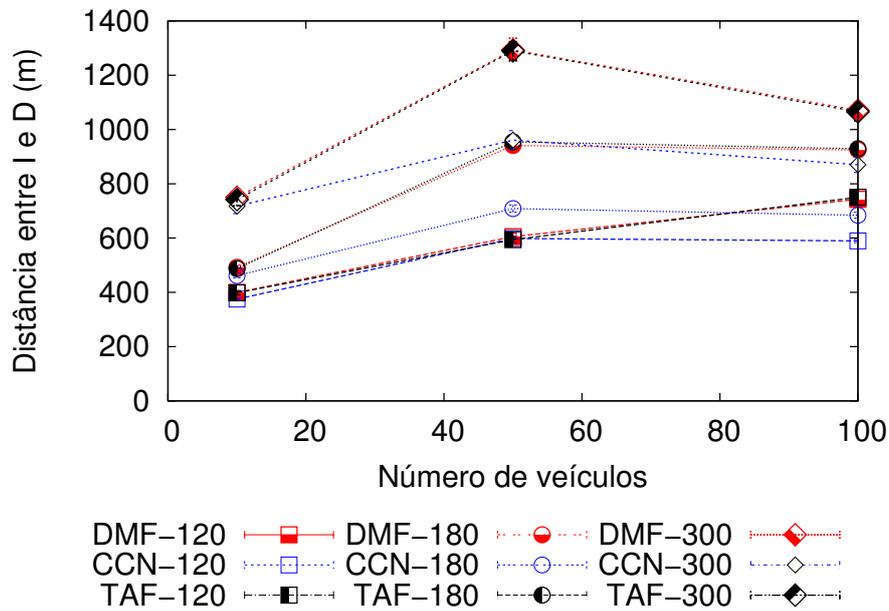
Outra forma de aumentar a capacidade da rede é aumentar a largura de banda do acesso à Internet de cada AP, isso é investigado no cenário de Colônia na seção seguinte.

Tabela 4.3: Carga na rede de acesso à Internet no cenário urbano.

Número de veículos	Número médio de conteúdos solicitados			Carga na rede de acesso à Internet (MB)		
	Tamanho dos conteúdos (kB)			Tamanho dos conteúdos (kB)		
	120	180	300	120	180	300
10	159	158	160	19,08	28,44	48,00
50	876	874	874	105,12	157,32	262,20
100	1656	1658	1663	198,72	298,44	498,90



(a) Pedaco de conteúdo.



(b) Conteúdo completo.

Figura 4.20: Distância média entre onde um IV ou conteúdo foi solicitado “i” ou “I” e onde ele foi satisfeito “d” ou “D”, variando o tamanho dos conteúdos em kB com 36 APs distribuídos no cenário urbano. Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.

Tabela 4.4: Capacidade máxima teórica da rede de acesso à Internet no cenário urbano.

Número de veículos	Duração da simulação (s)	Largura de banda do acesso à Internet por AP (kb/s)	Número de APs	Capacidade máxima da rede de acesso a Internet (MB)
10	316	256	16	161,79
10	316	256	36	364,03
10	316	256	64	647,17
10	316	256	121	1223,55
50	327	256	16	167,42
50	327	256	36	376,70
50	327	256	64	669,70
50	327	256	121	1266,14
100	370	256	16	189,44
100	370	256	36	426,24
100	370	256	64	757,76
100	370	256	121	1432,64

Para avaliar quão rápido IVs e conteúdos são satisfeitos nas Figuras 4.20(a) e 4.20(b), 36 APs são inseridos no cenário. Então, analisa-se a distância entre as posições onde um IV ou conteúdo foi solicitado pela primeira vez pelo usuário e a posição onde eles foram satisfeitos.

Nos resultados relativos a pedaços de conteúdo na Figura 4.20(a) verifica-se que, quando a carga na rede aumenta, a distância entre pedir e receber um pedaço de conteúdo aumenta também, como observado no cenário rodoviário. Ainda, observa-se que ambas as estratégias DMF e TAF entregam pedaços de conteúdo em média mais devagar que a CCN sem encaminhamento quando os conteúdos crescem. O mesmo comportamento ocorre no cenário rodoviário, e assim como no cenário rodoviário isso ocorre pois as estratégias de encaminhamento satisfazem mais IVs a distâncias pequenas e grandes, o que acaba aumentando a média da distância. Isso pode ser mais claramente visto na Figura 4.21(a), onde o número acumulado de IVs satisfeitos por distância de onde eles foram solicitados até onde eles foram satisfeitos é apresentado. Note que nesse gráfico os resultados apresentados correspondem aos resultados das 30 rodadas combinados.

