UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação

Uso de comunicação V2V para o descarregamento de dados em redes celulares: uma estratégia baseada em clusterização geográfica para apoiar o sensoriamento veicular colaborativo

Douglas Fabiano de Sousa Nunes

Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Computação e Matemática Computacional (PPG-CCMC)

SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO ICMC-USP

Data de Depósito:

Assinatura: _____

Douglas Fabiano de Sousa Nunes

Uso de comunicação V2V para o descarregamento de
dados em redes celulares: uma estratégia baseada em
clusterização geográfica para apoiar o sensoriamento
veicular colaborativo

Tese apresentada ao Instituto de Ciências
Matemáticas e de Computação – ICMC-USP,
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Doutor em Ciências – Ciências de Computação e
Matemática Computacional. *VERSÃO REVISADA*

Área de Concentração: Ciências de Computação e
Matemática Computacional

Orientador: Prof. Dr. Edson dos Santos Moreira

USP – São Carlos
Fevereiro de 2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Achille Bassi
e Seção Técnica de Informática, ICMC/USP,
com os dados inseridos pelo(a) autor(a)

N972u Nunes, Douglas Fabiano de Sousa
 Uso de comunicação V2V para o descarregamento de
 dados em redes celulares: uma estratégia baseada em
 clusterização geográfica para apoiar o sensoriamento
 veicular colaborativo / Douglas Fabiano de Sousa
 Nunes; orientador Edson dos Santos Moreira. -- São
 Carlos, 2019.
 122 p.

 Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
 Ciências de Computação e Matemática Computacional) --
 Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação,
 Universidade de São Paulo, 2019.

 1. Descarregamento de dados móveis. 2.
 Sensoriamento veicular colaborativo. 3. Redes
 veiculares. 4. Clusterização veicular geográfica. 5.
 VANET. I. Moreira, Edson dos Santos, orient. II.
 Título.

Douglas Fabiano de Sousa Nunes

On the use of V2V communication for cellular data
offloading: a geographic clustering-based strategy to
support vehicular crowdsensing

Doctoral dissertation submitted to the Institute of
Mathematics and Computer Sciences – ICMC-USP, in
partial fulfillment of the requirements for the degree of
the Doctorate Program in Computer Science and
Computational Mathematics. *FINAL VERSION*

Concentration Area: Computer Science and
Computational Mathematics

Advisor: Prof. Dr. Edson dos Santos Moreira

USP – São Carlos
February 2019

*Este trabalho é dedicado aos meus pais, in memoriam,
pelo amor e zelo para com seus filhos.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, essa energia suprema que sempre me deu a tranquilidade de espírito necessária para alcançar meus objetivos.

Aos meus pais Maria Lúcia de Sousa Nunes e Antônio Silvério Nunes que, embora não estejam fisicamente mais aqui comigo, me acompanham sempre *in memoriam*. Vocês sempre foram grandes exemplos de força e superação. A minha gratidão é imensa e eterna. Estejam com Deus!

À minha querida irmã Daniella. Um ponto de apoio essencial durante toda a minha jornada nesse curso de doutorado.

À minha estimada esposa Jaqueline Piva. Obrigado pelo amor, carinho, paciência, compreensão e incentivos. Sou muito mais forte porque tenho você ao meu lado.

À minha segunda família do coração, José Afonso Piva, Célia Piva, Guilherme e Renata. Muito obrigado pelos momentos em que estiveram comigo, me fazendo levantar a cabeça e seguir em frente.

De maneira muito especial ao meu orientador professor Dr. Edson dos Santos Moreira, pelo acolhimento no ICMC/USP e pela enorme atenção e dedicação para com seus orientandos. Você é um ser humano diferenciado, com uma capacidade de empatia enorme e de uma humildade admirável. Obrigado pela oportunidade que me deu de poder conviver com você durante esses anos.

Aos colegas do grupo de pesquisa: Luz Marina, João Batista, Wellington Junior e Kifayat Ullah; do laboratório Intermídia e do curso de doutorado. Foram ótimos os momentos de companheirismo e de trocas de experiências e conhecimentos.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (IFSUL-DEMINAS) e ao Instituto de Ciências Matemáticas e Computacionais da Universidade de São Paulo (ICMC/USP) pelos valorosos apoios concedidos.

Enfim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desse trabalho.

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”
(Albert Einstein)*

RESUMO

NUNES, D. F. S. **Uso de comunicação V2V para o descarregamento de dados em redes celulares: uma estratégia baseada em clusterização geográfica para apoiar o sensoriamento veicular colaborativo**. 2019. 122 p. Tese (Doutorado em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2019.

