

**UM MECANISMO DE OFFLOADING PARA
REDES DE SENSORES VEICULARES**

DOUGLAS LEITE LEAL MOURA

**UM MECANISMO DE OFFLOADING PARA
REDES DE SENSORES VEICULARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

ORIENTADOR: DR. ANTONIO ALFREDO FERREIRA LOUREIRO
COORIENTADOR: DR. ANDRÉ LUIZ LINS DE AQUINO

Belo Horizonte

Agosto de 2019

© 2019, Douglas Leite Leal Moura
. Todos os direitos reservados

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Belkiz Inez Rezende Costa
CRB 6ª Região nº 1510

Moura , Douglas Leite Leal.

M929u Um mecanismo de offloading para redes de sensores
veiculares / Douglas Leite Leal Moura — Belo Horizonte, 2019.
xxii, 68 f. il.; 29 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas
Gerais – Departamento de Ciência da Computação
Orientador: Antonio Alfredo Ferreira Loureiro.

1. Computação – Teses. 2. Redes veiculares. 3. VANETs. 4.
Offloading. I.Orientador. II.Título.

CDU 519.6*22(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO


Um mecanismo de offloading para redes de sensores veiculares

DOUGLAS LEITE LEAL MOURA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


PROF. ANTONIO ALFREDO FERREIRA LOUREIRO - Orientador
Departamento de Ciência da Computação - UFMG


PROF. ANDRÉ LUIZ LINS DE AQUINO - Coorientador
Instituto de Computação - UFAL


PROF. HEITOR SOARES RAMOS FILHO
Ciência da Computação - UFMG


PROF. RICARDO AUGUSTO RABELO OLIVEIRA
Departamento de Computação - UFOP

Belo Horizonte, 9 de Agosto de 2019.

Dedico este trabalho ao meu avô (in memoriam), que sempre acreditou em meu potencial e jamais deixou de me apoiar.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais por me ensinarem o valor dos estudos e pela dedicação em me educar para se tornar uma pessoa cada dia melhor. Agradeço à minha família por acreditar em mim e me apoiar em todas as minhas decisões.

Agradeço especialmente à minha namorada, Claudia Patricia, pela compreensão e apoio incondicional nesta fase tão intensa da minha vida, a sua ajuda foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Agradeço aos professores Dr. Antonio Loureiro e Dr. André Aquino por terem contribuído para a minha formação acadêmica. Sou grato aos dois pelo empenho, paciência e por todo o tempo dedicado em me orientar.

Agradeço às amigadas que construí durante o mestrado, em especial Anderson, Lucas e Tâmara. Aos amigos Daiane, Deivid e Rubbens, que me acompanharam ao longo desta jornada e torceram por mim.

Agradeço à UFMG e ao Departamento de Ciência da Computação (DCC) por serem responsáveis por minha formação acadêmica no mestrado. Ao pessoal do LaCCAN e da UFAL - Campus A.C. Simões por terem me acolhido tão bem e pelo conhecimento que puderam compartilhar comigo neste curto período de tempo. Gostaria de agradecer ao pessoal da UFAL - Campus Arapiraca, que fizeram parte da minha graduação e contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido durante o período de realização do mestrado.

*“Se as coisas não acontecem como desejamos, deveríamos
desejá-las do modo que elas acontecem.”*

(Aristóteles)

Resumo

A rede *ad-hoc* veicular constitui-se como uma importante fonte de dados para um promissor paradigma de sensoriamento remoto, conhecido como redes de sensores veiculares. As redes de sensores veiculares têm sido amplamente estudadas e provaram ser muito úteis para o monitoramento do ambiente urbano, provendo serviços de informações, gestão eficiente do tráfego e planejamento urbano à longo prazo. A aquisição de uma quantidade massiva de dados de sensoriamento pode gerar uma carga significativa na rede celular e degradar a sua capacidade, por isso estratégias são requisitadas como forma de favorecer a economia da largura de banda e o gerenciamento escalável da rede. Este trabalho apresenta uma abordagem para fazer o *offloading* dos dados de sensoriamento em uma rede de sensores veiculares. Para isto, os dados que seriam originalmente transmitidos na rede celular serão migrados para uma rede complementar e de baixo custo, baseada em comunicação D2D, para serem submetidos a alguma técnica de redução de dados antes do *upload* para a estação-base. O problema foi modelado como uma instância do *d-hop dominating set* e um algoritmo baseado em medida de centralidade foi proposto para determinar um subconjunto de veículos responsáveis pela agregação e *upload* dos dados. Os experimentos foram realizados a partir de traços de mobilidade de um cenário real e resultados mostraram uma redução de até 155.40 kB/s no custo de *upload* durante o horário de trânsito intenso.

Palavras-chave: Offloading, VANETs, redes celulares.

Abstract

The vehicular ad-hoc network is an important data source for a remote sensing paradigm known as vehicular sensor networks. Vehicular sensor networks have been widely studied and proved to be very useful for urban environmental monitoring, providing information services, efficient traffic management and long-term urban planning. The acquisition of a massive amount of sensing data can generate a significant increase in cellular traffic and reduce network capacity, therefore strategies are required in order to provide bandwidth savings and scalable network management. This work presents an offloading approach for sensing data in a vehicular sensor networks. The data that would originally be transmitted in the cellular network will be migrated to a complementary and low-cost network, based on D2D communication, to be compressed by some data reduction technique and transmitted to the base station. We model the problem as an instance of d-hop dominating set and propose a centrality based algorithm to determine a subset of vehicles to perform aggregation and upload of the data. The experiments used mobility traces from real scenario and results show a decrease of up to 155.40 kB/s in the upload cost during peak hours.

Keywords: Offloading, VANETs, cellular networks.

Lista de Figuras

2.1	Exemplos de sensores automobilísticos.	20
2.2	Rede de sensores veiculares.	21
2.3	Ilustração da comunicação D2D.	23
3.1	Exemplos de conjuntos dominantes.	29
3.2	Exemplos de soluções válidas e não-válidas do problema.	31
4.1	Exemplo de cálculo do <i>closeness centrality</i> estimado por $k = 3$	36
4.2	RMSE de C_k para cada valor de k	37
4.3	Esquema mostrando as etapas da solução proposta.	38
4.4	<i>1-hop dominating set</i> com o <i>closeness centrality</i> estimado por $k = 3$	40
4.5	Exemplos utilizando a comunicação <i>multi-hop</i>	41
5.1	Topologia rodoviária da cidade de Colônia.	43
5.2	Melhor caso de agregação local.	44
5.3	Pior caso de agregação local.	45
5.4	Custo na abordagem de <i>upload</i> tradicional.	46
5.5	FDA do custo de <i>upload</i> na condição de melhor caso.	47
5.6	Comparação dos custos de <i>upload</i> na comunicação <i>single-hop</i>	50
5.7	Comparação dos custos de <i>upload</i> na comunicação <i>multi-hop</i>	52
5.8	Ganho do sistema relativo ao ganho da solução ótima.	53
5.9	Comparação dos ganhos do sistema.	54
5.10	FDA do custo de <i>upload</i> na condição de pior caso.	55
5.11	FDA do custo de <i>upload</i> após o mecanismo de confirmação.	57
5.12	Custos de <i>upload</i> na condição de pior caso.	58
5.13	Número de veículos isolados na rede.	59
5.14	Tamanho e diâmetro das componentes conexas.	60
5.15	Topologia do cenário utilizado na simulação de mobilidade.	62
5.16	Comparação do custo de <i>upload</i>	65

5.17 Comparação do ganho do sistema.	65
--	----

Lista de Tabelas

2.1	Tecnologias de acesso para comunicação D2D.	24
4.1	Valores aproximados para a medida de centralidade.	36
5.1	Raio de 100 metros: Avaliação do custo de <i>upload</i>	48
5.2	Raio de 200 metros: Avaliação do custo de <i>upload</i>	49
5.3	Resultados do teste pareado para a comunicação <i>single-hop</i>	50
5.4	Trânsito moderado: Resultados do teste pareado.	53
5.5	Resultados do teste pareado para o cenário de pior caso.	57
5.6	Parâmetros da simulação.	63
5.7	Avaliação dos parâmetros do MHC (<i>single-hop</i>).	64
5.8	Resultados do teste pareado para o ganho do sistema.	66

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Problema	16
1.2	Objetivos	16
1.3	Principais contribuições	17
1.4	Organização do trabalho	18
2	Fundamentos Teóricos e Trabalhos Relacionados	19
2.1	Redes de Sensores Veiculares	19
2.2	Comunicação <i>Device-to-Device</i> (D2D)	22
2.3	Trabalhos Relacionados	25
3	Determinação de elementos de <i>offloading</i>	28
3.1	Conjunto dominante	28
3.2	<i>Minimum d-hop dominating set problem</i>	30
4	Multi-hop baseado em closeness centrality	33
4.1	Medida de centralidade	33
4.2	Algoritmo de seleção dos agregadores	38
5	Experimentos	42
5.1	Análise preliminar	44
5.1.1	Condição de melhor caso	47
5.1.2	Condição de pior caso	55
5.1.3	Discussão geral dos resultados	58
5.2	Avaliação bidirecional	61
5.2.1	Resultados	64
6	Considerações Finais	67

Capítulo 1

Introdução

O uso de técnicas de comunicação e controle para tornar o tráfego rodoviário seguro, eficiente e amigável, remete ao ano de 1939, no qual visionários tentaram prever de que forma seria o sistema de transporte no futuro [Hartenstein & Laberteaux, 2010]. Diversos projetos de pesquisa foram realizados desde então, contudo, a tecnologia vigente na época era uma limitação. Na década de 90, com o surgimento do Sistema de Posicionamento Global (GPS) e da rede local sem fio (WLAN), pesquisas no campo da comunicação inter-veicular ganharam um impulso considerável. Posteriormente, em 2004 surge a especificação 802.11p WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environment*) como proposta de internacionalização do padrão de comunicação inter-veicular. Além disso, a implantação comercial da última geração de tecnologia de comunicação celular tornou disponível uma infraestrutura de comunicação quase universal, o que propiciou o surgimento de novas tecnologias *wireless*.

A rede *ad-hoc* veicular (*Vehicular Ad hoc Network* - VANET) refere-se a uma promissora abordagem de ter veículos equipados com dispositivos embarcados, denominados de unidades de bordo (*Onboard Units* - OBUs), capazes de estabelecer comunicação *wireless* com outros veículos em seu alcance de transmissão [Campolo et al., 2015]. Através da integração de OBUs com a interface de rede sem fio, bem como diferentes tipos de sensores e receptores de GPS, cada veículo é capaz de recolher, processar e divulgar dados sobre si e seu ambiente. Em razão disto, a VANET constitui-se como uma importante fonte de dados para um promissor paradigma de sensoriamento remoto, conhecido como redes de sensores veiculares (do inglês, *vehicular sensor network* - VSN) [Lee et al., 2006; Wang et al., 2018]. Uma variedade de novos serviços é possível a partir do processamento de informações periodicamente coletadas por veículos [Bazzi et al., 2015], por exemplo: melhorar a segurança nas estradas, gerenciamento de tráfego, navegação inteligente, monitoramento de poluição, vigilância urbana e até mesmo

investigações forenses.

Os dados VSN (dados de sensoriamento gerados por veículos) podem ser processados localmente, no qual os dados são processados individualmente por cada veículo, ou remotamente. No processamento remoto, o veículo sensor irá reportar seus dados para um centro de coleta e processamento baseado na Internet. Muitas aplicações exigem um *upload* periódico dos dados, gerando um tráfego significativo entre os veículos e a estação-base. Está previsto que o tráfego mensal global de dados móveis será de 49 exabytes até 2021, no qual 20% do tráfego IP será originado por dispositivos móveis [Forecast, 2017]. Para a transmissão de dados, um veículo pode estabelecer comunicação com outros veículos, denotada como V2V (*Vehicle-to-Vehicle*), e com pontos fixos instalados ao longo das estradas. Tais infraestruturas são conhecidas como unidades de acostamento (*Roadside Units* - RSUs) e este segundo modo de comunicação é referido como V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*). Além de expandir a capacidade de comunicação dos veículos, as RSUs são capazes de conectar os veículos à Internet, que é fundamental para o *upload* dos dados VSN. Contudo, o alto custo de implantação das RSUs torna impraticável montar uma infraestrutura capaz de oferecer cobertura a todos os veículos do cenário. Em contrapartida, com a adesão da telefonia móvel e o crescente aumento no número de celulares com tecnologia de última geração, a rede 5G configura-se como um passo fundamental para a chamada Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT), que busca conectar diferentes tipos de dispositivos em uma única rede. Embora este cenário favoreça o surgimento de novas aplicações VANETs baseadas na comunicação celular, o rápido crescimento na demanda de tráfego exige meios de diminuir a sobrecarga na rede celular.

O foco deste trabalho concentra-se no *upload* periódico dos dados VSN para processamento remoto, no qual a aplicação de sensoriamento origina uma quantidade massiva de dados para serem transmitidos através da rede celular. Por isso, algumas estratégias tentaram reduzir o consumo da largura de banda e prevenir a sobrecarga da rede celular. Trabalhos anteriores [Stanica et al., 2013; Bazzi et al., 2015; Nunes et al., 2017] tentaram resolver este problema a partir do *offloading* de dados móveis [Rebecchi et al., 2015]. O *offloading* consistiu em descarregar dados, que seriam originalmente transmitidos no *uplink* celular, em uma rede complementar e de baixo custo, como Wi-Fi, IEEE 802.11p e comunicação D2D (do inglês, *device-to-device*) [Mao et al., 2016]. Além disso, redes de sensores sem fio (do inglês, *Wireless Sensor Networks* - WSNs) exploraram técnicas para combinar diferentes fontes de dados, em que determinados nós foram responsáveis pela agregação local dos dados de sensoriamento, eliminando a redundância e reduzindo o número de transmissões [Dhand & Tyagi, 2016].

1.1 Problema

Este trabalho explora informações topológicas da rede veicular para determinar quais veículos transmitirão os dados na rede celular. Os veículos vizinhos compartilharão seus dados com os veículos transmissores através de conexões inter-veiculares, realizando o *offloading* para a rede V2V. Em seguida, os veículos transmissores realizarão a compressão dos dados de sensoriamento, conforme algum modelo de agregação, e o *upload* na rede celular. O problema aqui abordado está relacionado à realização do *offloading* de dados de sensoriamento como forma de reduzir o custo de *upload* na rede celular. Com isso, vislumbramos responder a seguinte pergunta:

“Como selecionar um subconjunto de veículos para realizar o offloading dos dados de sensoriamento a um custo mínimo de transmissão na rede celular?”

Para responder a esta pergunta, as seguintes hipóteses foram formuladas:

- i) A agregação de dados de veículos separados por múltiplos saltos pode reduzir significativamente o custo de *upload* na rede celular.
- ii) A importância topológica de um veículo na rede, isto é, a sua relação de proximidade em termos de número de saltos, fornece uma informação válida acerca de sua utilidade como um possível agregador de dados VSN.

1.2 Objetivos

O problema aqui abordado foi modelado como uma instância do problema *minimum d-hop dominating set* [Amis et al., 2000], um problema da classe de complexidade \mathcal{NP} -Completo. Por isso, o objetivo geral deste trabalho é investigar e propor uma solução heurística para determinar o menor subconjunto de veículos transmissores para realizar o *offloading* de dados através da comunicação V2V. Deste modo, os seguintes objetivos específicos são definidos:

- Propor uma heurística construtiva baseada em uma medida de centralidade da teoria de redes complexas, conhecida como *closeness centrality* [Freeman, 1978], para selecionar os veículos responsáveis pelo *upload* dos dados. Deseja-se minimizar a quantidade de *uploaders* e reduzir o custo de transmissão.

- Investigar os efeitos da comunicação *multi-hop* no *offloading* de dados. Além de estudar o impacto de dimensionar o tamanho do *offloading*, o número de saltos também foi analisado para estimar a medida de centralidade.
- Realizar um estudo experimental em um cenário altamente realista. Este estudo considerou uma das maiores bases de dados disponíveis, no qual outras soluções também foram avaliadas e comparadas.

1.3 Principais contribuições

Este trabalho contribui para a pesquisa de *offloading* de dados de sensoriamento veicular em um ambiente de integração entre VANETs e redes celulares. Trabalhos na literatura tentaram resolver o problema a partir de soluções centralizadas e/ou em direção de *downlink*. Desta forma, as principais contribuições deste trabalho são:

- Estudo de como a comunicação *multi-hop* pode favorecer o *offloading* de dados de sensoriamento veicular. Os veículos mais relevantes para o *upload* dos dados foram determinados a partir do *closeness centrality*, em que diferentes configurações de saltos foram utilizadas;
- A heurística para determinar o subconjunto de transmissores opera de forma descentralizada em cada estação-base, colaborando para uma gestão descentralizada e melhorando a escalabilidade da rede;
- Nesta solução, os veículos podem operar de forma assíncrona, por isso cenários com alta densidade veicular não sofrem com sobrecarga de sincronização de *clock*;
- E, por fim, o algoritmo pode ser ajustado conforme as características do serviço de sensoriamento, desta forma, é possível realizar um sensoriamento com alta periodicidade de tempo ou aprimorar a solução da heurística ao custo de um tempo maior entre as transmissões de dados.

A metodologia utilizada avaliou duas condições de agregação de dados em um ambiente centralizado. Em seguida, ferramentas de simulação permitiram analisar o comportamento da solução diante de um ambiente descentralizado, em que cada estação celular executou uma instância do algoritmo. Os resultados apresentados neste trabalho revelaram que foi possível reduzir o custo de *upload* em mais de 100 kB/s em relação à abordagem tradicional (sem nenhum esquema de *offloading*), uma economia de quase 93% no custo de *upload*. Além disso, foi possível reduzir em até 92% o número de

veículos transmitindo no canal de *upload* celular. Quando comparados aos resultados de outra solução anteriormente proposta na literatura, o custo de *upload* significou uma redução de até 14.76 kB/s no melhor caso (uma melhoria de cerca de 32%).

Durante o mestrado foram produzidos três artigos, no qual os dois primeiros estão diretamente relacionados a esta dissertação:

- Moura, D. L. L.; Aquino, A. L. L.; Loureiro, A. A. F. (2019). Um mecanismo de offloading para redes de sensores veiculares. XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC).
- Moura, D. L. L.; Aquino, A. L. L.; Loureiro, A. A. F. (2019). *Towards data VSN offloading in VANETs integrated into the cellular network*. XXII ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiN). O artigo foi aceito para publicação.
- MOURA, D. L. L.; CABRAL, R. S. ; SALES, T. B. M. ; AQUINO, A. L. L. (2018). *An evolutionary algorithm for roadside unit deployment with betweenness centrality preprocessing*. *Future Generation Computer Systems - The International Journal of eScience*.

1.4 Organização do trabalho

O presente trabalho está estruturado em 6 capítulos. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, no qual destaca conceitos importantes para a compreensão deste trabalho, bem como uma revisão acerca de trabalhos relevantes na literatura que relacionam-se ao tema. Em seguida, o capítulo 3 discute a modelagem do problema e apresenta uma outra abordagem da literatura para resolvê-lo. O capítulo 4 descreve a heurística proposta neste trabalho para o problema. Em seguida, os experimentos realizados, assim como os resultados obtidos e discussões, são relatados no capítulo 5. Por fim, o capítulo 6 apresenta as considerações finais do trabalho e um vislumbre para possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos e Trabalhos Relacionados

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos básicos necessários para a compreensão deste trabalho. Apresentamos os conceitos fundamentais relacionados às redes de sensores veiculares, destacando suas principais características e exemplos de cenários de aplicação. Em seguida, ainda neste capítulo apresentamos a comunicação D2D como uma tecnologia importante para o *offloading* eficiente de dados. Ao final, dedicamos uma seção resumindo alguns trabalhos importantes e relacionados ao tema abordado neste trabalho.

2.1 Redes de Sensores Veiculares

O sensoriamento possibilita a capacidade de medir, inferir e compreender indicadores ambientais. Os nós sensores “inteligentes” já estão presentes em diferentes domínios de aplicação, como gestão de desastres, reconhecimento de campos de combate, proteção de fronteiras, vigilância e entre tantos outros exemplos. A IoT é a próxima revolução tecnológica a transformar a indústria e a Internet, em que funções de sensoriamento e atuação se integrarão perfeitamente e novas possibilidades surgirão pelo acesso de novas fontes de informação [Gubbi et al., 2013].

Diante disso, a indústria automotiva tem aumentado o seu interesse por sensores automotivos e sua importância para aplicações ITS. No final de 2017, cada veículo tinha cerca de 60 a 100 sensores embarcados, estima-se que este número chegará a 200 sensores até o ano de 2020 [Journal, 2017]. O aumento no número de sensores deve-se em razão de seus benefícios comprovados, como redução no número de acidentes, melhora no desempenho e na direção do veículo, serviços de diagnóstico e monitoramento

do ambiente [Abdelhamid et al., 2014]. As redes de sensores veiculares têm sido amplamente estudadas e provaram ser muito úteis para o monitoramento do ambiente urbano, provendo serviços de informações, gestão eficiente do tráfego e planejamento urbano à longo prazo. A Figura 2.1 apresenta alguns exemplos de sensores que constituem o aparato de sensoriamento veicular. Dado o seu potencial, a VSN configura-se como uma tecnologia fundamental para a consolidação das cidades inteligentes (chamadas de *smartcities*).