Como esperado pelos resultados no cenário rodoviário, os resultados referentes à entrega de conteúdos completos na Figura 4.20(b) mostram que, quando a carga na

rede aumenta, as distâncias entre solicitar e receber o conteúdo também aumentam. Ainda, os resultados mostram novamente que quando o número de veículos cresce essa distância diminui.

Todos os resultados mostram que a estratégia TAF não é significativamente superior a estratégia DMF, e como pode ser visto na Figura 4.21(b) a estratégia TAF insere um número muito maior de IAPs na rede entre os APs do que a estratégia DMF para obter o mesmo desempenho, por essa razão escolhe-se utilizar apenas a estratégia DMF no cenário de Colônia, apresentado na seção seguinte.

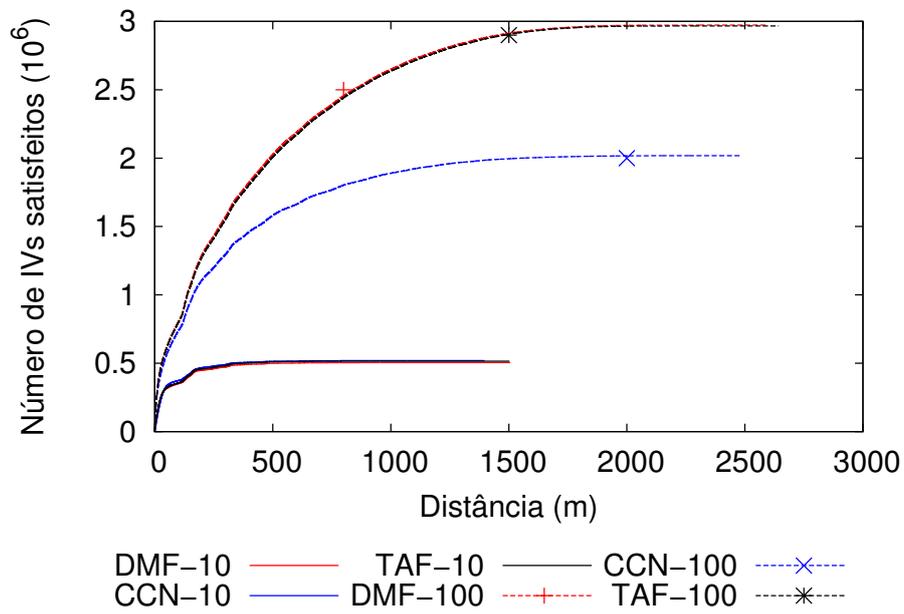
4.3.3 Cenário de Colônia

O cenário de Colônia [14] é usado para avaliar como as estratégias atuam em condições de tráfego de maior densidade e com estruturas viárias realistas. O número de veículos usado na simulação é igual a 688 devido ao próprio traço de mobilidade, enquanto o número de APs no cenário é mantido em 36. A escolha desse número de APs se deve aos resultados prévios do cenário urbano que possui área similar ao cenário de Colônia. Os resultados prévios indicam que o número de APs escolhido maximiza a disseminação de conteúdos ao longo da rota de um usuário enquanto minimiza as chances de colisão e o congestionamento do meio sem fio.

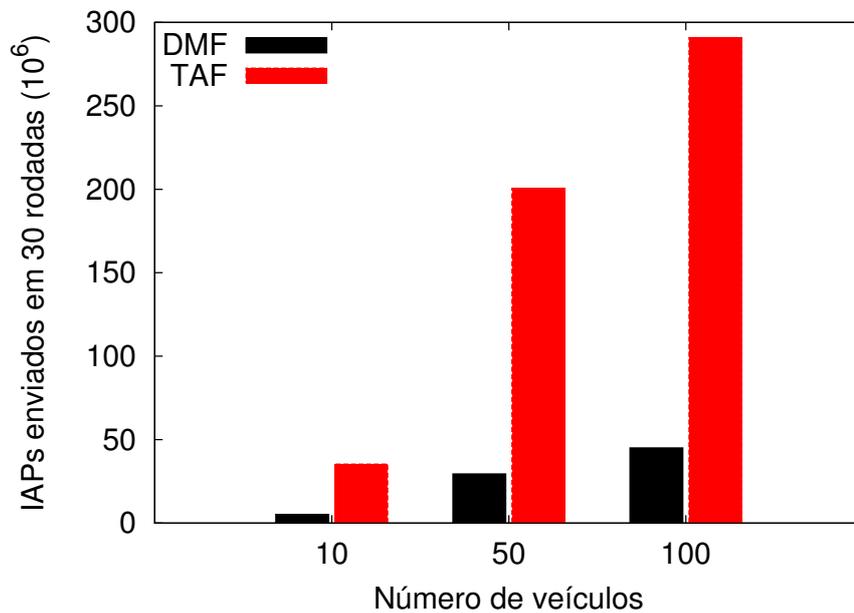
Como feito nos cenários anteriores, o tamanho dos conteúdos é variado de 120 kB a 300 kB. Vale mencionar que como o número de veículos do cenário é fixo, o eixo X dos gráficos apresentados representa o tamanho dos conteúdos. Para entender os efeitos do aumento da capacidade da rede de acesso à Internet através do aumento da largura de banda de cada AP à Internet são usados dois valores distintos para esse parâmetro: 256 kb/s e 1024 kb/s. O primeiro valor é o mesmo usado em todas as simulações anteriores, o segundo valor é o novo.