A incorporação das tecnologias de computação e de comunicação nos veículos modernos está viabilizando uma nova geração de automóveis conectados. Com a capacidade de se organizarem em rede, nas chamadas redes veiculares *ad hoc* (VANETs), eles poderão, num futuro próximo, (i) tornar o trânsito mais seguro para os motoristas, passageiros e pedestres e/ou (ii) promover uma experiência de transporte mais agradável, com maior conforto. É neste contexto que se destaca o Sensoriamento Veicular Colaborativo (VCS), um paradigma emergente e promissor que explora as tecnologias já embarcados nos próprios veículos para a obtenção de dados *in loco*. O VCS tem demonstrado ser um modelo auspicioso para o desenvolvimento e implantação dos Sistemas Inteligentes de Transporte (ITSs). Ocorre, todavia, que, em grandes centros urbanos, dependendo do fenômeno a ser monitorado, as aplicações de VCS podem gerar um tráfego de dados colossal entre os veículos e o centro de monitoramento. Considerando que as informações dos automóveis são geralmente enviadas para um servidor remoto usando as infraestruturas das redes móveis, o número massivo de transmissões geradas durante as atividades de sensoriamento pode sobrecarregá-las e degradar consideravelmente a Qualidade de Serviço (QoS) que elas oferecem. Este documento de tese descreve e analisa uma abordagem de clusterização geográfica que se apoia no uso de comunicações Veículo-para-Veículo (V2V) para promover o descarregamento de dados do VCS em redes celulares, de forma a minimizar os impactos supracitados. Os resultados experimentais obtidos mostraram que o uso das comunicações V2V como método complementar de aquisição de dados *in loco* foi capaz de diminuir consideravelmente a quantidade de transmissões realizadas sobre as redes móveis, sem a necessidade de implantação de novas infraestruturas de comunicação no ambiente, e com um reduzido atraso médio adicional fim a fim na obtenção das informações. A abordagem desenvolvida também se apresenta como uma plataforma de *software* flexível sobre a qual podem ser incorporadas técnicas de agregação de dados, o que possibilitaria aumentar ainda mais a preservação dos recursos de *uplink* das redes celulares. Considerando que a era da Internet das Coisas (IoT) e das cidades inteligentes está apenas começando, soluções para o descarregamento de dados, tal como a tratada nesta pesquisa, são consideradas imprescindíveis para continuar mantendo a rede móvel de acesso à Internet operacional e capaz de suportar uma demanda de comunicação cada vez maior por parte das aplicações.

Palavras-chave: Descarregamento de dados móveis, sensoriamento veicular colaborativo, redes veiculares, clusterização veicular geográfica, VANET..

ABSTRACT

NUNES, D. F. S. **On the use of V2V communication for cellular data offloading: a geographic clustering-based strategy to support vehicular crowdsensing.** 2019. 122 p. Tese (Doutorado em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2019.

The incorporation of computing and communication technologies into modern vehicles is enabling a new generation of connected cars. With the ability to get into a network formation, in the so-called ad hoc networks (VANETs), these vehicles might, in the near future, (i) make the traffic safer for drivers, passengers and pedestrians and/or (ii) promote a more pleasant transportation experience, with greater comfort. It is in this context that emerges the Vehicle CrowdSensing (VCS), a novel and promising paradigm for performing *in loco* data collection from the vehicles embedded technologies. VCS has proved to be an auspicious scheme for the development and deployment of the Intelligent Transport Systems (ITSs). However, in large urban areas, depending on the phenomenon to be monitored, the VCS applications can generate a colossal data traffic between vehicles and the monitoring center. Considering that all the vehicles' information is generally sent to the remote server by using mobile network infrastructures, this massive amount of transmissions generated during the sensing activities can overload them and degrade the Quality of Service (QoS) they offer. This thesis document describes and analyzes a geographic clustering approach that relies on the use of Vehicle-to-Vehicle (V2V) communications to promote the VCS data offloading in cellular networks, in order to minimize the above impacts. The experimental results obtained showed that the use of V2V communications as a complementary data acquisition method was able to considerably reduce the number of transmissions carried out on mobile networks, without the need for deploying new communication infrastructures in the environment, and with a reduced additional delay. The created approach also stands itself as a flexible software platform on which data aggregation techniques can be incorporated, in order to maximize the network resources preservation already provided by the proposal. Considering that we are just entering in the Internet of Things (IoT) and smart cities era, creating data offloading solutions, such as that treated in this research, is considered an essential task to keep the Internet access network operational and able to support the growing demand for mobile communications.