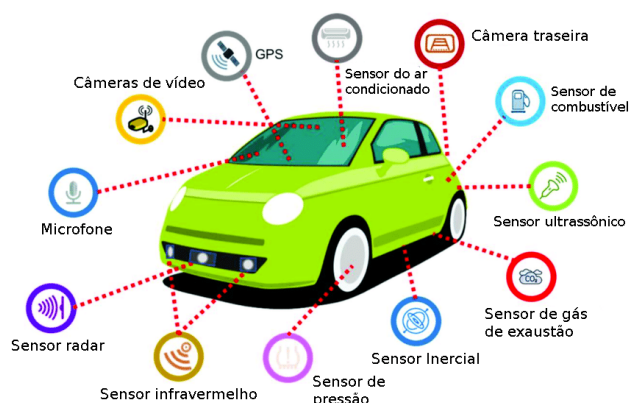


Figura 2.1. Exemplos de sensores automobilísticos.

Os veículos podem atuar como sensores móveis, coletando e disseminando dados através de conexões V2V e V2I. Desta forma é possível fazer o sensoriamento pró-ativo do ambiente urbano por meio de um serviço de monitoramento contínuo. A rede também é capaz de trabalhar em modo reativo, no qual a transmissão de dados ocorrerá de forma intermitente. Neste caso, o veículo sensor irá reagir com o ambiente monitorado e reportar a ocorrência de um evento de interesse. Basicamente, a rede de sensores veiculares é constituída de três componentes principais: veículos com capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação; estação-base que irá receber os dados de sensoriamento; ambiente a ser monitorado.

A Figura 2.2 ilustra um cenário de rede de sensores veiculares. Assim, como na rede de sensores sem fio, alguns veículos sensores podem desempenhar o papel de *gateway*, coletando dados de veículos vizinhos através de comunicações de curto alcance e transmitindo estes dados para a estação-base. Os dados recebidos na estação-base serão transmitidos para um centro de coleta, para serem processados remotamente e disponibilizados na forma de serviços baseados na Internet. A título de exemplo, o Centro de Informação de Tráfego de Xangai (*Shanghai Traffic Information Center* - STIC) utiliza dados provenientes de sensores em táxis e ônibus para monitorar as condições do tráfego nas estradas [Du et al., 2015].

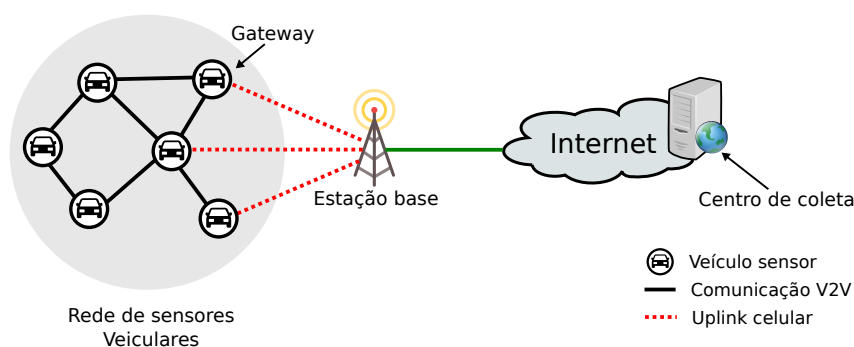


Figura 2.2. Rede de sensores veiculares.

Outros trabalhos também exploraram o potencial de sensoriamento móvel da rede de sensores veiculares. Por exemplo, os automóveis podem operar complementando os sistemas de vigilância e investigação forense através de dados detectados pelas câmeras dos veículos e processados autonomamente, atuando no reconhecimento de placas de veículos. A partir desta cooperação distribuída entre veículos sensores, mensagens podem ser encaminhadas a fim de permitir que agentes de polícia rastreiem os movimentos de carros específicos [Lee et al., 2009]. Demais trabalhos incluem o monitoramento de dióxido de carbono em áreas de interesse [Hu et al., 2011], monitoramento de poluição sonora [Radu et al., 2012], detecção de acidentes nas estradas [Khaliq et al., 2017], operações de resgate [Kumar et al., 2015] e entre tantos outros cenários de aplicações como descritos por Wang et al. [2018].

As redes de sensores veiculares compartilham algumas características em comum com as redes de sensores sem fio, ainda assim é possível mencionar algumas diferenças notáveis [Reddy et al., 2012]:

- **Maior capacidade de sensoriamento:** Diferente de uma tradicional rede de sensores sem fio, os veículos não são afetados por restrições de energia e dispõem de mais recursos de armazenamento e processamento;
- **Grande quantidade de dados:** Como bateria não é um fator crítico, um veículo pode ser equipado por diferentes dispositivos de sensoriamento, como detectores químicos, câmeras de vídeo e sensores de vibração/acústico [Lee et al., 2008];
- **Topologia dinâmica:** O padrão de mobilidade altamente dinâmico dos veículos cria uma série de desafios de comunicação, no qual a topologia da rede muda constantemente;
- **Conectividade em grande escala:** Uma rede veicular abrange uma grande área geográfica, como uma cidade. Dependendo das condições de tráfego, a rede

pode conter uma alta ou baixa densidade de veículos.

Este trabalho concentra-se no sensoriamento pró-ativo com processamento remoto, quando uma quantidade massiva de dados é originada pelo serviço de sensoriamento e transmitida na rede celular. Em razão disso, estratégias são requisitadas como forma de favorecer a economia da largura de banda e o gerenciamento escalável da rede. Agregação de dados é uma técnica amplamente empregada em redes de sensores sem fio [Stanica et al., 2013], ela possibilita que os nós sensores executem funções de mesclagem, atualização ou exclusão de alguns dados de sensoriamento, que podem estar duplicados, expirados ou serem idênticos. Desta forma, é possível reduzir o tráfego no espectro celular aproveitando-se da natureza *ad-hoc* das comunicações VANET. A comunicação V2V pode ser utilizada para migrar parte do tráfego para conexões de baixo custo, em que veículos atuando como *gateways* podem fazer a coleta, agregação e transmissão de dados de veículos sensores.

A comunicação D2D aparece na literatura como uma tecnologia complementar à próxima geração de sistema de comunicação [Sun et al., 2014]. Um exemplo de uso do potencial da comunicação D2D está na comunicação V2V, que devido as similaridades entre os requisitos dos serviços V2V e os benefícios da comunicação D2D, enlaces D2D podem ser utilizados para compartilhar informações rapidamente entre veículos vizinhos e fazer o *offloading* eficiente de dados [Kar & Sanyal, 2018].

2.2 Comunicação *Device-to-Device* (D2D)

A crescente proliferação de dispositivos inteligentes e a introdução de novas aplicações multimídia têm levado a um aumento sem precedentes nas demandas dos usuários por banda larga móvel, criando uma carga significativa sobre as redes celulares atuais. A Quinta Geração (5G) constitui-se como a próxima grande evolução nas comunicações sem fio. Neste novo cenário, as redes 5G irão fornecer os meios necessários para alavancar a comunicação já existente e propiciar o surgimento de novas aplicações e serviços. Não somente isso, as redes 5G prometem uma melhor eficiência espectral, baixa latência e confiabilidade [Kombate & Wanglina, 2017].

De acordo com Agiwal et al. [2016], estes são alguns dos principais requisitos dos sistemas 5G de próxima geração:

- Alta taxa de transmissão de dados (tipicamente na ordem de Gbps);
- Redução massiva no atraso de comunicação, as redes 5G ambicionam uma latência de 1 milissegundo;

- Aumento múltiplo na capacidade da estação-base;
- Melhoria significativa na qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS) percebida pelos usuários quando comparada às atuais redes 4G;
- Redução no consumo de energia.

Um das tecnologias fundamentais para que o 5G seja capaz de corresponder a alguns dos requisitos identificados acima é a comunicação D2D. A Figura 2.3(a) ilustra um sistema celular convencional. Os dispositivos não podem estabelecer comunicação direta com outros dispositivos no espectro celular e a comunicação ocorre através da estação-base. Em contrapartida, como é possível ver nas Figuras 2.3(b) e 2.3(c), a comunicação D2D permite a comunicação direta entre dispositivos fisicamente próximos, que pode ocorrer sem o envolvimento da estação-base ou com o envolvimento limitado.

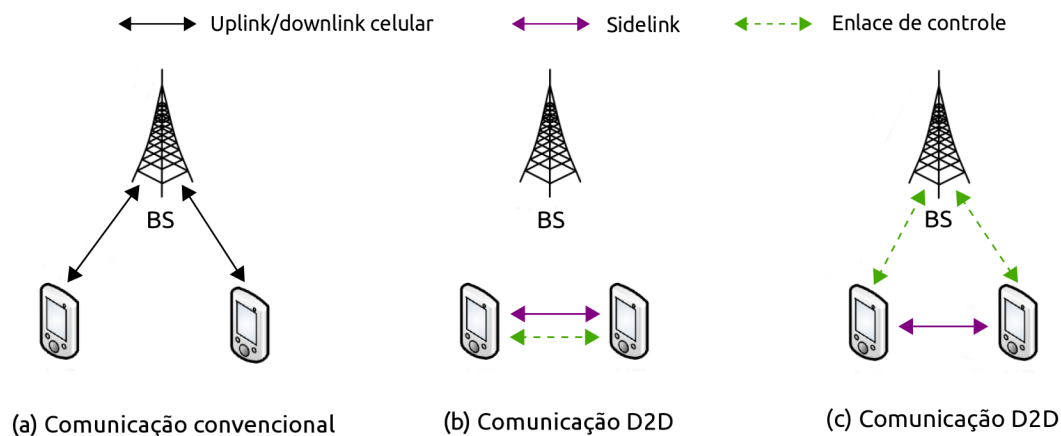


Figura 2.3. Ilustração da comunicação D2D.

A comunicação baseada em proximidade, além de favorecer a reutilização espacial e de frequência, permite transmissões com taxas de bits extremamente altas, baixa latência e baixo consumo de energia. Os cenários mais comuns em que a comunicação D2D pode ser aplicada eficazmente são serviços de dados locais, compartilhamento de informações, *offloading* de dados e computação, extensão da cobertura celular e comunicação *Machine-to-machine* (M2M) [Kar & Sanyal, 2018].

Os autores Asadi et al. [2014] elaboraram uma taxonomia para as comunicações D2D, que podem ser categorizadas conforme o espectro adotado na transmissão. Na categoria *D2D inband* temos que a comunicação opera nas faixas de frequências do enlace celular, em que as transmissões D2D e celular podem compartilhar recursos (*inband underlay*) ou utilizar recursos dedicados (*inband overlay*). Por outro lado, na

categoria *D2D outband* as transmissões utilizam faixas de frequências não-licenciadas, ou seja fora do espectro celular, e por isso necessitam de uma interface de comunicação adicional. Conforme mostra a Tabela 2.1, diferentes tecnologias de acesso sem fio permitem a comunicação D2D [Haus et al., 2017; Kar & Sanyal, 2018]. A motivação por trás do *D2D outband* está em tentar eliminar as interferências entre os enlaces D2D e celular, contudo, operar diferentes tecnologias de rádio exige coordenação.

Tabela 2.1. Tecnologias de acesso para comunicação D2D.

Tecnologia	Frequências	Taxa de bits	Alcance máximo
<i>Bluetooth 4.0</i>	2.4 GHz	24 Mbps	100 m
<i>Bluetooth 5.0</i>	2.4 GHz	50 Mbps	240 m
<i>LTE Direct</i>	Espectro licenciado ¹	13.5 Mbps	500 m
<i>Wi-Fi Direct</i>	2.4 GHz; 5 GHz	250 Mbps	200 m
<i>ZigBee</i>	868 MHz; 915 MHz; 2.4 GHz	250 Kbps	100 m

De acordo com o modelo de negócios, a operadora celular pode ter diferentes níveis de controle na comunicação D2D. A operadora pode exercer controle total, parcial ou não exercer controle algum sobre a alocação de recursos entre os dispositivos [Tehrani et al., 2014]. Com base nisso, as comunicação D2D podem ser classificadas em quatro tipos:

- **Retransmissão por dispositivo com estabelecimento de enlace controlado pela operadora:** Dispositivos na borda da célula ou em uma área de pouca cobertura podem se comunicar com a estação-base a partir de outros dispositivos que irão atuar como retransmissores. A operadora irá se comunicar com os dispositivos de retransmissão para estabelecer um enlace de controle.
- **Comunicação D2D direta com estabelecimento de enlace controlado pelo operador:** Os dispositivos de origem e destino falam e trocam dados entre si sem a necessidade de um estação-base, mas são auxiliados pela operadora para o estabelecimento do enlace.
- **Dispositivo de retransmissão com estabelecimento de enlace controlado por dispositivo:** Os dispositivos de origem e destino são responsáveis pela coordenação da comunicação e utilizam dispositivos de retransmissão entre si.

¹O *LTE Direct* opera no espectro celular, em que diferentes faixas são usadas ao redor do mundo.

- **Comunicação D2D direta com estabelecimento de enlace controlado por dispositivo:** Os dispositivos de origem e destino podem se comunicar diretamente e não utilizam nenhum enlace de controle da operadora.

Um serviço fundamental para que as comunicações 5G D2D possam operar é a descoberta de vizinhos, que consiste em detectar dispositivos próximos habilitados para a comunicação D2D. Este processo deve ser um método eficiente para que as conexões sejam estabelecidas rapidamente, porém a mobilidade dos dispositivos impõe desafios, como as mudanças constantes nas estruturas de vizinhança [Vannithamby & Talwar, 2017]. Essencialmente, é possível distinguir dois tipos de serviços de descoberta [Xenakis et al., 2016]:

- **Assistida pela rede:** O serviço de descoberta é coordenado pela estação-base e os recursos são gerenciados pelo sistema central. A descoberta assistida pela rede estima a proximidade entre dispositivos D2D a partir do conhecimento existente do *layout* da rede e de informações adicionais, como a posição relativa dos dispositivos em relação às suas BS associadas. Neste serviço, os dispositivos são monitorados pela rede, por isso necessitam estar dentro da área de cobertura de alguma estação-base.
- **Descoberta direta:** A descoberta é feita autonomamente pelos dispositivos através de sinais (chamados de *beacons*) para anunciar a sua presença. Este serviço requer a transmissão/recepção periódica de sinais de descoberta via *broadcast* e pode ocorrer mesmo quando os dispositivos estão fora da área de cobertura da estação. Serviços baseados em descoberta direta sofrem com *overhead* de sinalização, maior interferência entre os dispositivos e aumento no consumo de bateria.

Como as comunicações D2D ainda não se encontram consolidadas, este é um tema que ainda continua sendo bastante discutido na literatura. Para um conhecimento mais profundo destes serviços, os trabalhos dos autores Ansari et al. [2018] e Gandotra & Jha [2016] reúnem algumas técnicas propostas para a descoberta de dispositivos D2D.

2.3 Trabalhos Relacionados

A largura de banda nas estações-base é limitada, em razão disto, um grande número de transmissões de pacotes na rede celular pode ser monetariamente caro e ineficiente para atender as demandas dos usuários móveis [Lin et al., 2018]. A partir de uma rede complementar, dispositivos podem se comunicar com outros através de conexões

ad hoc, utilizando comunicações como *D2D*, *Bluetooth*, *WiFi* ou *802.11p*. As conexões são comumente de alta capacidade e podem ser exploradas por dispositivos móveis para o compartilhamento de conteúdo cujo interesse é de caráter comum.

Muitos trabalhos na literatura consideraram o descarregamento de dados móveis na direção de *downlink*, no qual as estações transmitiam o conteúdo para um veículo e este disseminava para os demais veículos a partir de transmissões *broadcast* [Mezghani et al., 2016; Salvo et al., 2016; Mao et al., 2016; Dua et al., 2017]. Em Mao et al. [2016], por exemplo, os autores buscaram expandir capacidade de comunicação utilizando D2D e WiFi para integrar diversos dispositivos e formar uma rede heterogênea.

Há ainda trabalhos que concentraram-se em descarregar os dados em uma direção de *uplink*, quando uma grande quantidade de informações deve ser disponibilizada na Internet e recebida por um servidor remoto para processamento e análise. Em Lee & Lee [2013], os autores consideram informações históricas da mobilidade dos veículos para prever WLANs disponíveis e realizar o descarregamento dos dados.

A teoria dos grafos também foi explorada como forma de capturar propriedades estruturais da rede e determinar como será realizado o *offloading* [Kolios et al., 2013]. Os autores Yuan et al. [2016] usaram grafos para modelar a probabilidade de conexões entre veículos. Os resultados encontrados mostraram que foi possível descarregar mais de 70% dos dados em um cenário com restrições de tempo e espaço.

Em seu trabalho, os autores Bazzi et al. [2015] buscaram resolver o problema de sobrecarga na rede celular utilizando RSUs para coletar e realizar o *upload* dos dados de sensoriamento. Embora os resultados obtidos tenham mostrado uma redução completa no acesso à rede celular em cenários de alta densidade veicular, a estratégia proposta exigia um algoritmo para determinar como instalar as RSUs no cenário e um algoritmo para rotear o pacote do veículo de origem até a RSU.

Trabalhos como Li et al. [2014, 2015]; Zhu et al. [2017]; Nunes et al. [2017] exploraram comunicações oportunistas no *offloading* de dados tolerantes a atrasos. Certos serviços baseados em VSN exigem um *upload* em tempo quase real, sendo assim, uma desvantagem desta abordagem é que o descarregamento de conteúdo acarretará em um atraso maior em comparação com a transmissão direta usando redes celulares. Os autores Lin et al. [2018] apresentaram uma solução chamada CUBI para descarregar os dados da rede 4G para uma rede WiFi. A solução combina o indicador de qualidade de canal (CQI) para determinar qual rede detém a melhor taxa de entrega e utiliza informações procedentes das estações-base para prevenir sobrecarga na infraestrutura celular.

Este trabalho explora uma medida de centralidade para selecionar veículos responsáveis por coletar dados de seus vizinhos e realizar o *upload* na estação-base para

que possam ser transmitidos para análise e processamento remoto. A solução proposta pode atuar de forma descentralizada e ser ajustada de modo a tornar o esquema de *offloading* escalável para operar e realizar o sensoriamento em tempo quase real. Deste modo, os resultados deste trabalho foram avaliados comparando com os resultados encontrados por Stanica et al. [2013], que utilizou o mesmo cenário e também buscou soluções distribuídas.

Os autores Stanica et al. [2013] propuseram três soluções distribuídas para lidarem com o problema de selecionar os nós responsáveis pelo *upload* dos dados de sensoriamento: algoritmo baseado no grau dos nós da rede (DB), algoritmo baseado no grau com um mecanismo de confirmação (DB-C) e um algoritmo baseado em reserva de tempo (RB). Dentre os três algoritmos, o RB obteve os melhores resultados quando a cobertura foi uma exigência. Os resultados obtidos mostraram uma redução de até 95% no acesso a rede celular para o cenário avaliado, contudo, a necessidade de sincronização dificulta uma possível aplicação prática da solução.

Como será visto mais adiante, a diferença entre estas abordagens e a solução proposta neste trabalho é que nossa solução permite reduzir o diâmetro do cálculo do algoritmo. Deste modo, estruturas de vizinhança de diferentes tamanhos podem ser utilizadas para estimar as medidas de centralidade dos veículos. Este comportamento possibilita ajustar a solução conforme as condições de tráfego veicular e os requisitos da aplicação de sensoriamento. Além disso, a maioria dos trabalhos abordam o *offloading* com o propósito de auxiliar no processo de disseminação de dados, em que os dados serão transmitidos da estação-base para os veículos. Por outro lado, este trabalho aborda um cenário em que uma grande quantidade de dados deve ser periodicamente transmitida nas estações celulares. Trabalhos como aquele proposto por Bazzi et al. [2015] requerem a implantação de uma infraestrutura complementar à rede celular, enquanto que o algoritmo RB, proposto por Stanica et al. [2013], exige a sincronização das transmissões dos veículos sensores. A solução proposta neste trabalho não necessita de sincronização e o *offloading* utiliza somente conexões inter-veiculares, não necessitando de uma infraestrutura além daquela prontamente disponível nas operadoras de telefonia móvel.

Capítulo 3

Determinação de elementos de *offloading*

Conforme visto anteriormente, estratégias de *offloading* e redução de dados podem ser aplicadas como forma de reduzir o custo de *upload*. Porém, determinar quais veículos serão responsáveis pela agregação e *upload* é uma tarefa desafiadora. Este capítulo discute alguns aspectos do problema e apresenta uma solução da literatura que buscou solucionar o problema de forma descentralizada. Em seguida, a seção 3.2 apresenta a modelagem adotada para o problema, conhecido como *minimum d-hop dominating set*, e a sua definição formal como um problema de otimização.