Na Figura 4.22(a), a fração de interesses satisfeitos é apresentada, enquanto na Figura 4.22(b), apresenta-se a taxa de entrega de conteúdos.

Como pode ser visto na Figura 4.22(a), ao usar a menor largura de banda de acesso à Internet, a estratégia DMF supera mais a CCN do que quando a maior largura de banda é usada, ou seja, as diferenças entre usar ou não o encaminhamento diminuem. Por outro lado, a capacidade da rede aumentou quatro vezes, e

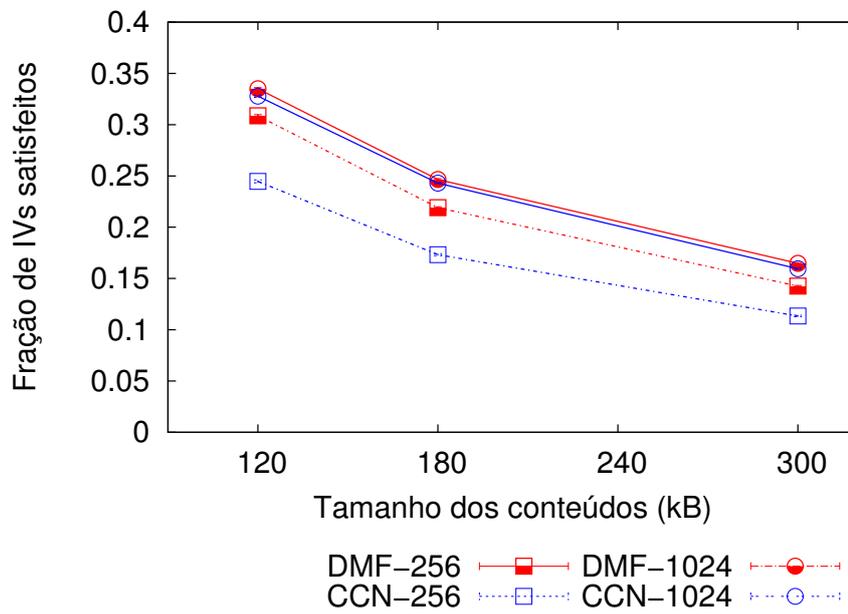


(a) Legenda: algoritmo-número de veículos.

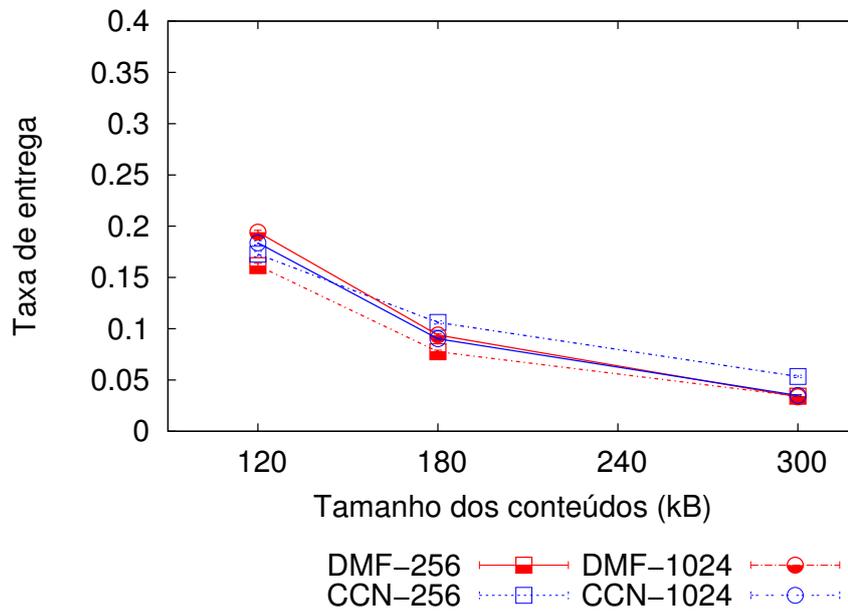


(b)

Figura 4.21: (a) IVs satisfeitos de acordo com a distância; (b) Sobrecarga das estratégias de encaminhamento: número total de IAPs enviado durante 30 rodadas de simulação.