Keywords: Mobile Data Offloading, Vehicular CrowdSensing, Vehicle Ad hoc Networks, Vehicular Geo-Clustering, VANET.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cenário de <i>upload</i> dos dados de VCS sob quatro perspectivas: (a) todos os veículos enviam seus dados diretamente ao centro de monitoramento usando transmissões V2I ERB; (b) os veículos enviam seus dados ao centro de monitoramento por intermédio de RSUs, usando transmissões V2I RSU; (c) os veículos enviam seus dados ao centro de monitoramento por intermédio de APs Wi-Fi, usando transmissões V2I Wi-Fi; e (d) os dados são enviados ao centro de monitoramento por intermédio de outros veículos, usando transmissões V2V, e por meio de transmissões V2I ERB. Nos modelos (b) e (c) é assumido que as RSUs e os APs Wi-Fi estão ligadas à Internet por meio de <i>links</i> de banda larga de alta velocidade.	32
Figura 2 – Topologia de uma MANET.	41
Figura 3 – Cenário de uma rede veicular.	42
Figura 4 – Taxonomia dos protocolos de roteamento em VANETs.	45
Figura 5 – Arquitetura genérica do VCS	53
Figura 6 – Abordagens para o descarregamento de dados em redes celulares.	59
Figura 7 – Uma classificação para as comunicações do tipo D2D	60
Figura 8 – Representação gráfica das formas de utilização do espectro das redes celulares no D2D <i>in-band</i>	62
Figura 9 – Representação ilustrativa da EUCLIDEAN	78
Figura 10 – Representação ilustrativa do processo de alocação das AAs	79
Figura 11 – Processo de criação de clusters geográficos baseados em AAs	80
Figura 12 – Arquitetura de MDO para o VCS considerando a EUCLIDEAN: (a) lado do Servidor de Monitoramento; e (b) lado do Cliente (veículo).	84
Figura 13 – Estrutura do <i>beacon</i> de controle.	85
Figura 14 – Configuração em que surge o problema do falso CH na abordagem de único salto: (i) MC isolado; (ii) MC oculto; e (iii) Falso CH.	87
Figura 15 – Cenário urbano: área da cidade de Bologna	91
Figura 16 – TPLT <i>versus</i> Número de Veículos.	93
Figura 17 – NCHS <i>versus</i> Número de Veículos.	95
Figura 18 – NATL <i>versus</i> Número de Veículos.	95
Figura 19 – AMU <i>versus</i> Número de Veículos.	96
Figura 20 – Distribuição espacial dos centroides e dos CHs.	97
Figura 21 – TPLT <i>versus</i> Número de Veículos.	101