3.1 Conjunto dominante

O problema abordado neste trabalho consiste em determinar um subconjunto de elementos de *offloading*. Em seu trabalho, os autores Stanica et al. [2013] mostraram que a solução ótima deste problema é equivalente a um problema de dominação em grafos. O problema de dominação foi amplamente estudado na literatura e possui diversas aplicações em redes de comunicações [Yu et al., 2013]. Estas aplicações levaram ao surgimento de variantes do problema original. O conjunto dominante em um grafo G consiste de um subconjunto $S \subseteq V(G)$, no qual cada veículo em $V(G)$ não presente em S é adjacente a pelo menos um veículo em S . O conjunto dominante mínimo (do inglês, *Minimum Dominating Set* - MDS) consiste em encontrar o menor conjunto dominante S em um grafo. Exemplos de conjuntos dominantes podem ser vistos na Figura 3.1. A Figura 3.1(b) contém o menor conjunto dominante do grafo, constituído pelos vértices 1, 4 e 6. Trata-se, portanto, de um MDS. Note que outros subconjuntos de vértices também constituem-se como soluções válidas para o MDS, como o subconjunto

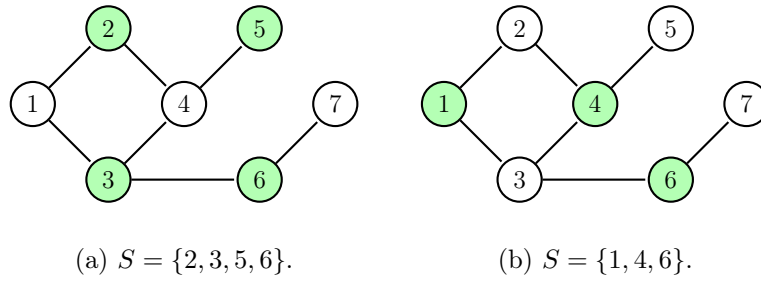


Figura 3.1. Exemplos de conjuntos dominantes.

$S = \{3, 4, 7\}$.

Os autores Stanica et al. [2013] propuseram três algoritmos distribuídos e utilizaram comunicações dedicadas de curto alcance (do inglês, *Dedicated short-range communications* - DSRC) no *offloading* dos dados de sensoriamento. Ademais, os autores definiram o **ganho do sistema** como a fração dos veículos que não transmitiram na rede celular quando os dados VSN foram descarregados através de conexões V2V. Após um estudo experimental e análises dos resultados, o algoritmo baseado em reserva de tempo, referido como RB, obteve os melhores resultados em termos de ganho do sistema. O RB exige a sincronização de transmissões e segue três passos:

1. Cada veículo irá escolher aleatoriamente um intervalo de tempo dentre os intervalos disponíveis (N_s) e entrará em estado de **contenção**;
2. Um veículo em estado de contenção irá aguardar por seu intervalo de tempo escolhido. Este veículo irá transmitir uma mensagem de reserva e entrará em estado de **dominador**;
3. Se um veículo em estado de contenção receber uma mensagem de reserva de algum vizinho, este veículo irá cancelar seu estado de contenção e entrará em estado de **dominado**.

Os veículos em estado de dominador constituem o subconjunto de veículos que irão coletar dados de vizinhos para agregação e posterior *upload* na rede celular. O RB é uma abordagem para o problema do MDS, mas ele não garante a solução ótima. Conforme mencionado na seção 2.3, é extremamente difícil, em uma implementação real, garantir que cada veículo irá transmitir em um intervalo de tempo diferente. Além disso, se um veículo recebeu mais de uma mensagem de reserva transmitida em um mesmo intervalo de tempo, o veículo poderá não ser capaz de decodificar a mensagem em razão da colisão.

3.2 *Minimum d-hop dominating set problem*

O problema *d-hop dominating set* foi introduzido na literatura no contexto de redes sem fio, em que um subconjunto de nós, chamados de *cluster-heads* ou *gateways*, são selecionados para constituírem uma infraestrutura de *backbone* [Banerjee et al., 2014]. Este problema surgiu como uma variação do conjunto dominante mínimo e estendeu o conceito de dominância, possibilitando a exploração da comunicação *multi-hop*.

Seja o grafo G um par ordenado constituído pelos conjuntos V e E , no qual o conjunto $V = V(G) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ denota os veículos transitando no cenário e $E = E(G) = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ denota o conjunto de arestas. Dizemos que $v_i, v_j \in V$ são adjacentes se existir $e = \{v_1, v_2\} \in E$, ou seja, quando v_i e v_j estiverem no mesmo raio de transmissão. Isto significa que v_i é capaz de agregar dados de v_j através de transmissões V2V, o inverso também é válido. Neste trabalho foi considerado que todos os veículos possuem a mesma potência de transmissão, sendo assim, o grafo G possui apenas arestas não-direcionadas.

Além disso, se v_i e v_j forem adjacentes, dizemos ainda que v_i e v_j são vizinhos. A **vizinhança** $N_G(v_i) = \{v_j \mid \{v_i, v_j\} \in E\}$ consiste do conjunto de todos os vizinhos de v_i . A **distância** $dist(v_i, v_j)$ entre um veículo v_i e v_j é dada pelo comprimento do menor caminho entre v_i e v_j . O comprimento do caminho entre dois vértices é computado tomando o número de saltos, isto é, a quantidade de arestas separando os dois vértices. A vizinhança também pode ser definida em razão do número de saltos:

$$N_G^d(v_i) = \{v_j \mid dist(v_i, v_j) \leq d\} \quad (3.1)$$

A vizinhança $N_G^d(v_i)$ consiste de todos os vértices $v_j \in V(G)$ cuja distância $dist(v_i, v_j)$ é de no máximo d saltos. A descoberta da vizinhança de um nó é um processo crucial para a comunicação *multi-hop*. O interesse deste trabalho é encontrar um subconjunto de veículos para coletar dados de seus vizinhos, agregá-los e transmiti-los para a estação-base.

Deste modo, o problema de decisão pode ser definido como:

Definição 3.2.1. (Problema) *Dado um grafo $G = (V, E)$ e os inteiros positivos $d \geq 1$ e $K \leq |V|$, existe um d -hop dominating set de tamanho menor ou igual a K ? Isto é, existe um subconjunto $S \subseteq V$ de vértices com $|S| \leq K$, tal que para todo $v_i \in (V - S)$ há ao menos um vértice $v_j \in S$ no qual $dist(v_i, v_j) \leq d$?*

Neste trabalho, objetiva-se minimizar o tamanho do *d-hop dominating set*, a sua contraparte como um problema de otimização trata-se de um problema de natureza \mathcal{NP} -difícil [Amis et al., 2000]:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^N y_i \quad (3.2)$$

Sujeito a:

$$\sum_{v_j \in N_G^d(v_i)} y_j + y_i \geq 1 \quad i = 1, 2, \dots, N; \forall y \quad (3.3)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad (3.4)$$

Considere $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ como conjunto de variáveis associadas ao conjunto de veículos V , se o elemento $y_i \in Y$ assumir o valor 1, então $v_i \in V$ estará contido em S . A Equação 3.2 minimiza o tamanho do conjunto dominante, ou seja a cardinalidade do conjunto S . A Equação 3.3 impõe uma restrição que estabelece que para todo veículo v_i , ao menos um veículo em $\{v_i\} \cup N_G^d(v_i)$ deverá estar contido em S . Desta forma, é assegurado que S será um conjunto dominante de tamanho mínimo no qual cada nó em $V(G)$ estará distante no máximo d saltos de pelo menos um vértice em S .

O d -hop dominating set é ilustrado nos exemplos da Figura 3.2. Os vértices destacados na cor verde compõe o conjunto dominante S a uma distância de $d = 2$ saltos. As Figuras 3.2(a) e 3.2(b) mostram exemplos de dominações válidas. No primeiro caso, embora a solução satisfaça as restrições do problema, ela não constitui um *minimum 2-hop dominating set*. Em contrapartida, a solução da Figura 3.2(b) apresenta o subconjunto $S = \{3\}$ de menor tamanho, ou seja, um *minimum 2-hop dominating set*. Na Figura 3.2(c), como o vértice 7 não foi incluído em S e nem foi dominado, a solução não apresenta uma solução válida para o *2-hop dominating set*.

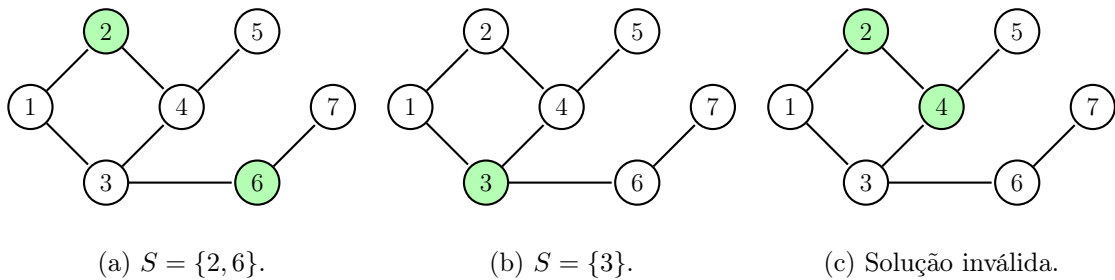


Figura 3.2. Exemplos de soluções válidas e não-válidas do problema.

O problema neste trabalho foi modelado como uma instância do d -hop dominating set e em virtude de sua classe de complexidade, não existe, a priori (a não ser que

$\mathcal{P} = \mathcal{NP}$), um algoritmo capaz de resolvê-lo eficientemente em tempo polinomial. Deste modo, uma heurística construtiva foi proposta baseando-se em uma medida de centralidade da teoria de redes complexas com o objetivo de encontrar uma solução aproximada para o problema. Os veículos inseridos no conjunto S irão transmitir os dados de seus vizinhos no canal de *uplink* da estação-base, por isso é de interesse minimizar o tamanho de S ao passo que queremos garantir a completa cobertura dos veículos na rede.

Capítulo 4

Multi-hop baseado em closeness centrality

Este capítulo apresenta a solução, chamada multi-hop baseado em closeness centrality (MHC), para realizar o *offloading* de dados. O MHC trata-se de um algoritmo guloso que utiliza a centralidade dos veículos na rede para determinar quais veículos irão atuar como *gateway*. A medida de centralidade foi explorada de modo a capturar a relação de proximidade de um veículo com os demais no que se refere a uma vizinhança definida a priori. Desta forma, a centralidade fornece uma medida para quantificar a relevância de um veículo como possível agregador de dados de veículos vizinhos.

4.1 Medida de centralidade

As redes derivadas de dados reais apresentam estruturas e características que podem ser estudadas através de modelos e métricas. As medidas de centralidade são de grande importância para análise e compreensão dos papéis desempenhados por cada nó na rede, por isso diversas medidas de centralidade foram propostas na literatura [Costa et al., 2007]. Embora o seu estudo tenha se originado da análise em redes sociais, estas propriedades foram amplamente empregadas em diferentes contextos, como redes de citações, redes de computadores e em redes biológicas [Newman, 2005]. O *closeness centrality*, também conhecido como centralidade de proximidade, é uma medida útil para identificar quais veículos estão mais próximos dos demais. Uma maior medida de centralidade sugere que um veículo encontra-se em uma posição na rede onde veículos vizinhos poderão realizar o *offloading* de dados VSN com um menor número de saltos.

Conforme dito no capítulo 3, a distância entre dois vértices v_i e v_j em um grafo G é dada pelo comprimento do menor caminho entre eles. O distanciamento (*farness*)

de um vértice é dado pela soma de suas distâncias para os demais vértices na rede. Quanto maior o distanciamento de um vértice, maior será a sua distância em relação aos outros vértices. Tomando o inverso do distanciamento é possível obter a relação de proximidade. Por isso, o *closeness centrality* (C) do vértice v_i é uma medida de centralidade definida conforme mostra a Equação 4.1.

$$C(v_i) = \frac{1}{\sum_{v_i \neq v_j} dist(v_i, v_j)} \quad (4.1)$$

Onde $dist(v_i, v_j)$ é a distância entre os vértice v_i e v_j . O cálculo dos caminhos mínimos pode ser realizado em tempo linear ao tamanho da lista de adjacência, executando uma **busca em largura** com custo $\mathcal{O}(V + E)$, no qual V é a quantidade de vértices e E é a quantidade de arestas do grafo. O processo é repetido em cada vértice da rede, assim, o custo do *closeness centrality* em um grafo conexo pode ser expresso como $\mathcal{O}(V^2 + VE)$. Entretanto, o interesse principal está na importância relativa do vértice e não no valor numérico da centralidade. Assim, há ainda um custo $\mathcal{O}(V \log V)$ necessário para ordenar os vértices de acordo com suas medidas de centralidade, resultando em um custo final $\mathcal{O}(V^2 + VE + V \log V)$ em grafos conexos com caminhos de custos uniformes.

Embora o algoritmo possa ser facilmente paralelizado, executando o processamento de cada vértice em *threads* diferentes, é altamente dispendioso a sua execução em redes de grande escala, formadas por milhares ou milhões de nós. Por isso, é conveniente utilizar uma estimativa para o *closeness centrality*. No *closeness centrality* estimado (C_k) apenas distâncias menores que $k \geq 1$ são admitidas:

$$C_k(v_i) = \frac{1}{\sum_{v_i \neq v_j} dist(v_i, v_j)}; \quad \forall dist(v_i, v_j) \leq k \quad (4.2)$$

O parâmetro k estabelece uma distância limite para a busca, que irá encerrar após atingir o k -ésimo nível. Deste modo, serão considerados no cálculo da centralidade do vértice v_i apenas os vértices separados por no máximo k saltos de distância. É possível reduzir a ordem de complexidade do *closeness centrality* quando valores pequenos de k são utilizados. Além de reduzir o custo de execução do algoritmo, cuja complexidade será limitada aos vértices dentro da distância limite, o *overhead* na rede também será reduzido, pois menos mensagens serão disseminadas para a descoberta dos nós.

O Algoritmo 1 apresenta o cálculo do *closeness centrality* estimado por k saltos de um veículo v_r . O algoritmo recebe o grafo G como parâmetro de entrada, além do veículo raiz v_r e a distância limite k . Ao final, o algoritmo irá retornar C_k como

a medida de centralidade do veículo v_r . A ideia básica do algoritmo é descobrir os caminhos mínimos de tamanho até k originados a partir da raiz e que levam aos outros vértices da rede. Um vértice pode assumir as cores BRANCO, CINZA ou PRETO para indicar o estado do processamento da busca.

Algoritmo 1 Cálculo de centralidade (C_k)

Entrada G, v_r, k
Saída C_k

```

1:  $C_k \leftarrow 0$ 
2:  $cor[i] \leftarrow$  BRANCO,  $\forall v_i \in V(G) - \{v_r\}$ 
3:  $cor[r] \leftarrow$  CINZA
4:  $Q \leftarrow \emptyset$ 
5:  $insere(Q, v_r)$ 
6: enquanto  $Q \neq \emptyset$  faça
7:    $v_i \leftarrow$   $remove(Q)$ 
8:   para cada  $v_j \in N_G(v_i)$  faça
9:     se  $cor[j] =$  BRANCO e  $dist(v_r, v_j) \leq k$  então
10:        $v_j \leftarrow$  CINZA
11:        $C_k \leftarrow C_k + dist(v_r, v_j)$ 
12:        $insere(Q, v_j)$ 
13:    $cor[v_i] \leftarrow$  PRETO
14:  $C_k \leftarrow 1/C_k$ 

```

Inicialmente, a variável C_k será atribuída como 0 e todos os vértices em G ainda não descobertos serão pintados de BRANCO (Linhas 1 e 2). Uma estrutura de dados do tipo fila será utilizada para gerenciar a ordem de chegada dos vértices. O vértice v_r será pintado de CINZA e enfileirado na fila Q . Em seguida, os vértices adicionados na fila serão iterativamente examinados (Linhas 6-13). O vértice v_i no início da fila será então removido de Q e cada vizinho v_j será examinado. As Linhas 9-12 analisam os vértices adjacentes a v_i , verificando se eles ainda não foram descobertos e se estão em uma distância de até k saltos em relação à raiz. Caso a condição seja válida, o vértice recém-descoberto v_j será pintado de CINZA e adicionado na fila. A variável C_k será incrementada com $dist(v_r, v_j)$. O vértice v_i será pintado de PRETO quando todos os seus vizinhos forem explorados. O laço encerra sua execução quando a fila estiver vazia. Ao final, o valor de C_k será a divisão de 1 pela soma de todas as distâncias obtidas.

Como exemplo, a Figura 4.1 apresenta o grafo G constituído de 10 vértices e 13 arestas. O *closeness centrality* será calculado para o vértice 4 de G com uma distância limite de $k = 3$. A Figura 4.1(a) mostra os vértices utilizados no cálculo com um destaque em vermelho. O *closeness centrality* do vértice 4 é estimado tomando os

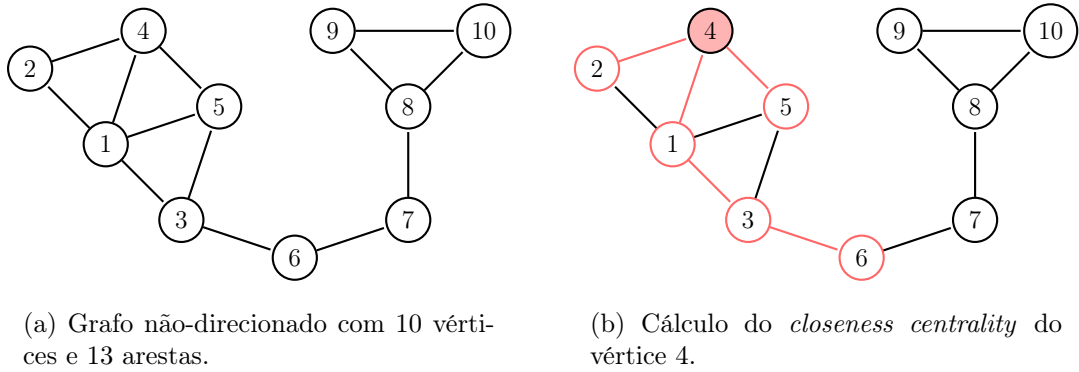


Figura 4.1. Exemplo de cálculo do *closeness centrality* estimado por $k = 3$.

vértices 1, 2, 3, 5 e 6. Assim, $C_3(4)$ será igual a $\frac{1}{1+1+1+2+3} = 0.125$. As medidas de centralidade de todos os vértices do grafo são mostrados na Tabela 4.1. Na segunda coluna estão os vértices utilizados na estimativa do *closeness centrality* C_3 , na terceira coluna estão os valores reais do *closeness centrality* (C) de cada vértice, que equivale ao C_6 . O cálculo do valor real implica em computar as distâncias de todos os vértices na rede, processo repetido para cada vértice, gerando um alto custo para percorrer todas as arestas. Por outro lado, dimensionar o cálculo permite obter valores aproximados para a centralidade a um custo de execução bem menor.

Tabela 4.1. Valores aproximados para a medida de centralidade.

Vértice (v_i)	Vizinhança (N_G^3)	Aproximado (C_3)	Real (C)
1	{2, 3, 4, 5, 6, 7}	0.111	0.043
2	{1, 3, 4, 5, 6}	0.111	0.033
3	{1, 2, 4, 5, 6, 7, 8}	0.083	0.050
4	{1, 2, 3, 5, 6}	0.125	0.034
5	{1, 2, 3, 4, 6, 7}	0.100	0.041
6	{1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10}	0.050	0.050
7	{1, 3, 5, 6, 8, 9, 10}	0.071	0.045
8	{3, 6, 7, 9, 10}	0.125	0.038
9	{6, 7, 8, 10}	0.142	0.030
10	{6, 7, 8, 10}	0.142	0.030

Esta aproximação fica evidente ao analisar a raiz quadrada do erro quadrático

médio (do inglês, *Root Mean Square Error* - RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_k[i] - C[i])^2} \quad (4.3)$$

A RMSE é uma medida que fornece um indicativo do desvio médio das medidas de centralidade aproximadas em relação aos valores reais do *closeness centrality*. A Figura 4.2 sumariza estes resultados. Como era de se esperar, tomar apenas os vizinhos imediatos não gera uma boa aproximação para centralidade, pois a medida irá privilegiar os vértices com maiores medidas de grau. A partir de $k = 2$ é possível obter estruturas de vizinhanças mais bem definidas, em que o RMSE diminuiu cerca de 86% em relação ao *closeness centrality* estimado por $k = 1$.