(a) Legenda: algoritmo-largura de banda da Internet.



(b) Legenda: algoritmo-largura de banda da Internet.

Figura 4.22: (a) Fração de IVs satisfeitos variando a largura de banda da Internet dos APs; (b) Taxa de entrega de conteúdos variando a largura de banda da Internet dos APs.

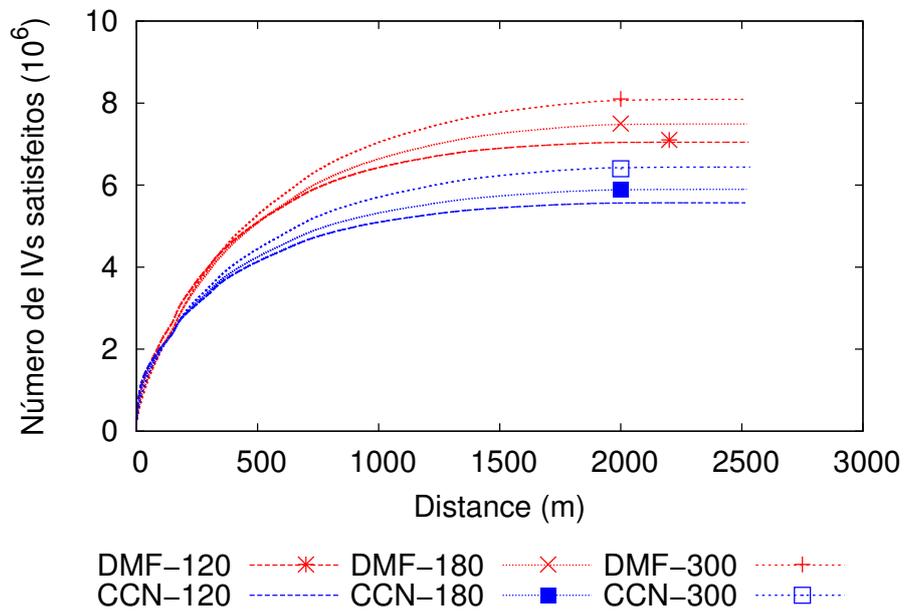
as diferenças entre o DMF com a largura de banda menor e o DMF ou CCN com a largura de banda maior não são tão significativas. Por exemplo, a diferença entre o resultado DMF-256 e o DMF-1024 é de apenas 2,7%, ainda a diferença entre o DMF-256 e o CCN-1024 é de apenas 2,4%. Isso indica que a alta densidade de nós no meio sem fio influencia negativamente o desempenho da rede, de forma que a rede não consegue entregar os conteúdos aos veículos, apesar de os conteúdos já estarem em cache nos APs.

Na Figura 4.22(a), a CCN aproveita mais o aumento da largura de banda que o DMF, isso ocorre pois a CCN tem mais espaço para melhorar a eficiência do uso dos contatos, já que a sua eficiência no uso dos contatos depende mais dos tempos de espera de *download*, que diminuem com o aumento da largura de banda.