Figura 22 – AMU <i>versus</i> Número de Veículos.	102
Figura 23 – TADD <i>versus</i> Número de Veículos.	104
Figura 24 – Distribuição do número de amostras de dados por pacote LTE recebido pela VCS_AppServidora.	105
Figura 25 – Distribuição da forma como as amostras de dados dos MC foram obtidas pelos CHs: (i) V2V de único salto e (ii) V2V de múltiplos saltos.	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais diferenças arquiteturais entre a Internet e as DTNs.	40
Quadro 2 – Termos de busca expandidos para o mapeamento sistemático.	65
Quadro 3 – Termos de busca sumarizados usados nos motores de busca.	66
Quadro 4 – Relação dos valores médios de TPLT - EUCLIDEAN.	94
Quadro 5 – Relação dos valores médios de TPLT - EUCLIDEAN & I-BEACON. . . .	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados das buscas nas bibliotecas digitais.	68
Tabela 2 – Análise comparativa sumarizada entre os trabalhos relacionados e a proposta de doutorado.	74
Tabela 3 – Notações	77
Tabela 4 – Parâmetros e valores usados na simulação da EUCLIDEAN	90
Tabela 5 – Parâmetros e valores usados no cenário de simulação da EUCLIDEAN	90
Tabela 6 – Parâmetros e valores usados na simulação da EUCLIDEAN com a I-BEACON	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	Projeto de Parceria para a Terceira Geração (em inglês, <i>3rd Generation Partnership Project</i>)
AA	Área de Atração
AACP	Protocolo de Clusterização Baseado em Áreas de Atração (em inglês, <i>Attraction Area-based Clustering Protocol</i>)
AMU	Atraso Médio de <i>Upload</i>
APs	Pontos de Acesso (em inglês, <i>Access Points</i>)
BSS	Conjunto Básico de Serviços (em inglês, <i>Basic Service Set</i>)
CBR	<i>Cluster Based Routing</i>
CCH	Canais de Controle (em inglês, <i>Control Channel</i>)
CG	Cluster Geográfico
CH	Cluster Head
CQI	Indicador de Qualidade do Canal (em inglês, <i>Channel Quality Indicator</i>)
D2D	Dispositivo-para-Dispositivo (em inglês, <i>Device-to-Device</i>)
D2D ProSe	Serviço de Proximidade Dispositivo-a-Dispositivo (em inglês, <i>Device-to-Device Proximity Service</i>)
DSRC	Comunicação de Curto Alcance Dedicado (em inglês, <i>Dedicated Short Range Communication</i>)
DTNs	Redes Tolerante ao Atraso/Desconexão (em inglês, <i>Disruption/Delay-Tolerant Networks</i>)
eNodeB	<i>Evolved NodeB</i> ou <i>E-UTRAN Node B</i>
ERB	Estação Rádio Base
EUCLIDEAN	Abordagem de Clusterização Geográfica de Veículos para o Descarregamento de Dados do VCS em Redes Celulares (em inglês, <i>gEo-clUstering approaCh for celluLar vehIcular crowDsEnsing dAta offloadiNg</i>)
FCD	<i>Floating Car Data</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global (em inglês, <i>Global Positioning System</i>)
I-BEACON	Abordagem de Aquisição de Dados <i>in loco</i> baseada em <i>Beaconing</i> para a EUCLIDEAN (em inglês, <i>In loco BEaconing-based dAta Collection ApprOach for euclidean</i>)
ID	IDentidade
IoT	Internet das Coisas (em inglês, <i>Internet of Things</i>)

ISM	Industrial, Científica e Médica (em inglês, <i>Industrial, Scientific & Medical</i>)
ITS	Sistemas Inteligentes de Transporte (em inglês, <i>Intelligent Transportation System</i>)
JNCA	<i>Journal of Network and Computer Applications</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution-Advanced</i>
M2M	Máquina-para-Máquina (em inglês, <i>Machine-to-Machine</i>)
MANET	Rede Móvel <i>Ad hoc</i> (em inglês, <i>Mobile Ad hoc Networking</i>)
MC	Membros do Cluster
MCS	Sensoriamento Colaborativo Móvel (em inglês, <i>Mobile CrowdSensing</i>)
MDO	Descarregamento de Dados Móveis (em inglês, <i>Mobile Data Offloading</i>)
MSP	Plataformas de Sensores Móveis (em inglês, <i>Mobile Sensor Platforms</i>)
NATL	Número de Amostras por Transmissão LTE
NCHS	Número de CH Seleccionados
OBU	Unidade de Bordo (em inglês, <i>On Bord Unit</i>)
OMNET++	<i>Objective Modular NETwork Testbed in C++</i>
OS	sensoriamento oportunista (em inglês, <i>Opportunistic Sensing</i>)
PS	sensoriamento participativo (em inglês, <i>Participatory Sensing</i>)
QoE	Qualidade de Experiência (em inglês, <i>Quality of Experience</i>)
QoS	Qualidade de Serviço (em inglês, <i>Quality of Service</i>)
QPs	Questões de Pesquisa
RAN	Rede de Acesso via Rádio (em inglês, <i>Radio Access Network</i>)
RERB	Retransmissor ERB
ROI	Região de Interesse (em inglês, <i>Region Of Interest</i>)
RSU	Unidades de Acostamento (em inglês, <i>Road Side Unit</i>)
S4A	Algoritmo de Alocação de Áreas de Atração Estacionárias (em inglês, <i>Stationary Attraction Areas Allocation Algorithm</i>)
SC	Cidades Inteligentes (em inglês, <i>Smart Cities</i>)
SCH	Canais de Serviço (em inglês, <i>Service Channel</i>)
SMS	Serviço de Mensagens Curtas (em inglês, <i>Short Message Service</i>)
SO	Sistema Operacional
SUMO	<i>Simulation of Urban MObility</i>
TADD	Taxa de Amostra de Dados Duplicadas
TCP/IP	Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de Internet (em inglês, <i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>)
TI	Tecnologia da Informação
TPLT	Total de Pacotes LTE Transmitidos