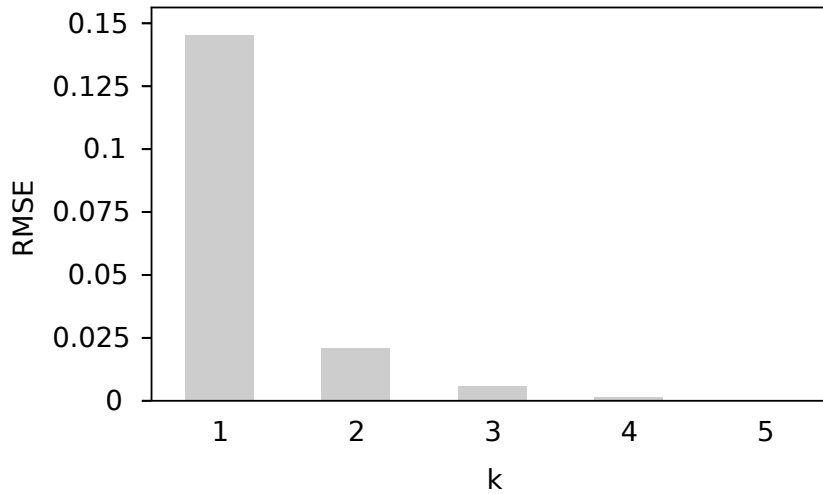


Figura 4.2. RMSE de C_k para cada valor de k .

Assim, o valor da RMSE tende para zero conforme k cresce, isto sugere que é possível obter uma alta correspondência entre as medidas aproximadas e reais mesmo sem calcular todos os caminhos mínimos. Por exemplo, a RMSE tem valor 0.0002 quando k é 5, onde 50% das medidas obtidas por C_5 tiveram correspondência com os valores reais de centralidade. Vale lembrar que o interesse deste trabalho é a importância topológica do vértice e não o seu valor numérico. Por isso, o *closeness centrality* estimado foi adotado como métrica para determinar quais veículos são mais relevantes para o papel de *uploader*.

4.2 Algoritmo de seleção dos agregadores

As aplicações de sensoriamento urbano podem resultar em uma quantidade considerável de dados para serem transmitidos em um curto período de tempo, em vista disso técnicas de *offloading* são propostas para prevenir a sobrecarga na infraestrutura celular. O **Multihop Baseado em Closeness centrality (MHC)** pretende reduzir o tráfego no *uplink* celular ao migrar parte dos dados VSN para a rede D2D. Então, o *offloading* é combinado a um processo de agregação local em que alguns veículos na rede irão atuar como *uploaders*, coletando dados de veículos vizinhos e aplicando alguma técnica de redução de dados antes de transmiti-los na rede celular. O MHC parte da capacidade de comunicação direta entre cada veículo para modelar a rede D2D e extrair informações estruturais do grafo. A partir destas informações é possível explorar a proximidade entre os veículos para determinar uma medida de centralidade dos nós e selecionar aqueles que irão atuar no processo de agregação e *upload*. Como a associação entre os veículos muda dinamicamente, manter informações atualizadas sobre a topologia da rede é algo desafiador. Por isso, o processo de seleção necessita ser executado antes de cada período de coleta de dados. A Figura 4.3 apresenta o fluxograma da solução proposta.

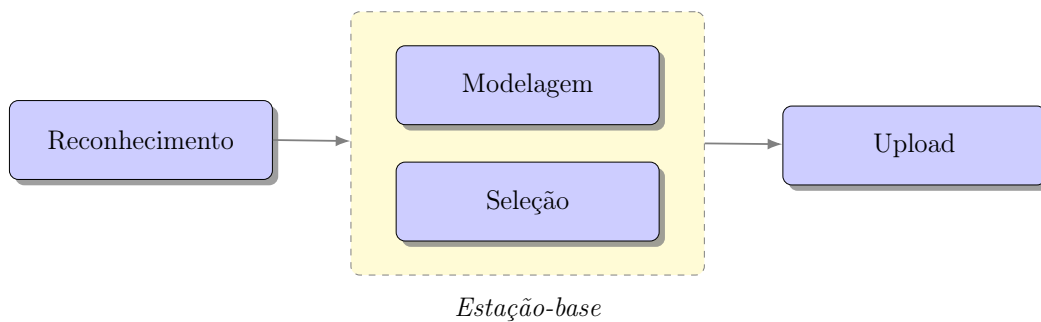


Figura 4.3. Esquema mostrando as etapas da solução proposta.

O MHC é descrito em quatro etapas:

1. **Reconhecimento** - Algum serviço de descoberta é utilizado para estabelecer a relação de proximidade entre os veículos habilitados para a comunicação D2D;
2. **Modelagem** - A estação-base construirá a topologia da rede a partir das informações provenientes do serviço de descoberta;

3. **Seleção** - Uma vez que a rede foi modelada, a estação utilizará o *closeness centrality* estimado em uma abordagem gulosa (ver Algoritmo 2) para selecionar quais veículos acessarão o *uplink* celular;
4. **Upload** - Nesta fase, um veículo selecionado para acessar o *uplink* celular irá receber uma mensagem da estação-base solicitando o *upload*. O veículo poderá então transmitir os dados coletados que estão em seu *buffer*.

O Algoritmo 2 mostra a abordagem gulosa responsável por selecionar os veículos que irão acessar a infraestrutura celular e realizar o *upload* dos dados coletados. O algoritmo recebe o grafo (G) que modela a rede, o número de saltos utilizado na comunicação multihop (d) e o parâmetro (k) com o tamanho máximo dos caminhos considerados no cálculo do *closeness centrality*. Enquanto existirem vértices em G , o vértice com a maior medida de centralidade será removido de G e adicionado no conjunto solução S . O veículo em questão irá receber uma mensagem da estação-base, notificando-o que o mesmo foi escolhido para coletar dados de seus vizinhos até o k -ésimo nível, cada vizinho também será removido do conjunto $V(G)$. Isto assegura que os veículos selecionados para comunicação celular estarão separados por no mínimo d saltos.

Algoritmo 2 Multihop baseado em closeness centrality (MHC)

Entrada G, d, k

Saída S

- 1: $S \leftarrow \emptyset$
 - 2: $C_k \leftarrow$ Calcule o $C_k(v)$, $\forall v \in V(G)$
 - 3: **enquanto** $V(G) \neq \emptyset$ **faça**
 - 4: Selecione $v_i \in V(G)$ que maximize C_k
 - 5: $S \leftarrow S \cup v_i$
 - 6: **para** cada $v_j \in N_G^d(v_i)$ **faça**
 - 7: **se** $v_j \notin S$ **então**
 - 8: $V(G) \leftarrow V(G) \setminus v_j$
 - 9: $V(G) \leftarrow V(G) \setminus v_i$
-

Considere novamente o grafo G da Figura 4.1, o exemplo a seguir demonstra as soluções construídas pelo MHC. O Algoritmo 2 irá receber o grafo como parâmetro de entrada, assim como a quantidade de saltos (d) e o tamanho máximo dos caminhos (k) utilizados para estimar o *closeness centrality*. O *closeness centrality* será calculado para cada vértice v_i da rede, considerando apenas os vizinhos pertencentes à vizinhança $N_G^k(v_i)$. Em outras palavras, o *closeness centrality* do vértice v_i será estimado tomando apenas os vizinhos que estão em uma distância máxima de até k saltos de v_i .

Em seguida, o vértice v_i com maior centralidade será selecionado para coletar dados de seus vizinhos em $N_G^d(v_i)$, agregá-los e transmiti-los no *uplink* celular. A Figura 4.4 mostra os vértices selecionados para o *offloading* em uma comunicação *single-hop*. A solução encontrada constitui um *1-hop dominating set*, que trata-se de um conjunto dominante tradicional.

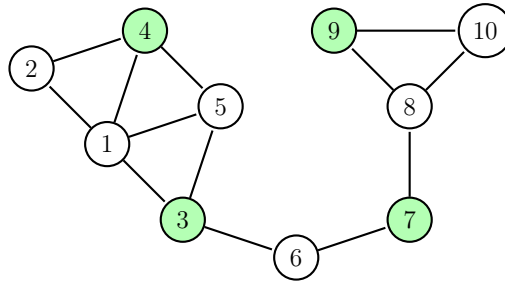


Figura 4.4. *1-hop dominating set* com o *closeness centrality* estimado por $k = 3$.

O *2-hop dominating set* é mostrado na Figura 4.5(a) e o *3-hop dominating set* é mostrado na Figura 4.5(b). Em ambos os casos, o *closeness centrality* foi estimado a partir de caminhos limitados a uma distância de $k = 3$. As soluções encontradas, embora próximas, ainda não constituem-se como soluções ótimas do problema, ou seja, um *minimum d-hop dominating set*. Aumentando o tamanho de k é possível obter uma melhor estimativa para o *closeness* e melhorar a aproximação do algoritmo. A Figura 4.5(c) mostra o mesmo grafo com $d = 3$, porém, considerando os valores reais das medidas de centralidade de cada vértice. Neste caso, a solução ótima para o *minimum 3-hop dominating set* foi encontrada.

Não é difícil de visualizar que o *d-hop dominating set* quando $d = 1$ trata-se do conjunto dominante. Desta forma, a modelagem do problema possibilita abordar as comunicações de modo *single-hop* e *multi-hop*. Além disso, é possível ajustar o valor de k para valores menores e assim reduzir o tempo para obter a solução. Desta forma seria possível adaptar a algoritmo de acordo com as condições de tráfego, em que redes mais densas poderiam ocasionar um tempo maior para computar a solução.

Embora a solução mostre uma abordagem com a participação da estação-base no serviço de *offloading*, os veículos podem executar o MHC de forma distribuída. Neste caso, cada veículo executaria a fase de reconhecimento através de um serviço de descoberta direta, em que o cálculo dos caminhos mínimos seria baseado no compartilhamento destas informações. Cada veículo poderia estimar a sua própria centralidade e compartilhá-la em sua vizinhança. O veículo escolhido como *uploader* seria aquele de maior centralidade. Desta forma, caso o sensoriamento não possua restrições de latên-

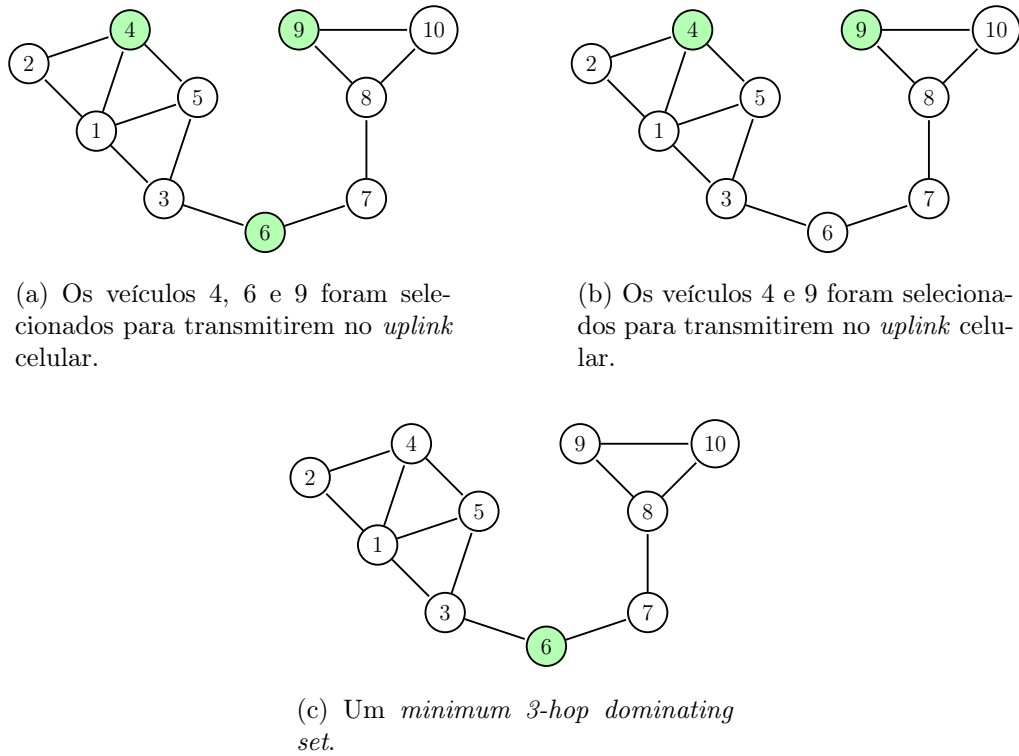


Figura 4.5. Exemplos utilizando a comunicação *multi-hop*.

cia, o MHC poderia operar mesmo fora da cobertura celular. Os veículos agregadores poderiam reduzir os seus dados coletados através de agregação local, armazená-los em seu *buffer* e fazer o seu *upload* quando houvesse alguma oportunidade de transmissão. Conforme relatado anteriormente, o serviço distribuído não depende da assistência da estação-base, porém pode sofrer com *overhead* de sinalização e interferência.

Capítulo 5

Experimentos

Por se tratar de um campo de pesquisa ainda recente, as redes veiculares não estão devidamente consolidadas, por isso alguns projetos ainda encontram-se em processo de implantação, como nos Estados Unidos, Japão e União Europeia [Zeadally et al., 2012]. Esta condição impõe limitações durante a etapa de experimentação de novas pesquisas. O método escolhido para realizar as medições de desempenho podem afetar significativamente a qualidade da avaliação. Em geral, há três metodologias para avaliar o desempenho de um sistema: testes de campo, análises e simulações [Sommer & Dressler, 2014]. Em razão do ambiente complexo e distribuído, característico da rede veicular, testes em campo podem ser difíceis e caros de serem implementados mesmo em pequena escala. Em contrapartida, em certas situações é possível derivar uma solução analítica para o comportamento do sistema a partir do modelo matemático. A simulação é outra abordagem que vem sendo amplamente utilizada em pesquisas de redes, no qual é possível avaliar o desempenho de aplicações, protocolos e algoritmos.

Os experimentos conduzidos neste trabalho foram divididos em duas partes:

1. **Análise preliminar:** Estudo experimental com o objetivo de avaliar de que modo a conectividade dos veículos pode favorecer uma estratégia de *offloading* multi-hop em um cenário de cobertura onipresente e de alta densidade veicular. A rede foi modelada como um grafo a partir de traços de mobilidade veicular de uma cidade real e o algoritmo foi executado considerando duas condições de agregação de dados;
2. **Avaliação bidirecional:** Através de um ambiente de integração entre a simulação de rede e a simulação de mobilidade é possível obter um cenário mais realista. Desta forma, esta segunda parte dos experimentos considera não apenas a mobi-

lidade, como também simula uma rede celular no qual os veículos estão equipados com interfaces habilitadas para a comunicação D2D.

Este trabalho utilizou um cenário construído a partir dos traços de mobilidade da cidade de Colônia, a quarta maior cidade da Alemanha. O dados estão disponíveis pelo projeto *TAPASCologne* [Uppoor et al., 2014], uma iniciativa do *Institute of Transportation Systems* (ITS-DLR) no Centro Aeroespacial Alemão. O conjunto de dados original do *TAPASCologne* cobre uma área de 400km^2 por um período de 24 horas e granularidade de 1 segundo, mais de 700.000 rotas individuais de veículos foram utilizadas. A Figura 5 mostra o *layout* da área da cidade, obtido a partir do OpenStreetMap¹ (OSM), projeto colaborativo de mapeamento constituído por dados abertos.

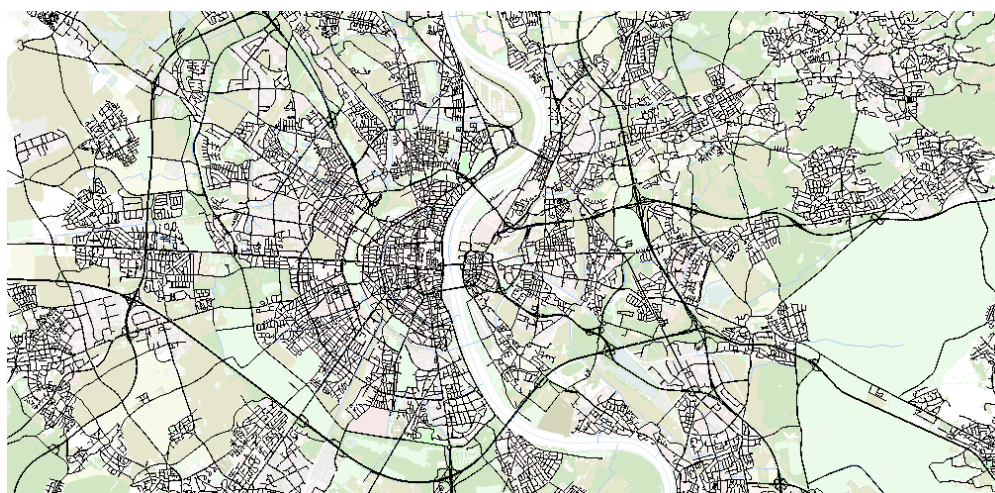


Figura 5.1. Topologia rodoviária da cidade de Colônia.

O restante deste capítulo apresenta em detalhes a metodologia experimental desta pesquisa. Na seção 5.1 são relatados os resultados obtidos na análise preliminar, que considerou uma abordagem centralizada do MHC e duas condições básicas de agregação local. A seção 5.2 considerou um abordagem descentralizada para o MHC, que foi estudada através de uma avaliação bidirecional. Este capítulo também discute os resultados apresentados e relata as métricas utilizadas para avaliação, os parâmetros e comparações.

¹Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>

5.1 Análise preliminar

Durante os experimentos, foi considerado que todos os veículos dispunham de capacidade de comunicação 5G D2D, seja ela *inband* ou *outband*. Além disso, foi considerado que todos os veículos possuíam cobertura celular ininterrupta, assim, qualquer veículo estaria habilitado com interface de rede celular para realizar o *upload* de seus dados para a estação-base quando necessário. A comunicação D2D foi modelada como um grafo, no qual as ligações entre veículos são estabelecidas conforme o modelo de disco unitário. Os experimentos consideraram duas faixas de transmissão, $R = 100$ e 200 metros, valores comumente empregados em análises experimentais. O grafo foi modelado como não-direcionado, deste modo, pressupõe-se que todos os veículos possuem a mesma potência de transmissão.

De acordo com as condições de agregação local, a análise preliminar considerou dois casos:

1. **Condição do melhor caso** - Esta condição considera o cenário de melhor caso, em que é possível ter o benefício máximo da agregação local dos dados VSN. Neste cenário, todos os veículos selecionados para transmitir no *uplink* celular irão comprimir os dados recebidos dos vizinhos antes de enviá-los à estação. São dados que não necessitam ser transmitidos individualmente por cada veículo, por exemplo, dados de natureza redundante, como medições de temperatura em um pequeno espaço geográfico. Conforme ilustrado na Figura 5.2, os veículos responsáveis pela agregação local irão transmitir apenas um resumo das medidas reportadas, como o valor médio dos dados recebidos de veículos vizinhos.

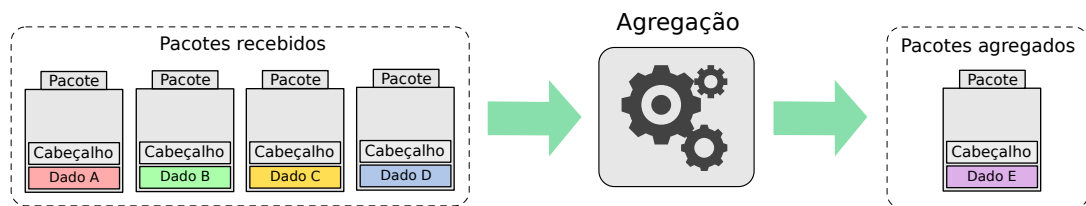


Figura 5.2. Melhor caso de agregação local.

Os experimentos consideraram pacotes com um carga útil de $p = 100$ bytes e cabeçalhos TCP/IP com tamanho $h = 20$ bytes (assumindo que um mecanismo de compressão de cabeçalhos foi utilizado) [Ancona et al., 2014]. Resultando então em pacotes de tamanho constante com $m = h + p$ e um custo de *upload* no melhor caso:

$$custo(t) = \sum_{v_i \in S} m = m \cdot |S| \quad (5.1)$$

O custo total no instante de tempo t será diretamente proporcional ao tamanho do subconjunto S , em que cada veículo $v_i \in S$ irá transmitir os dados agregados dos vizinhos em um único pacote de tamanho m .

2. **Condição do pior caso** - Esta condição considera o cenário de pior caso, em que não é possível realizar uma agregação local dos dados. Neste caso, os dados individuais de cada veículo precisam ser transmitidos na rede celular e não é possível resumir as medidas observadas. Contudo, dados de diferentes veículos podem ser transmitidos em um mesmo pacote, desde que este não exceda o tamanho limite de um pacote IP $m_{max} = 1,440$ bytes. Deste modo, ainda é possível utilizar algum espaço remanescente nos pacotes para reduzir a quantidade de cabeçalhos TCP/IP transmitidos na rede celular. Este cenário é ilustrado na Figura 5.3.