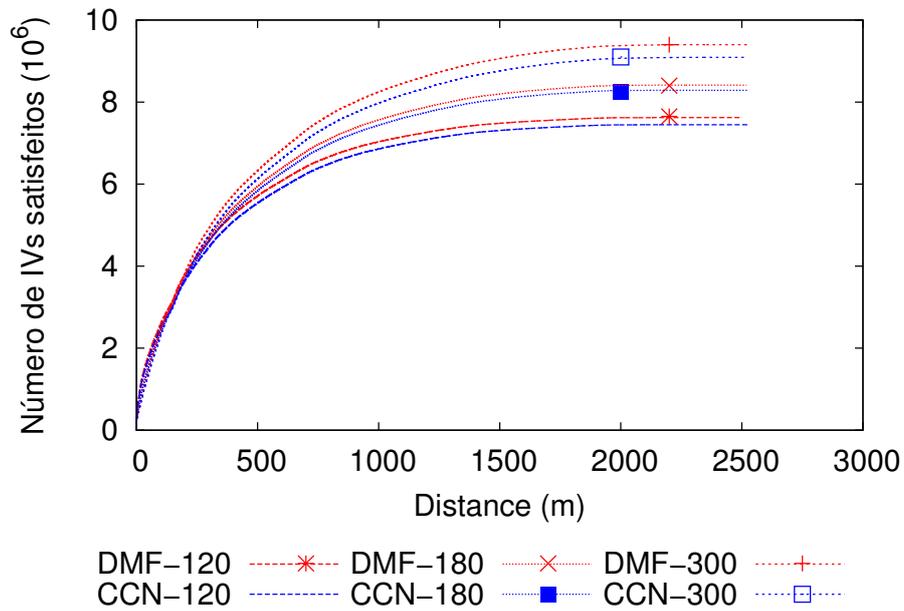
Nas Tabelas 4.5 e 4.6, a carga na rede de acesso à Internet e a capacidade máxima teórica que essa rede pode prover são apresentadas para confirmar que o meio sem fio é a raiz do problema. Através das tabelas pode-se ver que, usando a largura de banda por AP de 256 kb/s, a rede mesmo em condições ideais não seria capaz de receber da Internet todos os conteúdos solicitados. Por outro lado, ao usar a largura de banda de 1024 kb/s por AP, a rede em teoria seria capaz de receber todos os conteúdos da Internet para as simulações com conteúdos de 120 kB e 180 kB. Todavia, o que os resultados mostram na Figura 4.22(a) é que a DMF com largura de banda menor, apesar de não ser capaz de prover todos os conteúdos, já alcança um desempenho próximo ao caso onde a maior largura de banda é usada. Isso significa que a largura de banda é mais bem aproveitada quando o encaminhamento é usado.

Vale mencionar que qualquer tipo de *cache* proativo, usando ou não as estratégias de encaminhamento, sempre resulta em benefícios se o gargalo da rede estiver entre os APs e a Internet. Contudo, se o gargalo estiver no meio sem fio, o uso de *cache* proativo pode não resultar em benefícios [12]. No segundo caso isso acontece pois mesmo os conteúdos estando em cache, eles não serão entregues aos usuários devido ao gargalo no meio sem fio.

Nas Figuras 4.23(a) e 4.23(b), avalia-se quão rápido os IVs são satisfeitos em cenários com alta densidade de nós usando largura de banda de acesso à Internet por AP de 256 kb/s e 1024 kb/s respectivamente. Na primeira Figura 4.23(a), observa-se que mesmo o pior resultado da estratégia DMF, que ocorre com conteúdos de



(a) Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.



(b) Legenda: algoritmo-tamanho dos conteúdos.

Figura 4.23: IVs satisfeitos de acordo com a distância variando o tamanho dos conteúdos: (a) Largura de banda de acesso à Internet por AP = 256 kb/s; (b) Largura de banda de acesso à Internet por AP = 1024 kb/s.

Tabela 4.5: Carga na rede de acesso à Internet no cenário de Colônia.

Número de veículos	Tamanho dos conteúdos (kB)	Número médio de conteúdos solicitados	Carga na rede de acesso à Internet (MB)
688	120	9499	1139,88
688	180	9476	1705,68
688	300	9462	2838,60

Tabela 4.6: Capacidade máxima teórica da rede de acesso à Internet no cenário de Colônia.

Número de veículos	Duração da simulação (s)	Largura de banda do acesso à Internet por AP (kb/s)	Número de APs	Capacidade máxima da rede de acesso a Internet (MB)
688	600	256	36	691,20
688	600	1024	36	2764,80

120 kB, é melhor que o melhor resultado da CCN, que ocorre com conteúdos de 300 kB. Os resultados são melhores em respeito a ambas a quantidade e a velocidade de satisfação de IVs. Entretanto, quando a largura de banda de acesso à Internet cresce, as diferenças entre usar ou não as estratégias de encaminhamento diminuem, como pode ser visto na Figura 4.23(b). Ainda assim, o uso do encaminhamento de IVs resulta em ganhos tanto na velocidade quanto na quantidade de IVs satisfeitos em comparação ao uso do CCN sozinho. Novamente, a redução nas vantagens de usar o encaminhamento é devido ao meio sem fio já estar saturado, o que impede que a estratégia de encaminhamento aumente ainda mais seus benefícios, enquanto a CCN ainda possui espaço para evoluir.