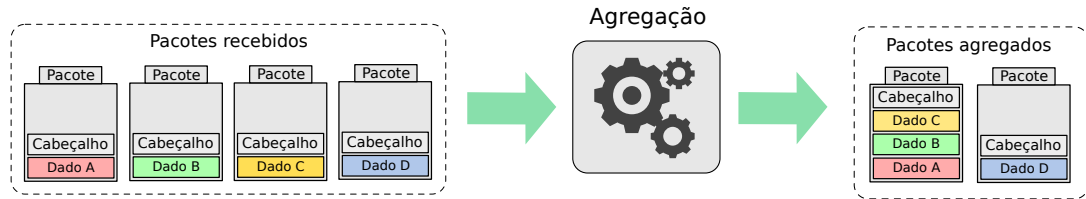


Figura 5.3. Pior caso de agregação local.

Novamente, os experimentos consideraram pacotes com carga útil de $p = 100$ bytes e cabeçalhos TCP/IP de $h = 20$ bytes. O custo resultante no pior caso no instante t é:

$$custo(t) = \sum_{v_i \in S} (R_i \cdot h + N_i \cdot p) \quad (5.2)$$

$$R_i = \left\lceil \frac{N_i \cdot p}{m_{max} - h} \right\rceil \quad (5.3)$$

Onde R_i é o número de pacotes transmitidos por cada veículo v_i e N_i é o número de vizinhos de v_i .

A Figura 5.4 apresenta o custo de *upload* quando nenhuma estratégia de *offloading* é utilizada. Neste caso, cada veículo irá acessar o canal de *upload* e transmitir seus dados individualmente, gerando um custo de $m \times N$, com N igual ao número de veículos

no cenário. É possível analisar também como a quantidade de veículos interfere na solução. O horário de pico aconteceu por volta de 7h30min, cerca de 14.200 veículos transitaram ao longo das estradas. Um outro momento de trânsito intenso corresponde ao período de um final de expediente de trabalho, por volta das 17h. Em ambos os momentos, a rede celular alcançou um custo de mais de 120 kB/s.

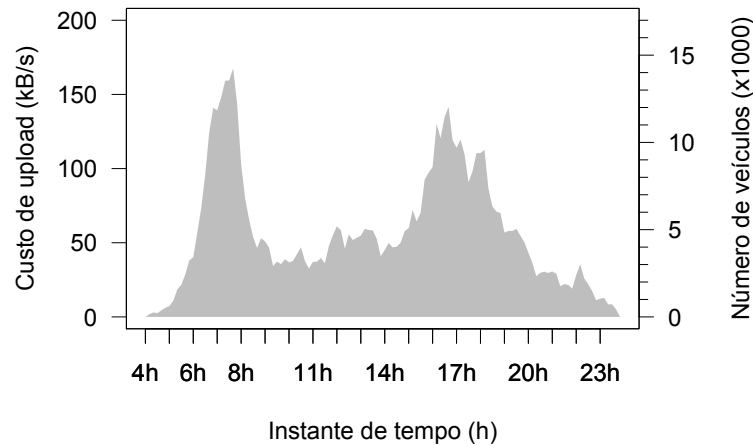


Figura 5.4. Custo na abordagem de *upload* tradicional.

No esquema de *offloading* proposto, os veículos usarão uma rede complementar de baixo custo para descarregar os dados VSN através de conexões estabelecidas diretamente entre os veículos. Embora os dados possam ser transmitidos em um espectro não-licenciado, como em redes baseadas em 802.11p, ainda há um custo que não pode ser completamente negligenciado, pois uma grande quantidade de dados pode comprometer até mesmo a capacidade do canal da comunicação V2V. Apesar disso, o custo analisado neste trabalho considerou apenas a quantidade de dados transmitidos no *upload* celular. Além do custo de *upload*, o ganho do sistema² também foi analisado.

As seções seguintes apresentam os experimentos realizados para avaliar o MHC nas condições de melhor e pior caso com um período de coleta de 10 segundos. Os resultados do MHC foram comparados com os resultados obtido pelo algoritmo RB, proposto por Stanica et al. [2013], e com a solução ótima, obtida pelo *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.9*³. O número de intervalos de tempo do RB foi fixado em 256 (valor anteriormente definido pelos autores) e os resultados são uma média de 10 execuções. Em razão do determinismo do MHC, o algoritmo só foi executado uma única vez. Foi considerado que todos os veículos dispunham de capacidade de comunicação D2D e celular. Os traços de mobilidade veicular de Colônia foram utilizados para

²Mencionado anteriormente no capítulo 3.

³Disponível em <https://www.ibm.com/br-pt/products/ilog-cplex-optimization-studio/>

modelar as comunicações D2D, no qual as conexões entre veículos foram estabelecidas conforme o modelo de disco unitário. O MHC executou de forma centralizada, onde uma única BS provia cobertura onipresente a todos os veículos no cenário.

5.1.1 Condição de melhor caso

Esta primeira parte dos experimentos mostra que o MHC pode reduzir significativamente o custo de *upload* no caso em que todos os veículos conseguem realizar a agregação local dos dados VSN. O MHC foi configurado com diferentes valores de $d = \{1, 2, 3\}$ e $k = \{1, 2, 3, 4\}$. Este conjunto de parâmetros do MHC foi definido após uma análise de propriedades estruturais da rede. A Figura 5.5 apresenta a Função de Distribuição Acumulada (FDA) do custo de *upload* no melhor caso, descrito pela Equação 5.1.

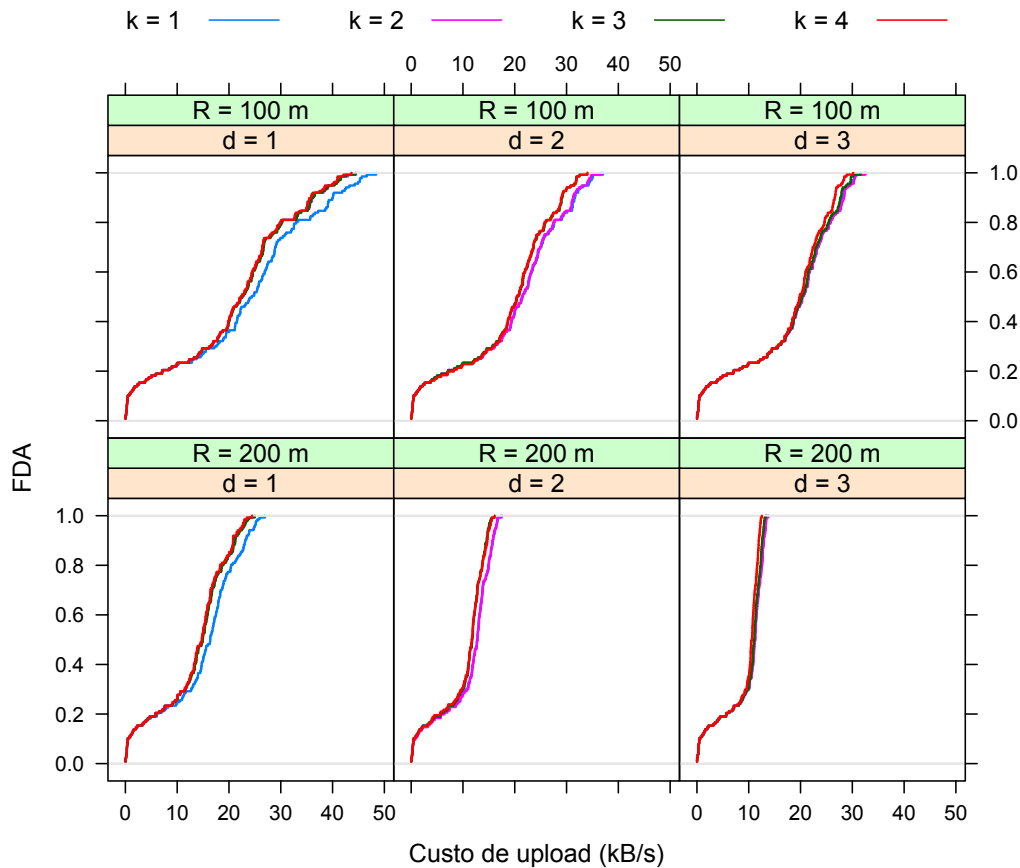


Figura 5.5. FDA do custo de *upload* na condição de melhor caso.

A análise estatística dos resultados foi feita a partir do R^4 . O teste de normalidade

⁴Disponível em: <https://www.r-project.org/>

Shapiro-Wilk foi utilizado para determinar se os resultados seguem uma distribuição normal. Com um nível de significância de 5%, o teste sugeriu que nenhuma amostra seguia tal distribuição. Por isso, os resultados foram pareados de acordo com o instante de tempo e o teste de *Wilcoxon* foi aplicado com um nível de confiança de 95%.

Como era de se esperar, os resultados sugerem que o MHC conquistou melhores soluções quando $k > d + 1$. Isto acontece porque os veículos em S irão coletar dados de uma vizinhança constituída de veículos separados por até d saltos. Logo, utilizar $k < d$ não provê informação topológica suficiente para calcular a centralidade para aquela estrutura de vizinhança. Em todos os cenários, expandir o alcance de transmissão para 200 metros trouxe uma redução de quase 20 kB/s no custo de *upload*. Aumentar os valores de d e k permite ao MHC explorar vizinhanças cada vez maiores, porém, o benefício da comunicação *multi-hop* é limitado pelo diâmetro da rede. Esta propriedade da rede será melhor discutida na seção 5.1.3.

A Tabela 5.1 sumariza os resultados do teste estatístico quando o raio de transmissão foi de 100 metros. Conforme evidenciado pela FDA, aumentar o número de saltos e o diâmetro do cálculo da centralidade reduz o custo de *upload*, porém esta redução diminui conforme d e k crescem de tamanho. Esta redução é evidente ao analisar os resultados em que $k > d + 1$.

Tabela 5.1. Raio de 100 metros: Avaliação do custo de *upload*.

Saltos (d)	Corte (k)	(Pseudo) Mediana	Intervalo de confiança (95%)	
			Inferior	Superior
1	1	22.97	20.47	25.24
	2	21.25	18.99	23.31
	3	21.28	19.00	23.34
	4	21.09	18.85	23.14
2	1	19.97	17.60	21.95
	2	19.90	17.50	21.87
	3	19.08	16.68	20.88
	4	19.01	16.65	20.78
3	1	18.93	16.41	20.69
	2	18.97	16.45	20.71
	3	18.81	16.29	20.53
	4	18.46	15.96	20.07

Os intervalos de confiança mostram o intervalo de valores em que estima-se que o parâmetro populacional se situe para um nível de confiança estabelecido em 95%.

É possível constatar uma variabilidade no tamanho dos intervalos de confiança. Uma vez que a densidade veicular muda conforme o tempo, o custo de *upload* é variável. O custo para transmitir na rede celular é mais acentuado durante o horário de pico, momento em que o cenário encontra-se com uma alta densidade veicular. Mesmo com uma quantidade maior de veículos para atuarem no processo de agregação de dados, a alta fragmentação da rede força um número maior de *uploads*.

Isto pode ser melhor compreendido ao analisar a Tabela 5.2, que contém os resultados quando o raio de transmissão foi de 200 metros. Embora se trate do mesmo cenário, a rede veicular foi menos fragmentada, então foi possível agregar dados de um número maior de vizinhos. Além de uma dispersão menor, foi possível obter um custo de *upload* menor. O valor da pseudo-mediana foi estimado em até 10.14 kB/s, uma redução de quase 50% em relação ao mesmo cenário com um raio de transmissão de 100 metros.

Tabela 5.2. Raio de 200 metros: Avaliação do custo de *upload*.

Saltos (d)	Corte (k)	(Pseudo) Mediana	Intervalo de confiança (95%)	
			Inferior	Superior
1	1	15.16	13.34	16.52
	2	13.77	12.17	14.98
	3	13.84	12.21	15.05
	4	13.64	12.07	14.83
2	1	11.98	10.55	12.74
	2	12.02	10.70	12.76
	3	11.13	9.88	11.81
	4	11.09	9.88	11.79
3	1	10.65	9.47	11.15
	2	10.72	9.51	11.23
	3	10.55	9.39	11.04
	4	10.14	9.07	10.58

Embora os resultados sejam bem próximos, o teste estatístico indicou uma redução significativa no custo de *upload* quando o parâmetro k foi configurado com o valor 4. Por isso, o parâmetro k foi fixado em 4 para cada valor de d . Em seguida, o MHC foi comparado aos resultados obtidos pela abordagem baseada em reserva de tempo (RB) e com a solução ótima. A Figura 5.6 mostra o custo de *upload* quando a comunicação *single-hop* é considerada. O número de veículos no cenário também foi plotado, porém, aqui ele aparece com uma transformação logarítmica para facilitar a leitura do gráfico.

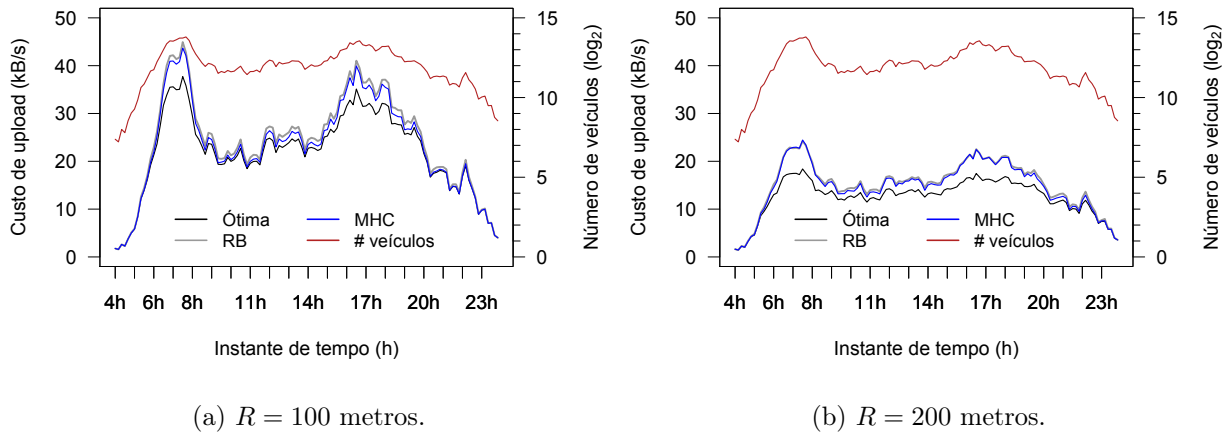


Figura 5.6. Comparação dos custos de *upload* na comunicação *single-hop*.

O primeiro gráfico mostra o custo quando o raio de transmissão foi de 100 metros. O MHC obteve uma redução de até 1.86 kB/s em relação ao RB. Note que o MHC alcançou a solução ótima em certos instantes de tempo, esta aproximação diminuiu durante os horários de pico, em que a diferença em relação à solução ótima foi de até 6.26 kB/s. Esta diferença é maior no segundo gráfico, que corresponde ao raio de transmissão de 200 metros. Embora a diferença seja de 6.05 kB/s em relação a solução ótima, o MHC se distanciou da solução ótima durante os momentos de trânsito moderado. Em relação ao RB, o MHC conseguiu uma redução no custo de *upload* de apenas 0.77 kB/s. Os resultados para o teste de *Wilcoxon pareado* são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Resultados do teste pareado para a comunicação *single-hop*.

R	Pares	(Pseudo) Mediana	p-valor	Intervalo de confiança (95%)	
				Inferior	Superior
100 metros	RB - MHC	0.91	2.2e-16	0.83	0.97
	MHC - Ótima	1.33	2.2e-16	1.02	1.82
	RB - Ótima	2.24	2.2e-16	1.87	2.63
200 metros	RB - MHC	0.34	2.2e-16	0.30	0.38
	MHC - Ótima	2.11	2.2e-16	1.80	2.44
	RB - Ótima	2.43	2.2e-16	2.17	2.71

Na hipótese nula H_0 , consideramos que a diferença entre os pares segue uma distribuição simétrica em torno de zero, ou seja, as amostras são provenientes de uma

mesma população. Como hipótese alternativa H_1 , temos que a diferença entre os pares é diferente de zero, ou seja, a mediana da primeira amostra é diferente da mediana da segunda amostra. Com um nível significância de 5%, os p-valores indicam que a hipótese H_0 pode ser rejeitada, sugerindo uma forte evidência de que a hipótese H_1 seja válida. Com isso, é possível afirmar que o custo de *upload* do MHC é estatisticamente menor que o custo de *upload* do RB. Embora o MHC tenha conseguido uma diferença de até 6.05 kB/s em relação à solução ótima, o intervalo de confiança das diferenças mostra que o MHC consegue uma melhor aproximação quando o raio de transmissão é de 100 metros. Uma alta conectividade da rede produz instâncias maiores do problema, o que torna difícil obter uma boa aproximação para encontrar um MDS.

Os demais resultados seguem de acordo com o que já foi relatado. Na Figura 5.7 estão os custos de *upload* nos cenários de comunicação *multi-hop*. As Figuras 5.7(a) e 5.7(b) são os resultados da comunicação 2-hops, enquanto que as demais figuras são da comunicação 3-hops. Os melhores resultados foram obtidos quando o *offloading* utilizou 3 saltos. O custo de *upload* no horário de pico foi cerca de 30.16 kB/s quando o raio de comunicação foi de 100 metros, ou seja, um custo de 2.44 kB/s a mais que a solução ótima. Os resultados do RB foram mantidos nos gráficos para permitir a comparação. O MHC obteve uma redução de até 14.76 kB/s em relação ao custo de *upload* do RB. No outro cenário, o custo de *upload* do MHC foi de até 12.53 kB/s quando utilizou 3-hops. Isto representa um aumento de 2.52 kB/s em relação à solução ótima e uma redução de 11.67 kB/s em relação ao RB.

O teste pareado sugeriu que os resultados são estatisticamente diferentes, contudo, fazendo uma análise mais aprofundada é possível constatar que há momentos em que o MHC consegue uma aproximação evidente da solução ótima. A Tabela 5.4 contém os resultados do teste pareado para um momento de trânsito moderado, entre 9h30min e 10h10min. O valor de d , que indica o número de saltos, é mostrado entre parênteses. Os p-valores, embora pequenos, indicam que a hipótese nula não pode ser rejeitada. Assim, é possível constatar que, para este cenário específico, não há evidências que indiquem diferença entre o custo de *upload* do MHC e da solução ótima.

5.1.1.1 Ganho do sistema

Além do custo de *upload*, o ganho do sistema também foi analisado. Esta medida está diretamente ligada a modelagem do problema, pois o inverso deste valor fornece o percentual de veículos no conjunto dominante. Além de fornecer o número de veículos que fizeram o *offloading*, o ganho do sistema permite avaliar as soluções em termos do número de veículos conectados na rede celular. Por isso, minimizar a quantidade de

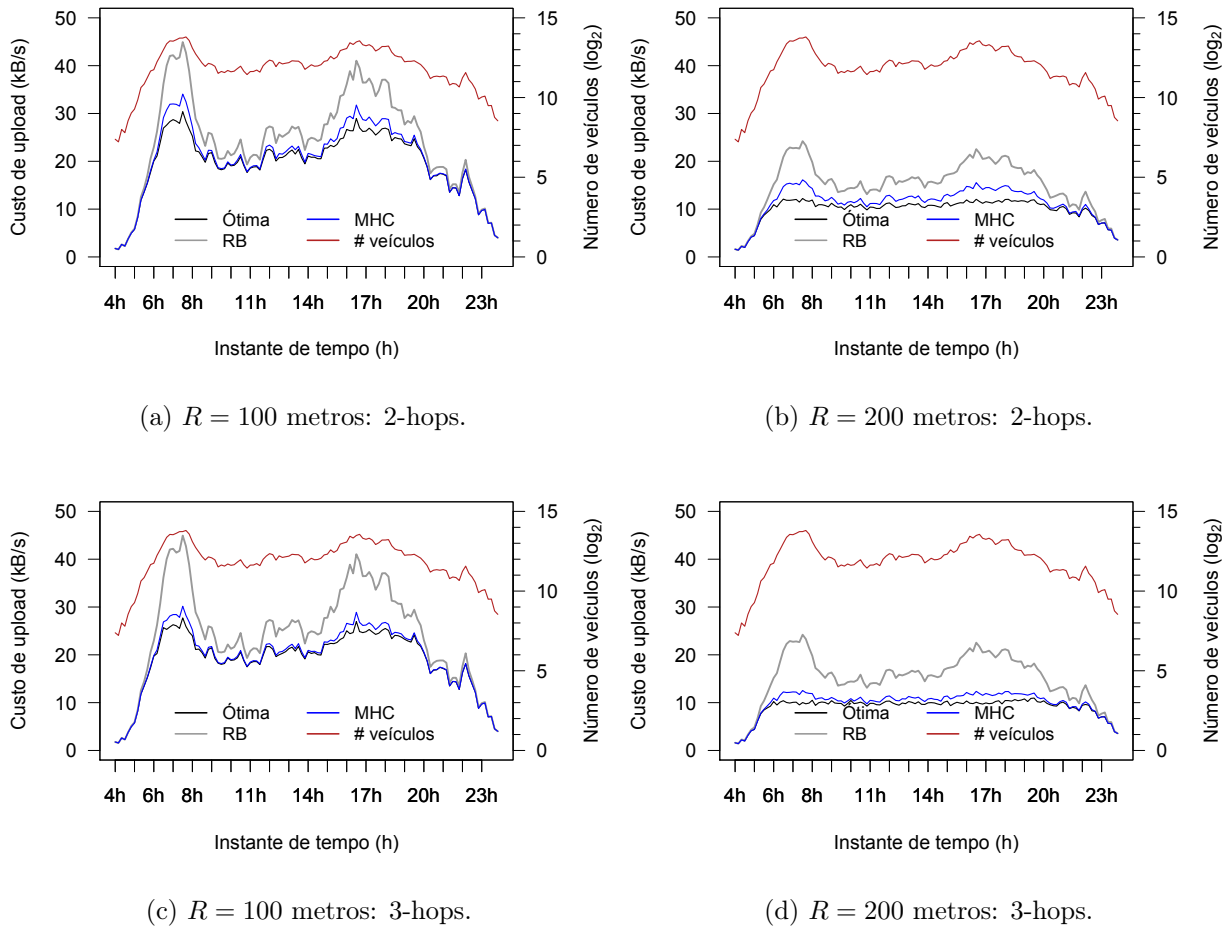


Figura 5.7. Comparação dos custos de *upload* na comunicação *multi-hop*.