O capítulo seguinte sintetiza o que foi proposto nesta dissertação, apresenta os resultados obtidos pelas propostas e apresenta direções futuras de trabalho.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho abordou a entrega de conteúdos da Internet em cenários veiculares. As redes veiculares impõem grandes desafios à entrega de conteúdos devido à vida curta dos contatos entre os nós da rede. Dessa maneira, é importante aumentar a quantidade de dados a serem transferidos por oportunidade de contato que um veículo possui em sua trajetória. Para isso, neste trabalho são utilizadas informações a respeito do destino dos usuários juntamente com o paradigma de redes orientadas a conteúdo. Utilizando as redes orientadas a conteúdo e o destino do usuário, esta dissertação de mestrado propôs o uso de *cache* proativo nos pontos de acesso para aumentar a probabilidade de entrega de conteúdos em cenários veiculares. Para isso, duas estratégias geográficas de encaminhamento de interesses veiculares entre pontos de acesso (DMF e TAF) e um protocolo de descoberta de vizinhança foram propostos.

As estratégias de encaminhamento foram avaliadas em três cenários veiculares distintos. Um que simula as características de uma rodovia, chamado rodoviário, e outro que simula as características de um centro urbano, chamado de urbano. O terceiro cenário é baseado em traços reais da cidade de Colônia, na Alemanha. Nesses cenários as estratégias foram avaliadas em relação à fração de interesses satisfeitos, à taxa de entrega de conteúdos e o quão rápido conteúdos e interesses são satisfeitos. Avaliou-se, ainda, como o número de veículos, a carga na rede e a capacidade da rede afetam o desempenho das propostas e da CCN no cenário veicular.

De modo geral, os resultados de todos os cenários mostram que as estratégias de encaminhamento sempre satisfazem mais interesses e conteúdos que o CCN sem

modificações, por exemplo, alcançando ganho de quase 50% nos IVs satisfeitos no cenário urbano em relação ao CCN sem modificações. Isso indica que as estratégias descentralizadas propostas beneficiam os usuários, independente do cenário. Mesmo em cenários onde os veículos não possuem apenas uma rota possível da origem até o destino, as estratégias propostas conseguem estimar por onde os veículos passarão e usar essa informação de maneira a aumentar a entrega de conteúdos.

Os resultados em todos os cenários também indicam que usando as estratégias de encaminhamento, além de mais IVs serem satisfeitos, eles ainda são satisfeitos mais rapidamente e ao longo da rota dos usuários, mesmo a grandes distâncias. Além disso, observa-se que independente do cenário, quanto maior a diferença entre capacidade da rede e carga na rede, melhor o desempenho das estratégias de encaminhamento. Mais especificamente, os resultados indicam que as estratégias DMF e TAF aproveitam melhor o aumento da capacidade na rede através do aumento no número de APs do que a CCN modificada. Além disso, os resultados também mostram que o uso das estratégias torna tanto a taxa de entrega quanto a fração de IVs satisfeitos menos influenciadas por aumentos na carga da rede.

Outra vantagem do uso das estratégias vista nos resultados é que a eficiência do armazenamento de conteúdos é menos dependente do número de veículos e de rotas sobrepostas nas estratégias do que na CCN sem modificações.

Pelos resultados do cenário rodoviário, conclui-se que usando as estratégias propostas, a rede se torna mais robusta a variações na velocidade, sendo as estratégias menos afetadas por altas velocidades que a CCN sozinha. Essa diferença se deve à maior eficiência do uso dos tempos de contato resultante do uso das estratégias.

Pelos resultados do cenário de Colônia, nota-se que ao usar a estratégia DMF, devido ao congestionamento do meio sem fio, uma largura de banda menor alcança um desempenho próximo de quando uma maior largura de banda é usada, isso não ocorre com o CCN sozinho. O que significa que a largura de banda é mais bem aproveitada quando as estratégias de encaminhamento são usadas.

Finalmente, verifica-se que a estratégia DMF sempre apresenta desempenho similar à estratégia TAF. Como a TAF introduz uma maior carga de controle na rede, caso seja necessário escolher uma das estratégias a DMF seria a mais indicada.

Como trabalho futuro planeja-se estender os testes realizados para outros seg-

mentos do conjunto de dados de Colônia e outros conjuntos de dados. Ao aumentar as áreas geográficas de simulação, seria interessante fazer os veículos enviarem destinos parciais da trajetória nos IVs, ao invés do destino final da trajetória, dessa forma as estratégias de encaminhamento conseguiriam acompanhar melhor a trajetória real dos veículos. Note que para a modificação anterior ser realizada, não é necessária nenhuma modificação na arquitetura proposta, a única mudança ocorre no significado do campo de destino inserido nos IVs. Ainda, pretende-se avaliar como o período de retransmissão de IVs não satisfeitos afeta as estratégias e a CCN e se valores maiores desse parâmetro podem resultar em maiores diferenças nos resultados das estratégias DMF e TAF. A modelagem do comportamento dos usuários durante a solicitação de conteúdos poderia ser diferente, de forma que ao invés de todos os usuários serem potenciais consumidores de conteúdo, somente uma parte deles seja. Também pode ser modelada de forma diferente a área que delimita onde é esperado que o usuário passe, por exemplo, substituindo o triângulo por círculo e limitando o encaminhamento dos IAPs por número de saltos. Outro trabalho interessante é a avaliação do aumento da área geográfica dos cenários de simulação para avaliar qual o efeito sobre as estratégias de encaminhamento e a CCN modificada. Finalmente, a definição de HCAP poderia ser alterada para avaliar a influência dessa métrica na entrega de conteúdos e na fração de IVs satisfeitos.