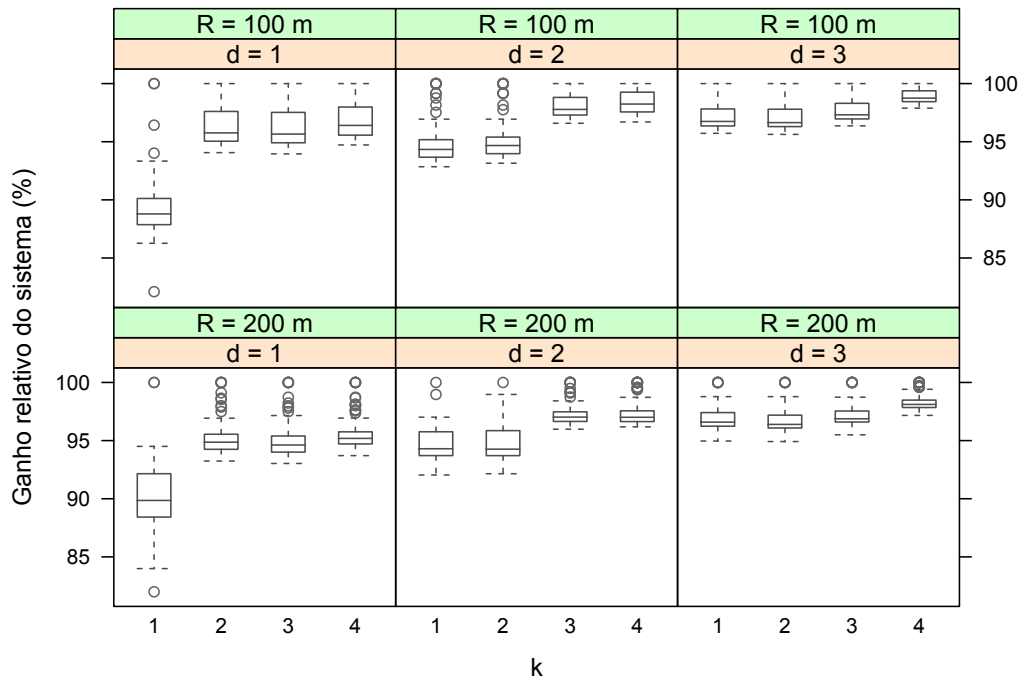
veículos transmitindo para a estação-base irá maximizar o ganho do sistema.

O ganho do sistema nunca será 100%, pois uma quantidade mínima de veículos precisará acessar a rede celular para fazer o *upload* dos dados de sensoriamento. Por isso, o ganho do sistema também foi analisado em relação à solução ótima, isto é, o maior valor que é possível obter sem comprometer a cobertura dos veículos. O ganho relativo do sistema pode ser observado na Figura 5.8.

A capacidade de *offloading* é fortemente influenciada pelo volume de veículos no cenário, porém, outras variáveis são igualmente relevantes. A primeira delas é a faixa de transmissão. Foi possível agregar uma quantidade maior de dados quando o alcance de transmissão foi estendido para 200 metros, pois um número maior de veículos estavam conectados. O número de saltos também trouxe um ganho significativo para a solução, em que a comunicação *multi-hop* aumentou em média cerca de 3% do ganho relativo do sistema. Também houve melhora nos resultados ao variar o parâmetro k , o ganho

Tabela 5.4. Trânsito moderado: Resultados do teste pareado.

R	Pares	(Pseudo) Mediana	p-valor	Intervalo de confiança (95%)	
				Inferior	Superior
100 metros	MHC - Ótimo (2)	0.21	0.0579	0.16	0.25
	MHC - Ótimo (3)	0.16	0.0625	0.14	0.19
200 metros	MHC - Ótimo (2)	0.88	0.0579	0.79	0.94
	MHC - Ótimo (3)	0.54	0.0579	0.39	0.66

**Figura 5.8.** Ganho do sistema relativo ao ganho da solução ótima.

relativo do sistema foi superior a 90% em todos os casos onde o *closeness centrality* foi estimado por $k > d + 1$.

Em relação ao volume de veículos no cenário, a Figura 5.9 contém os resultados para o ganho do sistema nas comunicações *single-hop* e *multi-hop*. o MHC foi fixado com k igual a 4 e para a comunicação *multi-hop* foi considerado um valor de d igual a 3, que obteve os melhores resultados. Os resultados sugerem que o ganho do sistema obtido pelo MHC supera os resultados do RB. O MHC consegue realizar o *offloading* dos dados utilizando um número menor de veículos para atuarem na coleta dos dados. O MHC obteve uma melhora de até 11.29% em relação ao RB quando a comunicação

multi-hop foi considerada.

Embora a capacidade de agregação local seja maior durante o horário de trânsito intenso, o custo de *upload* também é maior, pois uma quantidade maior de dados precisa ser transmitida na rede celular. Note que este horário também coincide com o momento em que houve o maior ganho do sistema, que ultrapassou 70%. As soluções discutidas neste trabalho tiveram o melhor desempenho quando o acesso à rede celular tornou-se mais crítico, isto é, quando havia uma quantidade maior de veículos necessitando fazer uso dos recursos da rede. Diante deste cenário de alta demanda de acesso à rede celular, estratégias baseadas em *offloading* são fundamentais para otimizar o tráfego da rede e reduzir a sobrecarga nas infraestruturas celulares.

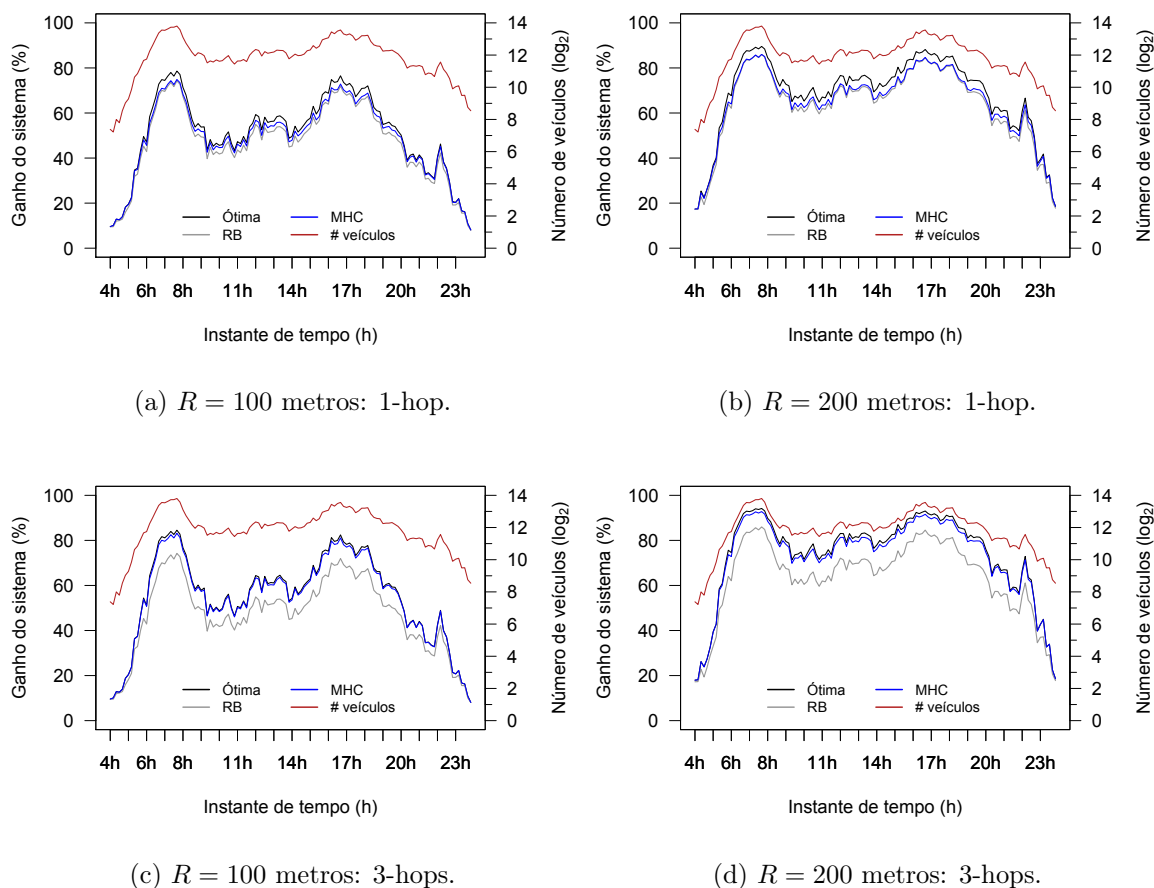


Figura 5.9. Comparação dos ganhos do sistema.

A principal diferença em relação aos resultados obtidos está na modelagem do problema. Embora não forneça a solução ótima, o RB modela o problema como uma instância do MDS, em que a dominância considera somente os vizinhos imediatos.

Em contrapartida, o MHC modela o problema como um *minimum d-hop dominating set*. O MHC também não garante a solução ótima, porém, a comunicação *multi-hop* pode reduzir significativamente o tamanho do conjunto dominante, cuja dominação não estará restrita aos vizinhos imediatos.

5.1.2 Condição de pior caso

No cenário de melhor caso fica claro que o custo de *upload* será proporcional ao tamanho do subconjunto de veículos retransmissores. Note que cada veículo selecionado para fazer *upload* irá transmitir uma única mensagem de tamanho m , resultando em um custo de *upload* que é múltiplo do tamanho de S . Então, quanto maior o ganho do sistema, menor será o custo de transmissão na rede celular. Nesta condição de pior caso foi considerado um cenário onde a aplicação não permite a agregação local dos dados VSN. Esta parte dos experimentos aborda uma situação extrema em que o servidor necessitará dos dados individuais de cada veículo. O método de avaliação seguiu o mesmo procedimento adotado no experimento anterior.

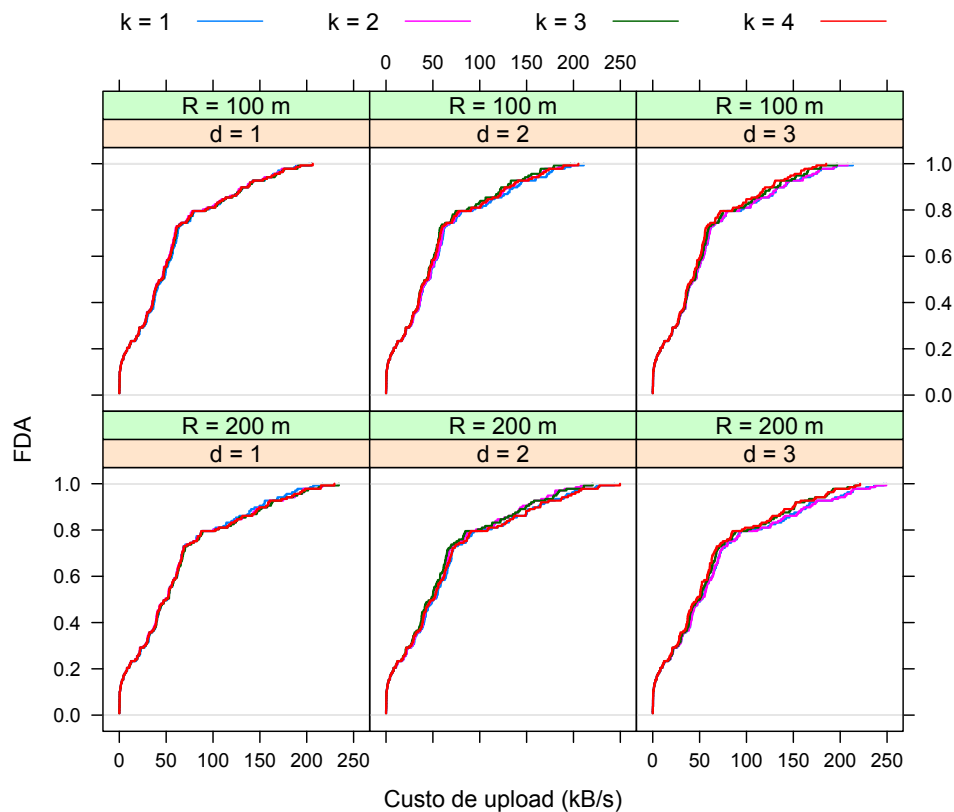


Figura 5.10. FDA do custo de *upload* na condição de pior caso.

A Figura 5.10 apresenta a FDA do custo de *upload* no pior caso. O custo de *upload* no pior caso é dado pela Equação 5.2. É evidente o aumento no custo de *upload* em relação ao melhor caso, que ultrapassou até o custo da abordagem de *upload* tradicional. Na Figura 5.4, o cenário em que cada veículo fez o *upload* individual de seus dados, o custo de *upload* alcançou 167.50 kB/s durante o horário de pico. Em contrapartida, o custo de *upload* do MHC no pior caso excedeu 200 kB/s em todas as configurações do algoritmo. No pior caso, um veículo irá transmitir os dados descarregados de todos os seus vizinhos. Um veículo pode ter mais de um dominador, em que cada dominador irá coletar seus dados, resultando em um custo excessivo por causa das transmissões redundantes. Este problema é agravado quando o alcance de transmissão é de 200 metros. Como um número maior de veículos estarão na estrutura de vizinhança, há uma tendência maior de haver transmissões redundantes.

Ancona et al. [2014] introduziram um mecanismo de confirmação para tratar este problema. Um veículo com múltiplos dominadores irá escolher apenas um único dominador dentre eles para coletar, agregar e transmitir seus dados. Este mecanismo garante que cada dado será transmitido uma única vez. A Figura 5.11 apresenta o custo de *upload* após a introdução do mecanismo de confirmação. O mecanismo de confirmação trouxe uma redução de quase 50 kB/s em relação ao MHC sem confirmação.

Note que é possível obter alguma melhora no *offloading* na condição de pior caso. Aumentar o número de saltos tem pouco impacto na redução do custo de *upload*, pois ainda é necessário transmitir a carga útil de cada veículo, que é responsável pela fração mais significativa dos dados transmitidos. Embora as funções apareçam quase sobrepostas, o teste de *Wilcoxon pareado* revelou que o ajuste apropriado de k ainda traz algum benefício para a solução. Por isso, o parâmetro k fixado com o valor 4.

A Figura 5.12 apresenta o custo de *upload* do MHC com o mecanismo de confirmação. Os resultados da solução ótima foram omitidos, pois a sua modelagem não garante o custo mínimo de *upload* no pior caso. Em todos os casos, custo de *upload* foi maior quando o trânsito se intensificou. Em relação ao melhor caso, houve um acréscimo de mais de 100 kB/s no custo de *upload*. Este aumento foi em razão das condições de agregação local, que desta vez exigiu a transmissão de todos os dados de sensoriamento. Quando o pior caso foi considerado, o *offloading multi-hop* do MHC obteve uma redução de até 2.08 kB/s em relação ao custo do RB. Isto significa uma redução de 20.8 kB em cada período de coleta ou cerca de 106 cabeçalhos por segundo. O MHC com 3 saltos conseguiu uma redução de até 24.59 kB/s em relação ao custo da abordagem de *upload* tradicional, ou seja, uma redução de 14.68%.

A Tabela 5.5 contém os resultados para o teste pareado. O valor de d é mostrado entre parênteses. Embora os gráficos mostrem uma sobreposição nas curvas dos

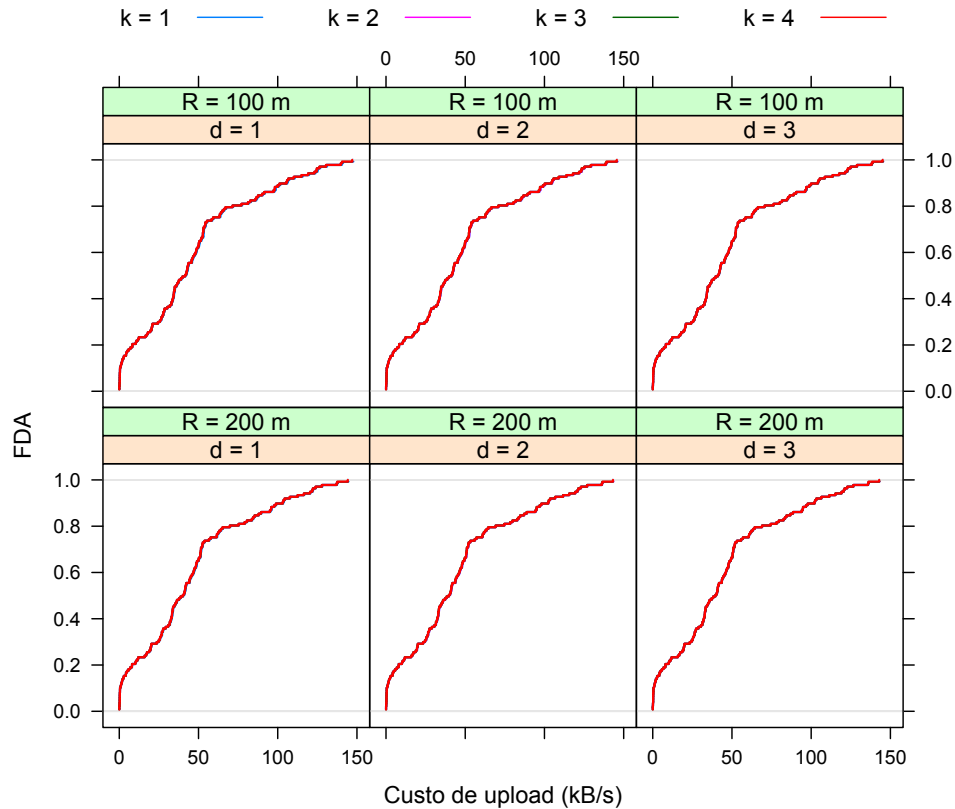


Figura 5.11. FFA do custo de *upload* após o mecanismo de confirmação.

resultados, os p-valores apontam que todos os pares são estatisticamente diferentes, pois não há evidências suficientes para aceitar a hipótese H_0 . o MHC obteve custos de *upload* melhores que o RB, e além disso, aumentar o número de saltos trouxe uma redução significativa no custo de *upload*.

Tabela 5.5. Resultados do teste pareado para o cenário de pior caso.

R	Pares	(Pseudo) Mediana	p-valor	Intervalo de confiança (95%)	
				Inferior	Superior
100 metros	RB - MHC (1)	0.15	2.2e-16	0.14	0.16
	RB - MHC (3)	0.72	2.2e-16	0.60	0.83
	MHC (1) - MHC (3)	0.56	2.2e-16	0.45	0.68
200 metros	RB - MHC (1)	0.05	2.2e-16	0.04	0.06
	RB - MHC (3)	0.67	2.2e-16	0.61	0.74
	MHC (1) - MHC (3)	0.62	2.2e-16	0.55	0.69

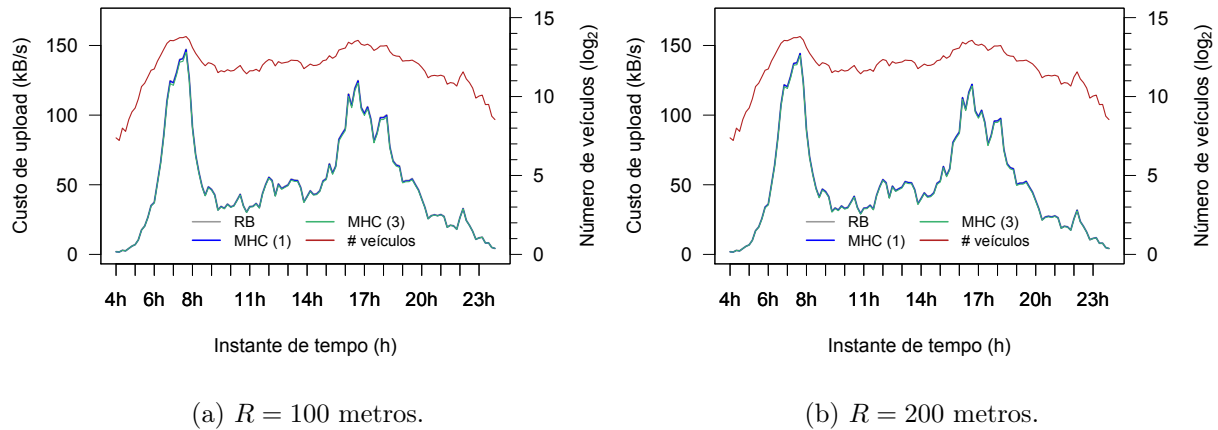


Figura 5.12. Custos de *upload* na condição de pior caso.