Referências Bibliográficas

- [1] WORLD HEALTH ORGANIZATION, W., “Global status report on road safety 2013”, http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2013/en/, 2013.
- [2] ASSOCIATION FOR SAFE INTERNATIONAL ROAD TRAVEL, A., “Annual Global Road Crash Statistics”, <http://www.asirt.org/initiatives/informing-road-users/road-safety-facts/road-crash-statistics.aspx>, 2013.
- [3] MORGAN, Y., “Notes on DSRC WAVE Standards Suite: Its Architecture, Design, and Characteristics”, *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, v. 12, n. 4, pp. 504–518, Maio 2010.
- [4] KAKKASAGERI, M., MANVI, S., “Regression based critical information aggregation and dissemination in VANETs: A cognitive agent approach”, *Vehicular Communications*, v. 1, n. 4, pp. 168 – 180, Jul. 2014.
- [5] CHENG, N., LU, N., ZHANG, N., et al., “Vehicular WiFi offloading: Challenges and solutions”, *Vehicular Communications*, v. 1, n. 1, pp. 13–21, Dez. 2014.
- [6] DA SILVA, V. B., DA SILVA, F. O., CAMPISTA, M. E. M., et al., “A Trajectory-Based Approach to Improve Delivery in Drive-Thru Internet Scenarios”, *Workshop on Emerging Vehicular Networks: V2V/V2I and Railroad Communications - IEEE International Conference on Communications*, pp. 499–504, Jun. 2013.

- [7] DE BRITO, G. M., VELLOSO, P. B., MORAES, I. M., “Redes orientadas a conteúdo: Um novo paradigma para a Internet”, *Minicursos do SBRC*, pp. 211–264, Maio 2012.
- [8] CHOI, J., HAN, J., CHO, E., et al., “A Survey on content-oriented networking for efficient content delivery”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 49, n. 3, pp. 121–127, Mar. 2011.
- [9] VASILAKOS, A. V., LI, Z., SIMON, G., et al., “Information centric network: Research challenges and opportunities”, *Journal of Network and Computer Applications*, v. 52, pp. 1 – 10, Fev. 2015.
- [10] WANG, L., AFANASYEV, A., KUNTZ, R., et al., “Rapid Traffic Information Dissemination Using Named Data”. In: *ACM NoM*, pp. 7–12, Jun. 2012.
- [11] JACOBSON, V., SMETTERS, D. K., THORNTON, J. D., et al., “Networking Named Content”. In: *ACM CoNEXT*, pp. 1–12, Dez. 2009.
- [12] DESHPANDE, P., KASHYAP, A., SUNG, C., et al., “Predictive Methods for Improved Vehicular WiFi Access”. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '09*, pp. 263–276, Jun. 2009.
- [13] AMADEO, M., CAMPOLO, C., MOLINARO, A., “Multi-source Data Retrieval in IoT via Named Data Networking”. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Information-centric Networking*, pp. 67–76, Set. 2014.
- [14] UPPOOR, S., FIORE, M., “Large-scale urban vehicular mobility for networking research”. In: *Vehicular Networking Conference (VNC), 2011 IEEE*, pp. 62–69, Nov. 2011.
- [15] DA SILVA, V. B. C., CAMPISTA, M. E. M., COSTA, L. H. M. K., “Uma Estratégia de Cache Proativo para Distribuição de Conteúdo em Redes Veiculares”, *XXXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC*, pp. 403–416, Maio 2015.