Além do mecanismo de confirmação, outras melhorias são possíveis para o MHC. Por exemplo, alguns veículos podem ser selecionados para o conjunto dominante mesmo quando todos os seus vizinhos foram dominados por outros veículos em S . Neste caso, embora o veículo seja selecionado como um agregador de dados, ele não estará agregando dados de vizinhos. É possível explorar conceitos de computação nas bordas e realizar uma nova ronda de seleção de agregadores, em que veículos em S executariam uma nova instância do MHC. Nesta nova seleção, o MHC teria como entrada apenas a estrutura de vizinhança do veículo, que também incluiria agregadores na borda que não dominaram outros veículos. Resultados preliminares mostraram que é possível reduzir o número de agregadores isolados sem violar as restrições do problema.

5.1.3 Discussão geral dos resultados

Esta seção discute os resultados encontrados na análise preliminar, que considerou duas condições de agregação local. A análise da rede nos fornece informações importantes para compreender como as suas características podem afetar diretamente o comportamento do MHC. Este trabalho modelou a comunicação D2D a partir de duas faixas de transmissão, 100 e 200 metros. Desta forma, foi possível estudar o *offloading* de dados considerando dois níveis de fragmentação da rede.

Um grande número de veículos isolados na rede pode piorar o custo de transmissão na rede celular, são veículos que em razão de sua disposição geográfica não puderam descarregar seus dados através de conexões D2D. Como pode ser observado na Figura 5.13, o número de veículos isolados é maior quando o volume de veículos é menor, pois há menos oportunidades de fazer o *offloading* dos dados. Consequentemente, cada

veículo isolado terá de transmitir seus dados individualmente para estação-base. Este comportamento não se mostra como um problema crítico, pois poucos veículos estarão conectados na rede celular.

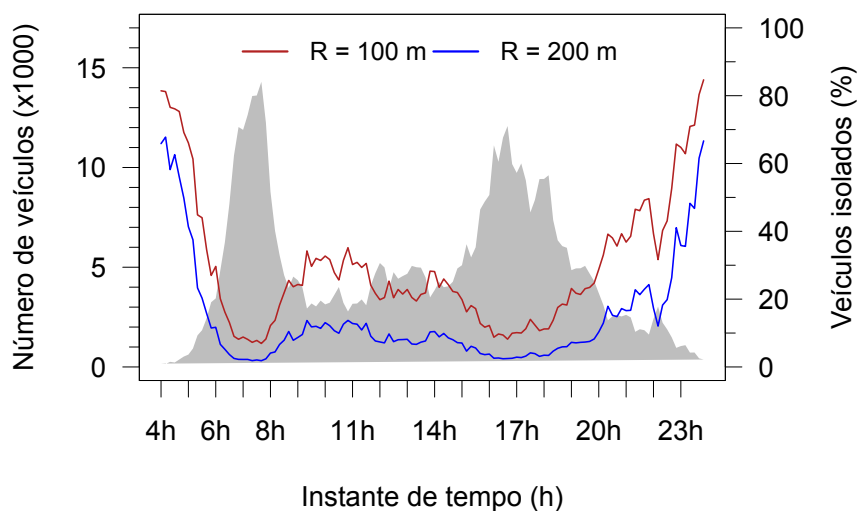


Figura 5.13. Número de veículos isolados na rede.

A mobilidade dos veículos traz um desafio para o *offloading* dos dados, pois a estrutura topológica da rede muda constantemente em um curto instante de tempo. Desconexões frequentes podem gerar uma alta fragmentação da rede e dificultar o processo de descarregamento *multi-hop*, em que os dados precisarão percorrer uma certa distância para chegarem ao veículo agregador. Por isso é importante analisar este aspecto da rede em diferentes instantes de tempo. A Figura 5.14 mostra o tamanho das componentes conexas formadas em momentos específicos do cenário, que compreendem os horários de trânsito intenso (7h e 17h) e moderado (13h 20h). Uma componente conexa consiste de um subgrafo em que cada um de seus vértices pode ser acessado pelos demais. Componentes conexas são disjuntas em relação aos vértices e sua união constitui a rede original. Os gráficos também mostram o diâmetro de cada componente conexa. O diâmetro da rede diz respeito ao tamanho do caminho mínimo mais longo dentre todos os caminhos mínimos no grafo. É importante compreender esta medida pois refere-se à distância máxima que um pacote irá precisar percorrer.

A partir destes resultados foi possível concluir:

- **A rede é altamente fragmentada quando o alcance de transmissão é curto:** Por exemplo, o menor alcance de transmissão teve 1.910 componentes conexas às 7h. A fragmentação da rede pode ser reduzida ao aumentar o alcance de transmissão. Com 200 metros, a rede teve 352 componentes conexas neste

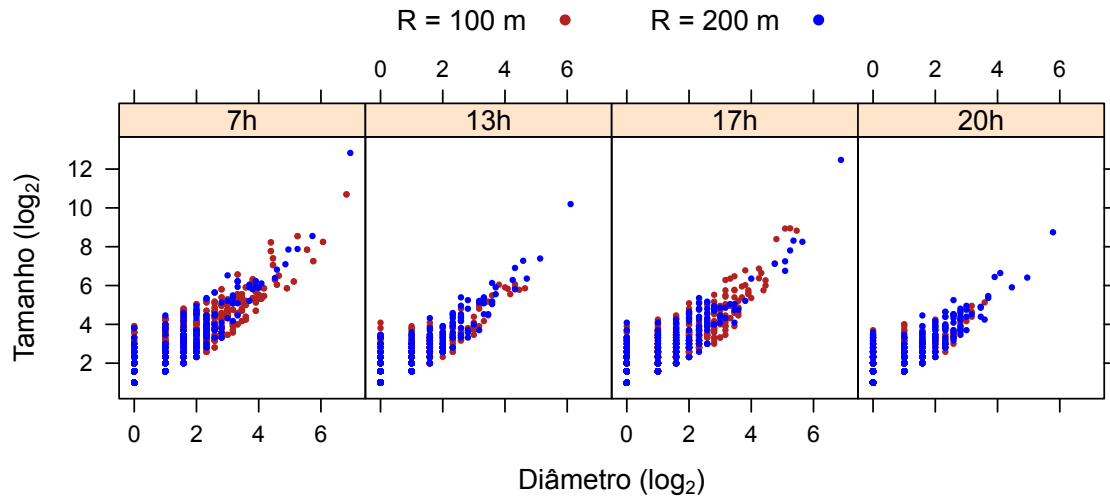


Figura 5.14. Tamanho e diâmetro das componentes conexas.

mesmo instante de tempo. Conforme os resultados apresentados, o *multi-hop* pode ser melhor explorado quando a rede é menos fragmentada.

- **Embora a rede possua algumas estruturas densamente conectadas, no geral, ela é altamente fragmentada:** Mais de 70% das componentes conexas foram formadas por menos de 10 veículos. Este percentual chegou a ultrapassar 90% quando o raio foi de 100 metros. Isto sugere que até os veículos isolados geograficamente tendem a formar conexões D2D, em que foi possível realizar o *offloading* mesmo que em agrupamentos pequenos.
- **A maior componente conexa da rede tende a ter uma quantidade consideravelmente maior de veículos que as demais:** Em certos momentos, a maior componente chegou a ser composta por mais de 60% dos veículos na rede. Esta componente corresponde à maior fração da rede dentro da qual a comunicação é possível, trata-se de uma medida de eficiência da rede [Newman, 2003]. Além disso, ela é responsável pela maior parte do custo de *upload* e sua alta conectividade favorece estratégias de *offloading*, que aqui são indispensáveis dado a grande quantidade de dados que são originados.
- **Mais de 75% das componentes conexas possuem um diâmetro menor que 4:** Este percentual ultrapassou 93% no cenário de trânsito moderado. Isto mostra que a capacidade de *offloading* é limitada a um número reduzido de saltos. Por isso, os parâmetros d e k foram variados com valores menores que 5.

Importante mencionar que o diâmetro da maior componente conexa foi de 123, o que sugere que ainda é possível utilizar valores bem maiores.

Ademais, há um *trade-off* entre o desempenho do *offloading* e a latência da rede, pois um valor alto para d garante que menos veículos necessitarão utilizar o *uplink* celular. Em contrapartida, haverá um impacto direto na latência, visto que os dados de sensoriamento necessitarão percorrer longas distâncias a fim de atingirem o veículo responsável pelo *upload*. Esta situação pode degradar a QoS do sensoriamento em uma aplicação com restrições de latência, como um sensoriamento online, por exemplo. Evidentemente, aumentar o raio de transmissão, além de reduzir a fragmentação da rede e o número de veículos isolados, também pode degradar a qualidade de serviço, pois uma rede densamente conectada exige mais tempo para determinar os veículos retransmissores.

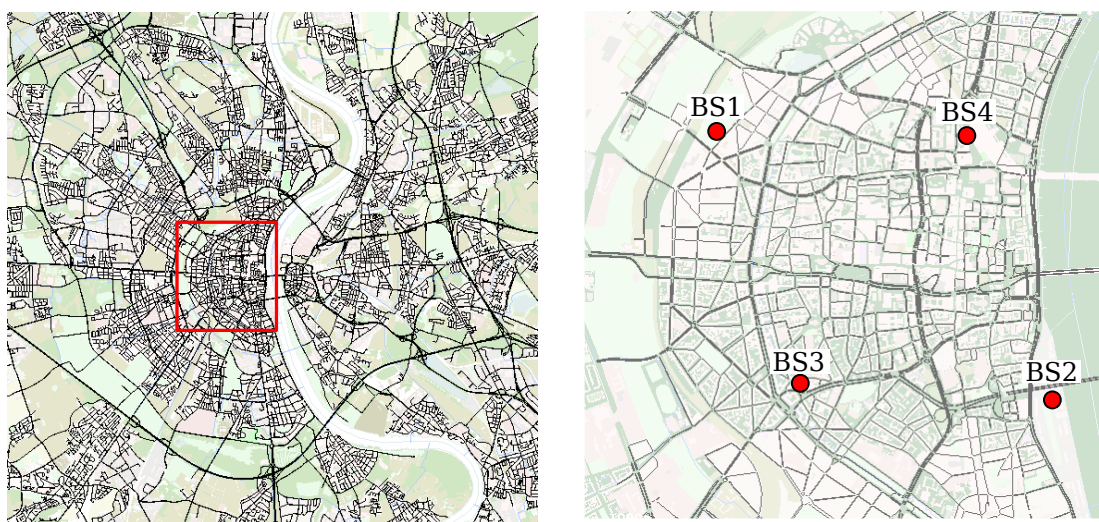
O cálculo da métrica de centralidade exige a computação dos caminhos mínimos na rede, isto gera um alto custo de execução quando a rede é densamente conectada. O MHC delimita o diâmetro do cálculo através do ajuste dos parâmetros d e k , desta forma seria possível adaptar os parâmetros em tempo real, ajustando seus valores conforme as características do tráfego rodoviário e as condições da rede. Por exemplo, um cenário extremamente conectado foi avaliado através de $R = 400$ metros. Foi possível encontrar a solução ótima em um tempo menor que o MHC em instâncias menores do problema, quando o trânsito é tipicamente moderado. Porém, durante o horário de pico, quando a rede contabilizou mais de 14 mil veículos, computar a solução ótima tornou-se inviável. O CPLEX levou cerca de 29 minutos para encontrar a solução ótima, enquanto que o MHC levou cerca de 4 minutos utilizando os parâmetros mínimos. Embora o MHC necessite de mais tempo de execução do que o CPLEX quando o cenário exibe um tráfego veicular moderado, as duas soluções podem ser combinadas em uma estratégia adaptativa. A solução ótima pode ser calculada para instâncias menores do problema, enquanto que o MHC pode ser aplicado quando o cálculo da solução ótima não for capaz de cumprir com os requisitos de tempo de *upload*.

5.2 Avaliação bidirecional

Esta segunda parte dos experimentos consiste de uma avaliação mais realista a partir de um ambiente de simulação. A mobilidade altamente dinâmica é um dos aspectos que distinguem uma rede veicular de outras redes sem fio. Essencialmente, a simulação de uma VANET requer dois tipos de componentes de simulação, a simulação de rede e a simulação de mobilidade [Noori, 2012]. Modelos de mobilidade foram desenvol-

vidos com o objetivo de descrever a mobilidade dos veículos com maior precisão, de acordo com a forma como o fluxo de tráfego é examinado, os modelos de mobilidade são classificados em macroscópicos, mesoscópicos e microscópicos [Sommer & Dressler, 2014]. Neste trabalho, a simulação de mobilidade foi possível através do *SUMO* (*Simulation of Urban Mobility*) [Behrisch et al., 2011], um simulador de tráfego livre e aberto composto de ferramentas que dão apoio à simulação microscópica.

As simulações foram realizadas em uma máquina Intel Core i5-7200U 2.50GHz com 8 GB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu 16.04 LTS. A simulação de rede foi possível através do *Veins* [Sommer et al., 2011] e do *SimuLTE* [Virdis et al., 2015]. O *Veins* é um simulador de rede veicular capaz de modelar a influência das redes veiculares sobre o tráfego rodoviário e examinar as interações entre os dois domínios. O *SimuLTE* oferece uma estrutura de simulação para o plano de dados das redes LTE/LTE-Advanced (LTE-A), através de um modelo detalhado da pilha de protocolos LTE, e incorpora a possibilidade de comunicações D2D. Desta forma, através da integração entre os simuladores mencionados foi possível simular comunicações celulares em um ambiente de rede veicular [Nardini et al., 2017].



(a) Distrito de *Innenstadt* em destaque.

(b) Localização das estações celulares.

Figura 5.15. Topologia do cenário utilizado na simulação de mobilidade.

Uma rede veicular abrange uma grande área geográfica, como uma cidade, consequentemente um ambiente multicelular deve ser considerado. Para a simulação de rede, quatro estações-base foram posicionadas de modo a oferecer cobertura completa a todo o cenário. Entretanto, em razão do alto custo para a simulação de rede e mo-

bilidade, os experimentos limitaram-se a uma área de 6.38 km^2 extraída do cenário de Colônia. O cenário utilizado na segunda parte dos experimentos corresponde ao distrito *Innenstadt*, região central de Colônia. A área do novo cenário foi especificado com a ferramenta *netconvert* e, em seguida, as rotas foram filtradas com o *cuteroutes*. Ambas as ferramentas estão disponíveis no *SUMO* para auxiliar na criação e edição de novas redes. A Figura 5.2(a) mostra o distrito de *Innenstadt* e a Figura 5.2(b) mostra local onde cada BS foi instalada.

Os parâmetros da simulação são detalhados na Tabela 5.6. Por causa de seu alto custo, os experimentos limitaram-se a reproduzir 10 minutos de simulação, um período correspondente ao intervalo entre 7h e 7h10min nos traços de mobilidade de Colônia. Aqui, o serviço de descoberta de vizinhos foi baseado na troca de mensagens *beacons* entre veículos, que foram transmitidas a cada 300 milissegundos. Cada veículo enviou sua estrutura de vizinhança para a estação-base em um canal de controle. A estação utilizou estas informações trocadas localmente entre veículos para modelar a rede de comunicação V2V e executou o MHC a cada 10 segundos. Além disso, a simulação também incluiu o *Handover*, em que um veículo poderia se associar a outra BS, e fenômenos como *path loss* e ruído termal.

Tabela 5.6. Parâmetros da simulação.

Parâmetro	Valor
Área	2.2 km x 2.9 km
Tempo de simulação	10 minutos
Intervalo de <i>upload</i>	10 segundos
Intervalo de <i>Beacons</i>	300 milissegundos
Rede complementar	D2D
<i>Handover</i>	Habilitado
Frequência	2 GHz
Potência de transmissão	eNodeB: 46mW / D2D: 26mW
Ganho da Antena	eNodeB: 18 dBi / UE: 0 dBi
<i>Path loss</i>	ITU-R, Urban Macro Cell model
Ruído termal	-104.5dBm

Na avaliação bidirecional foi avaliado o ganho do sistema, em que foi possível determinar o número de transmissões no *uplink* celular, o custo de *upload*. Foi assumido um custo de *upload* constante, em que cada veículo conseguiu realizar a agregação na

condição de melhor caso. Cada pacote transmitido para a estação tinha uma carga útil de 100 bytes e 20 bytes de cabeçalho. O MHC foi executado de forma descentralizada, em cada estação, e seus resultados foram comparados aos do RB.

5.2.1 Resultados

Tendo em vista que o cenário foi reduzido, bem como as possibilidades de comunicação *multi-hop*, os parâmetros do MHC foram variados de 1 a 3. O Teste de *Shapiro-Wilk* indicou que as amostras não seguiam uma distribuição normal, por isso os resultados também foram avaliados com o teste de *Wilcoxon* com um nível de confiança de 95%. A Tabela 5.7 sumariza os resultados obtidos ao variar o valor de k no cenário de salto único. Novamente, o valor de k maior que d trouxe melhores resultados, mas este aumento limitou-se a k igual a 2. Isto sugere que o diâmetro da rede ficou entorno deste valor, note que no cenário original cada componente tinha em média 3 ou 4 saltos de diâmetro. O cálculo de centralidade também foi menos sensível nos outros valores de d , porém o aumento no número de saltos ainda trouxe uma melhora no custo de *upload*.

Tabela 5.7. Avaliação dos parâmetros do MHC (*single-hop*).

Corte (k)	(Pseudo) Mediana	Intervalo de confiança (95%)	
		Inferior	Superior
1	0.73	0.61	0.86
2	0.61	0.51	0.71
3	0.61	0.51	0.71

A Figura 5.16 mostra o custo de *upload* do MHC para cada valor de d , em que o parâmetro k foi fixado em 3. O gráfico também mostra o custo de *upload* na abordagem tradicional, isto é, quando cada veículo faz o *upload* individual de seus dados. Este custo é diretamente proporcional ao número de veículos. Por isso, o custo de *upload* ao final da simulação foi de 3.6 kB/s. As técnicas de *offloading* reduziram o custo de *upload* de modo considerável. Dentre as abordagens, o MHC com 3 saltos obteve os melhores resultados, com um custo de até 0.60 kB/s. Isto representa uma redução de até 83% em relação ao custo de *upload* individual e 63% em relação ao RB.

O ganho do sistema também foi avaliado. A Figura 5.17 mostra a comparação entre os resultados obtidos pelo MHC e o RB. Além do o ganho do sistema, o gráfico também mostra o número de veículos no cenário ao longo do tempo. A simulação

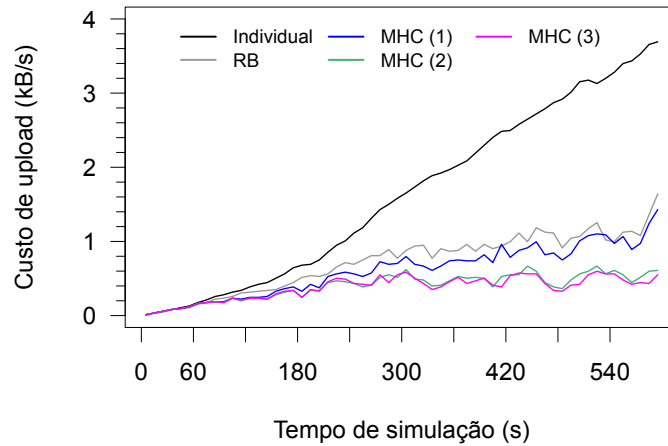


Figura 5.16. Comparação do custo de *upload*.

começa sem veículos e eles gradativamente vão aparecendo no cenário, alcançando o valor de 315 veículos. Em razão da baixa densidade de veículos, a maioria dos veículos fez o *upload* individual de seus dados, por isso o ganho do sistema foi abaixo de 10% no primeiro minuto de simulação. Quando a densidade veicular se intensifica, o MHC chegou a obter uma melhora de até 43% em relação ao RB. Através da comunicação multi-hop foi possível transmitir os dados de sensoriamento utilizando apenas 12.44% dos veículos.