- [16] GALLO, M., PERINO, D., MUSCARIELLO, L., “Content-Centric Networking Packet Header Format”, *Internet Engineering Task Force - Internet-Draft*, pp. 1–16, Jan. 2015.
- [17] BAI, F., KRISHNAMACHARI, B., “Exploiting the wisdom of the crowd: localized, distributed information-centric VANETs”, *IEEE Communications Magazine*, v. 48, n. 5, pp. 138–146, Maio 2010.
- [18] BUYYA, R., PATHAN, M., VAKALI, A., *Content Delivery Networks*. 1st ed. Springer Publishing Company, 2008.
- [19] DE BRITO, G. M., VELLOSO, P. B., MORAES, I. M., “Uma análise do desempenho de redes sem-fio orientadas a conteúdo”, *XXXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC*, pp. 149–162, Maio 2014.
- [20] AMADEO, M., CAMPOLO, C., MOLINARO, A., “Enhancing content-centric networking for vehicular environments”, *Computer Networks*, v. 57, n. 16, pp. 3222 – 3234, Jul. 2013.
- [21] WANG, L., WAKIKAWA, R., KUNTZ, R., et al., “Data naming in Vehicle-to-Vehicle communications”. In: *IEEE NOMEN*, pp. 328–333, Mar. 2012.
- [22] AMADEO, M., CAMPOLO, C., MOLINARO, A., “Content-centric Networking: Is That a Solution for Upcoming Vehicular Networks?” In: *ACM VANET’12*, pp. 99–102, Jun. 2012.
- [23] AFANASYEV, A., MOISEENKO, I., ZHANG, L., et al., “ndnSIM: NDN simulator for NS-3”, *University of California, Los Angeles, Tech. Rep*, 2012.
- [24] MASCARENHAS, D. M., MORAES, I. M., “Limiting the interest-packet forwarding in information-centric wireless mesh networks”. In: *Wireless Days (WD), 2014 IFIP*, pp. 1–6, Nov. 2014.
- [25] PRATES, A. A., MORAES, I. M., “GeoZone: Um Framework Eficiente de Difusão de Interesses em Redes Veiculares Orientadas a Conteúdo”, *SBRC*, pp. 163–176, Maio 2014.

- [26] ZHANG, D., YEO, C. K., “Enabling Efficient WiFi-Based Vehicular Content Distribution”, *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, v. 24, n. 3, pp. 479–492, Mar. 2013.
- [27] RAZZAQ, A., MEHAOUA, A., “Video transport over VANETs: Multi-stream coding with multi-path and network coding”. In: *Local Computer Networks (LCN), 2010 IEEE 35th Conference on*, pp. 32–39, Oct. 2010.
- [28] GERLA, M., WU, C., PAU, G., et al., “Content distribution in VANETs”, *Vehicular Communications*, v. 1, n. 1, pp. 3 – 12, Nov. 2013.
- [29] CHEN, M., MAU, D. O., ZHANG, Y., et al., “VENDNET: Vehicular Named Data NETwork”, *Vehicular Communications*, v. 1, n. 4, pp. 208 – 213, Set. 2014.
- [30] MALANDRINO, F., CASETTI, C., CHIASSERINI, C.-F., et al., “Content Download in Vehicular Networks in Presence of Noisy Mobility Prediction”, *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, v. 13, n. 5, pp. 1007–1021, Maio 2014.
- [31] AMADEO, M., CAMPOLO, C., MOLINARO, A., “CRoWN: Content-Centric Networking in Vehicular Ad Hoc Networks”, *IEEE Communications Letters*, v. 16, n. 9, pp. 1380–1383, Set. 2012.
- [32] ZHENG, Z., SINHA, P., KUMAR, S., “Sparse WiFi Deployment for Vehicular Internet Access With Bounded Interconnection Gap”, *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, v. 20, n. 3, pp. 956–969, Jun. 2012.
- [33] MALANDRINO, F., CASETTI, C., CHIASSERINI, C., et al., “Optimal Content Downloading in Vehicular Networks”, *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, v. 12, n. 7, pp. 1377–1391, Jul. 2013.
- [34] JIANG, D., DELGROSSI, L., “IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments”. In: *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, pp. 2036–2040, Maio 2008.

- [35] SMITHIES, D., “Minstrel Rate Control Algorithm”, <https://wireless.wiki.kernel.org/en/developers/documentation/mac80211/ratecontrol/minstrel>, 2015.
- [36] CHLEBUS, E., BRAZIER, J., “Nonstationary Poisson Modeling of Web Browsing Session Arrivals”, *Inf. Process. Lett.*, v. 102, n. 5, pp. 187–190, Maio 2007.
- [37] BRESLAU, L., CAO, P., FAN, L., et al., “Web caching and Zipf-like distributions: Evidence and implications”. In: *IEEE INFOCOM*, v. 1, pp. 126–134, Mar. 1999.
- [38] REZENDE, C., BOUKERCHE, A., RAMOS, H., et al., “A Reactive and Scalable Unicast Solution for Video Streaming over VANETs”, *Computers, IEEE Transactions on*, v. 64, n. 3, pp. 614–626, Mar. 2015.