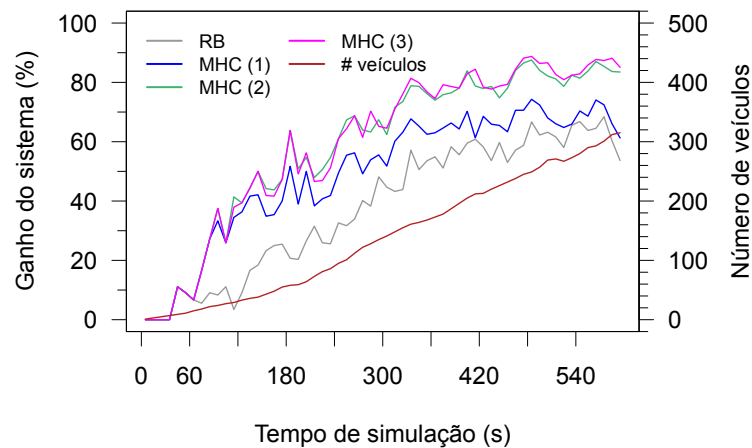


Figura 5.17. Comparação do ganho do sistema.

Para acompanhar a eficácia das soluções avaliadas, a Tabela 5.8 contém os resultados do teste pareado. Os p-valores foram menores que o nível de significância em todas as diferenças, com execução dos pares MHC (1) e MHC (3). Isto indica que

a amostra em questão não possui diferença estatística, assim aumentar o número de saltos não trouxe benefício aparente. Estes resultados corroboram com a ideia de que a densidade de veículos pode ter reduzido o diâmetro das componentes conexas na rede, dificultando a comunicação multi-hop a longas distâncias.

Tabela 5.8. Resultados do teste pareado para o ganho do sistema.

Pares	(Pseudo) Mediana	p-valor	Intervalo de confiança (95%)	
			Inferior	Superior
MHC (1) - RB	0.12	2.455e-10	0.10	0.15
MHC (2) - RB	0.23	2.454e-10	0.22	0.23
MHC (3) - RB	0.24	2.456e-10	0.23	0.26
MHC (1) - MHC (2)	-0.12	7.79e-10	-0.13	-0.10
MHC (1) - MHC (3)	-0.12	7.787e-10	-0.14	-0.11
MHC (2) - MHC (3)	0.00	0.08657	-0.02	0.00

Por causa do alto custo em simular simultaneamente rede e mobilidade, não foi possível reproduzir a área completa do cenário. Ferramentas disponíveis no SUMO permitiram simular a área central da cidade, que chegou a contabilizar cerca de 49 veículos por km^2 . Embora o cenário simulado seja menor, cerca de 63 vezes menor que a área do cenário original, os resultados encontrados mostraram que o MHC conseguiu uma redução significativa em relação ao RB.

Capítulo 6

Considerações Finais

O aumento sem precedentes do tráfego de dados móveis tem pressionado a capacidade dos atuais sistemas celulares, que incapazes de lidar com demandas cada vez maiores, necessitam de meios para reduzir a sobrecarga nas infraestruturas celulares. As redes de sensores veiculares possibilitam o sensoriamento móvel do ambiente urbano, porém a aquisição de uma quantidade massiva de dados de sensoriamento pode gerar uma carga significativa na rede celular e degradar a sua capacidade.

Este trabalho apresentou uma abordagem para fazer o *offloading* dos dados de sensoriamento em uma rede de sensores veiculares. Para isto, os dados que seriam originalmente transmitidos na rede celular serão migrados para uma rede complementar e de baixo custo, baseada em comunicação D2D, para serem submetidos a alguma técnica de redução de dados antes do *upload* para a estação-base. O problema foi modelado como uma instância do *d-hop dominating set* e um algoritmo baseado em medida de centralidade foi proposto para determinar um subconjunto de veículos responsáveis pela agregação e *upload* dos dados.

Os experimentos foram realizados a partir dos traços de mobilidade da cidade de Colônia, uma das maiores bases de dados disponíveis na literatura. A primeira parte dos experimentos avaliou a viabilidade da solução, que considerou duas condições básicas de agregação local. A análise preliminar revelou que o MHC possui um melhor desempenho quando é possível obter a agregação máxima dos dados. Os resultados mostraram uma redução de até 155.40 kB/s (cerca de 92.77%) em relação ao custo do *upload* tradicional. Quando comparado ao algoritmo baseado em reserva de tempo, o MHC conseguiu reduzir até 14.76 kB/s no custo de *upload*, isto representa uma redução de até 32.86%. Mesmo no pior cenário de agregação local ainda foi possível obter uma redução significativa no custo de *upload*. Quando um mecanismo de confirmação é utilizado foi possível reduzir até 24.59 kB/s (cerca de 14.68%) em relação ao *upload*

tradicional.

A segunda parte considerou um ambiente simulado, porém, dado a sua complexidade, o estudo concentrou-se em avaliar principalmente as métricas do algoritmo. Quatro infraestruturas celulares foram posicionadas no cenário para execução do MHC, que operou de modo descentralizado. Em conformidade com os resultados encontrados na análise preliminar, o MHC obteve uma redução de até 83% em relação ao custo de *upload* individual e 63% em relação ao custo de *upload* do algoritmo RB. Quando a comunicação *multi-hop* foi utilizada para a agregação dos dados foi possível obter um ganho do sistema de quase 90%.

As avaliações mostraram que o MHC pode resolver parcialmente o problema definido no capítulo 1. Embora o algoritmo não obtenha a solução ótima, foi possível reduzir significativamente o tráfego de dados de sensoriamento na rede celular. Com relação à primeira hipótese (seção 1.1), que diz que a agregação de dados na comunicação *multi-hop* pode reduzir significativamente o custo de *upload*, os resultados obtidos sugerem que esta hipótese pode ser aceita, porém a técnica de agregação deve ser levada em consideração. Nos resultados iniciais da condição de pior caso houve um aumento no custo de *upload*, note que dados redundantes estavam sendo transmitidos. A inclusão do mecanismo de confirmação excluiu os dados redundantes e trouxe uma redução significativa, mesmo quando os dados individuais de cada veículo necessitavam ser transmitidos. Fica claro que a técnica de redução de dados interfere diretamente no desempenho da solução, ainda assim a comunicação *multi-hop* reduz significativamente o custo de *upload*, mas desde que dados redundantes não sejam transmitidos.

A segunda hipótese (seção 1.1), que diz a que medida de centralidade pode ser utilizada para selecionar os veículos responsáveis pela agregação e *upload*, também pode ser confirmada. O MHC obteve melhores resultados que o RB em todos os cenários avaliados, além disso, a análise do parâmetro k permitiu estudar a sensibilidade da medida de centralidade. Os resultados do MHC melhoraram conforme a medida de centralidade estimada se aproximou de seus valores reais. Embora o cálculo do *closeness centrality* seja custoso em redes densamente conectadas, a redução do diâmetro do cálculo trouxe resultados significativos mesmo sem computar todos os caminhos mínimos.

Por serem tecnologias muito recentes alguns desafios ainda precisam ser superados. Um dos principais desafios é o padrão de mobilidade altamente dinâmico da rede veicular, que dificulta a disseminação de mensagens na rede e a manutenção dos agrupamentos formados pelos veículos. Como a topologia da rede muda constantemente, o algoritmo necessita ser executado antes de cada período de coleta, gerando um maior *overhead* na rede. A adoção da comunicação D2D da quinta geração de

telegonia celular irá aumentar a capacidade de sensoriamento da rede, em que vários dispositivos com capacidade de sensoriamento poderão contribuir com novas informações. No entanto, a heterogeneidade das fontes de informações é outro desafio a ser superado. Além disso, embora uma grande quantidade de dados forneça uma melhor amostragem do ambiente sensoreado, a necessidade de sensoriamento em tempo real requer meios de prover escalabilidade a rede e garantir os requisitos de QoS.

Finalmente, como possíveis trabalhos futuros sugere-se:

- Incorporar ao MHC as informações de mobilidade veicular. Técnicas de predição de rotas poderiam ser utilizadas para auxiliar na seleção dos veículos *uploaders*. Deste modo seria possível garantir uma maior estabilidade nos agrupamentos formados, reduzindo o esforço de computação bem como o de roteamento.
- Considerar a natureza dos dados de sensoriamento. O sensoriamento pode ter classes distintas de serviços, sendo assim seria possível dar um tratamento diferenciado aos dados com base nos requisitos de QoS, privilegiando o *upload* de dados de veículos com restrições rigorosas de sensoriamento.
- Considerar o *offloading* numa perspectiva de redes tolerantes a atrasos. A alta fragmentação da rede força o *upload* individual dos dados de sensoriamento de veículos isolados, conexões oportunistas poderiam ser exploradas de modo a permitir o *offloading* de dados em um sensoriamento tolerante a atrasos. Deste modo, um veículo isolado poderia armazenar seus dados e aguardar uma oportunidade de fazer o *offloading* através de uma eventual conexão D2D.

Referências Bibliográficas

- Abdelhamid, S.; Hassanein, H. S. & Takahara, G. (2014). Vehicle as a mobile sensor. *Procedia Computer Science*, 34:286–295. ISSN 18770509.
- Agiwal, M.; Roy, A. & Saxena, N. (2016). Next generation 5g wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18(3):1617–1655. ISSN 1553-877X.
- Amis, A. D.; Prakash, R.; Vuong, T. H. P. & Huynh, D. T. (2000). Max-min d-cluster formation in wireless ad hoc networks. Em *Proceedings IEEE INFOCOM 2000*, volume 1, pp. 32–41 vol.1, Tel Aviv, Israel, Israel. IEEE.
- Ancona, S.; Stanica, R. & Fiore, M. (2014). Performance boundaries of massive floating car data offloading. Em *Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services*, pp. 89–96, Obergurgl, Austria. IEEE.
- Ansari, R. I.; Chrysostomou, C.; Hassan, S. A.; Guizani, M.; Mumtaz, S.; Rodriguez, J. & Rodrigues, J. J. P. C. (2018). 5g d2d networks: Techniques, challenges, and future prospects. *IEEE Systems Journal*, 12(4):3970–3984.
- Asadi, A.; Wang, Q. & Mancuso, V. (2014). A survey on device-to-device communication in cellular networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 16(4):1801–1819. ISSN 1553-877X.
- Banerjee, J.; Das, A. & Sen, A. (2014). Analysis of d-hop dominating set problem for directed graph with indegree bounded by one. *CoRR*, abs/1404.6890.
- Bazzi, A.; Masini, B. M.; Zanella, A. & Pasolini, G. (2015). IEEE 802.11p for cellular offloading in vehicular sensor networks. *COMPUTER COMMUNICATIONS*, 60:97–108. ISSN 0140-3664.
- Behrisch, M.; Bieker, L.; Erdmann, J. & Krajzewicz, D. (2011). Sumo – simulation of urban mobility. *The Third International Conference on Advances in System Simulation*, pp. 55–60.

- Campolo, C.; Molinaro, A. & Scopigno, R. (2015). *Vehicular ad hoc Networks: Standards, Solutions, and Research*. Springer, 1 edição.
- Costa, L. D.; Rodrigues, F. a.; Travieso, G. & Boas, P. R. V. (2007). Characterization of complex networks: a survey of measurements. *Advances in Physics*, 56(1):167--242.
- Dhand, G. & Tyagi, S. (2016). Data aggregation techniques in wsn:survey. *Procedia Computer Science*, 92:378 – 384.
- Du, R.; Chen, C.; Yang, B.; Lu, N.; Guan, X. & Shen, X. (2015). Effective urban traffic monitoring by vehicular sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(1):273–286.
- Dua, A.; Kumar, N. & Bawa, S. (2017). Game theoretic approach for real-time data dissemination and offloading in vehicular ad hoc networks. *Journal of Real-Time Image Processing*, 13(3):627--644. ISSN 1861-8219.
- Forecast, C. V. (2017). Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>. [Acesso em: 25 nov. 2018].
- Freeman, L. C. (1978). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social Networks*, 1(3):215 – 239. ISSN 0378-8733.
- Gandotra, P. & Jha, R. K. (2016). Device-to-device communication in cellular networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 71:99 – 117. ISSN 1084-8045.
- Gubbi, J.; Buyya, R.; Marusic, S. & Palaniswami, M. (2013). Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7):1645 – 1660. ISSN 0167-739X. Including Special sections: Cyber-enabled Distributed Computing for Ubiquitous Cloud and Network Services & Cloud Computing and Scientific Applications — Big Data, Scalable Analytics, and Beyond.
- Hartenstein, H. & Laberteaux, K. (2010). *VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*. Wiley.
- Haus, M.; Waqas, M.; Ding, A. Y.; Li, Y.; Tarkoma, S. & Ott, J. (2017). Security and privacy in device-to-device (d2d) communication: A review. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(2):1054–1079. ISSN 1553-877X.

- Hu, S.-C.; Wang, Y.-C.; Huang, C.-Y. & Tseng, Y.-C. (2011). Measuring air quality in city areas by vehicular wireless sensor networks. *Journal of Systems and Software*, 84(11):2005 – 2012. ISSN 0164-1212. Mobile Applications: Status and Trends.
- Journal, M. (2017). Automotive Sensors and Electronics Expo 2017. <http://www.automotivesensors2017.com/>. [Acesso em: 05 abr. 2019].
- Kar, U. N. & Sanyal, D. K. (2018). An overview of device-to-device communication in cellular networks. *ICT Express*, 4(4):203 – 208. ISSN 2405-9595.
- Khaliq, K. A.; Qayyum, A. & Pannek, J. (2017). Prototype of automatic accident detection and management in vehicular environment using vanet and iot. Em *2017 11th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA)*, pp. 1–7. ISSN 2573-3214.
- Kolios, P.; Ellinas, G. & Panayiotou, C. (2013). Vehicular Data Offloading under Uncertain Journey Planners. Em *2013 INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONNECTED VEHICLES AND EXPO (ICCVE)*, International Conference on Connected Vehicles and Expo, pp. 544–550. ISSN 2378-1289.
- Kombate, D. & Wanglina (2017). The Internet of Vehicles Based on 5G Communications. *Proceedings - 2016 IEEE International Conference on Internet of Things; IEEE Green Computing and Communications; IEEE Cyber, Physical, and Social Computing; IEEE Smart Data, iThings-GreenCom-CPSCoM-Smart Data 2016*, pp. 445--448.
- Kumar, N.; Misra, S. & Obaidat, M. S. (2015). Collaborative learning automata-based routing for rescue operations in dense urban regions using vehicular sensor networks. *IEEE Systems Journal*, 9(3):1081–1090. ISSN 1932-8184.
- Lee, S. & Lee, S. (2013). User-centric offloading to WLAN in WLAN/3G vehicular networks. *Wireless Personal Communications*, 70(4):1925--1940. ISSN 09296212.
- Lee, U.; Magistretti, E.; Gerla, M.; Bellavista, P. & Corradi, A. (2009). Dissemination and harvesting of urban data using vehicular sensing platforms. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(2):882--901. ISSN 00189545.
- Lee, U.; Magistretti, E.; Gerla, M.; Bellavista, P.; Liò, P. & Lee, K. W. (2008). Bio-inspired multi-agent collaboration for urban monitoring applications. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 5151 LNCS:204--216. ISSN 03029743.

- Lee, U.; Magistretti, E.; Zhou, B.; Gerla, M.; Bellavista, P. & Corradi, A. (2006). Efficient data harvesting in mobile sensor platforms. Em *Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'06)*, pp. 5 pp.–356. ISSN .
- Li, Y.; Jin, D.; Wang, Z.; Zeng, L. & Chen, S. (2014). Coding or Not: Optimal Mobile Data Offloading in Opportunistic Vehicular Networks. *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, 15(1):318–333. ISSN 1524-9050.
- Li, Z.; Liu, Y.; Zhu, H. & Sun, L. (2015). Coff: Contact-duration-aware cellular traffic offloading over delay tolerant networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(11):5257–5268. ISSN 0018-9545.
- Lin, Y.-D.; Ku, C.-Y.; Lai, Y.-C. & Liang, Y.-H. (2018). Wi-fi offloading between lte and wlan with combined ue and bs information. *Wireless Networks*, 24(4):1033–1042. ISSN 1572-8196.
- Mao, G.; Zhang, Z. & Anderson, B. D. O. (2016). Cooperative Content Dissemination and Offloading in Heterogeneous Mobile Networks. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, 65(8):6573–6587. ISSN 0018-9545.
- Mezghani, F.; Dhaou, R.; Nogueira, M. & Beylot, A.-L. (2016). Offloading Cellular Networks Through V2V Communications - How to Select the Seed-Vehicles? Em *2016 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC)*, IEEE International Conference on Communications. IEEE; IEEE Commun Soc. ISSN 1550-3607.
- Nardini, G.; Viridis, A. & Stea, G. (2017). Simulating cellular communications in vehicular networks: making SimuLTE interoperable with Veins. (September).
- Newman, M. E. J. (2003). The structure and function of complex networks. *Dialogues in clinical neuroscience*, 45(2):167–256. ISSN 1958-5969.
- Newman, M. J. (2005). A measure of betweenness centrality based on random walks. *Social Networks*, 27(1):39 – 54. ISSN 0378-8733.
- Noori, H. (2012). Realistic urban traffic simulation as vehicular ad-hoc network (vanet) via veins framework. Em *2012 12th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, pp. 1–7. ISSN .

- Nunes, D. F.; Moreira, E. S.; Kimura, B. Y.; Sastry, N. & Mahmoodi, T. (2017). Attraction-Area Based Geo-Clustering for LTE Vehicular CrowdSensing Data Offloading. *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems - MSWiM '17*, pp. 323--327.
- Radu, D.; Avram, C.; Aştilean, A.; Parrein, B. & Yi, J. (2012). Acoustic noise pollution monitoring in an urban environment using a vanet network. Em *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, pp. 244--248. ISSN .
- Rebecchi, F.; Dias de Amorim, M.; Conan, V.; Passarella, A.; Bruno, R. & Conti, M. (2015). Data offloading techniques in cellular networks: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(2):580--603. ISSN 1553-877X.
- Reddy, P. R. K.; Joshna, P. & Sireesha, G. (2012). Data collection through vehicular sensor networks. *CoRR*, abs/1206.6281.
- Salvo, P.; Turcanu, I.; Cuomo, F.; Baiocchi, A. & Rubin, I. (2016). LTE Floating Car Data application off-loading via VANET driven clustering formation. Em *2016 12TH ANNUAL CONFERENCE ON WIRELESS ON-DEMAND NETWORK SYSTEMS AND SERVICES (WONS)*, pp. 192--199.
- Sommer, C. & Dressler, F. (2014). *Vehicular Networking*. Cambridge University Press.
- Sommer, C.; German, R. & Dressler, F. (2011). Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 10(1):3--15.
- Stanica, R.; Fiore, M. & Malandrino, F. (2013). Offloading floating car data. *2013 IEEE 14th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM 2013*, pp. 1--9.
- Sun, W.; Ström, E. G.; Brännström, F.; Sui, Y. & Sou, K. C. (2014). D2d-based v2v communications with latency and reliability constraints. Em *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1414--1419. ISSN 2166-0077.
- Tehrani, M. N.; Uysal, M. & Yanikomeroglu, H. (2014). Device-to-device communication in 5g cellular networks: challenges, solutions, and future directions. *IEEE Communications Magazine*, 52(5):86--92. ISSN 0163-6804.

- Uppoor, S.; Trullols-Cruces, O.; Fiore, M. & Barcelo-Ordinas, J. M. (2014). Generation and analysis of a large-scale urban vehicular mobility dataset. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13(5):1061--1075.
- Vannithamby, R. & Talwar, S. (2017). *Towards 5G: Applications, Requirements and Candidate Technologies*. Wiley. ISBN 9781118979839.
- Virdis, A.; Stea, G. & Nardini, G. (2015). Simulating lte/lte-advanced networks with simulte. Em Obaidat, M. S.; Ören, T.; Kacprzyk, J. & Filipe, J., editores, *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, pp. 83--105, Cham. Springer International Publishing.
- Wang, J.; Jiang, C.; Zhang, K.; Quek, T. Q. S.; Ren, Y. & Hanzo, L. (2018). Vehicular sensing networks in a smart city: Principles, technologies and applications. *IEEE Wireless Communications*, 25(1):122--132. ISSN 1536-1284.
- Xenakis, D.; Kountouris, M.; Merakos, L.; Passas, N. & Verikoukis, C. (2016). Performance analysis of network-assisted d2d discovery in random spatial networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(8):5695--5707.
- Yu, J.; Wang, N.; Wang, G. & Yu, D. (2013). Review: Connected dominating sets in wireless ad hoc and sensor networks - a comprehensive survey. *Comput. Commun.*, 36(2):121--134. ISSN 0140-3664.
- Yuan, Q.; Li, J.; Liu, Z. & Yang, F. (2016). Space and time constrained data offloading in vehicular networks. Em *2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*, pp. 398--405. ISSN .
- Zeadally, S.; Hunt, R.; Chen, Y.-S.; Irwin, A. & Hassan, A. (2012). Vehicular ad hoc networks (vanets): status, results, and challenges. *Telecommunication Systems*, 50(4):217--241. ISSN 1572-9451.
- Zhu, X.; Li, Y.; Jin, D. & Lu, J. (2017). Contact-Aware Optimal Resource Allocation for Mobile Data Offloading in Opportunistic Vehicular Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(8):7384--7399. ISSN 00189545.