U-NII	Infraestrutura Nacional de Informação Não Licenciada (em inglês, <i>Unlicensed National Information Infrastructure</i>)
UE	Equipamento de Usuário (em inglês, <i>User Equipment</i>)
V2I	Veículo-para-Infraestrutura (em inglês, <i>Vehicle-to-Infrastructure</i>)
V2V	Veículo-para-Veículo (em inglês, <i>Vehicle-to-Vehicle</i>)
VANET	Rede Veicular <i>Ad hoc</i> (em inglês, <i>Vehicular Ad hoc NETWORK</i>)
VCS	Sensoriamento Veicular Colaborativo (em inglês, <i>Vehicular CrowdSensing</i>)
VEINS LTE	<i>Vehicles in network simulation LTE</i>
WAVE	Acesso Sem Fio em Ambiente Veicular (em inglês, <i>Wireless Access in Vehicular Environment</i>)
WSM	Mensagem Curta WAVE (em inglês, <i>WAVE Short Message</i>)
WSMP	Protocolo de Mensagem Curta WAVE (em inglês, <i>WAVE Short Message Protocol</i>)
WSN	Redes de Sensores Sem Fio (em inglês, <i>Wireless Sensor Networks</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathcal{R}_i$ — Uma ROI i genérica

$\mathcal{A}\mathcal{A}_i$ — Uma Área de Atração i genérica

$\mathcal{A}\mathcal{A}_{\mathcal{R}_i}^*$ — Conjunto de todas as Áreas de Atração mapeadas dentro de uma $\mathcal{R}_i$

$\mathcal{CG}_i$ — Um Cluster Geográfico i genérico

$\mathcal{CG}_{\mathcal{R}_i}^*$ — Conjunto de todos os Clusters Geográficos criados dentro de uma $\mathcal{R}_i$

$\mathcal{C}_{\mathcal{R}_i}^*$ — Conjunto de todos os centroides mapeados dentro de uma $\mathcal{R}_i$

$\mathcal{V}_{\mathcal{R}_i}^*$ — Conjunto de todos os veículos trafegando dentro de uma $\mathcal{R}_i$

$\mathcal{N}_{v_i}^*$ — Conjunto de todos os vizinhos de um veículo v_i

a_{aa} — Amplitude das Áreas de Atração

d_v — Densidade de veículos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Contextualização	29
1.2	Descrição do problema	31
1.3	Objetivos	34
1.4	Hipótese de Pesquisa	34
1.5	Organização do texto	35
2	REDES VEICULARES E SUAS APLICAÇÕES	37
2.1	Considerações iniciais	37
2.2	Redes móveis <i>ad hoc</i>	40
2.3	Redes veiculares	42
2.3.1	<i>Os padrões de comunicação em VANETs</i>	43
2.3.2	<i>Roteamento de dados em VANETs</i>	44
2.3.2.1	<i>Protocolos para V2V</i>	45
2.3.2.2	<i>Protocolos para V2I</i>	48
2.3.3	<i>Sistemas inteligentes de transporte</i>	49
2.3.4	<i>Sensoriamento veicular colaborativo</i>	50
2.3.4.1	<i>Arquitetura Genérica do VCS</i>	52
2.3.4.2	<i>Desafios em VCS</i>	54
3	DESCARREGAMENTO DE DADOS EM REDES MÓVEIS	57
3.1	Considerações iniciais	57
3.2	Descarregamento de dados D2D <i>in-band</i>	61
3.3	Descarregamento de dados D2D <i>out-of-band</i>	62
3.4	Desafios de operacionalização do MDO	63
3.5	Descarregamento de dados no contexto veicular	65
3.5.1	<i>Abordagens da Literatura para MDO no contexto do sensoriamento veicular</i>	67
3.5.1.1	<i>Baseadas no uso de comunicações V2V</i>	68
3.5.1.2	<i>Baseadas no uso de RSUs</i>	70
3.5.1.3	<i>Baseadas no uso de APs Wi-Fi</i>	71
3.5.2	<i>Questões de Pesquisa do Mapeamento Sistemático</i>	72
3.5.3	<i>Análise Comparativa dos Trabalhos Relacionados</i>	73

4	EUCLIDEAN	75
4.1	Considerações iniciais	75
4.2	EUCLIDEAN	76
4.2.1	S4A	77
4.2.2	AACP	79
4.3	I-BEACON	84
5	AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	89
5.1	Metodologia de Avaliação da EUCLIDEAN	89
5.1.1	<i>Configuração da Simulação</i>	89
5.1.2	<i>Métricas para a avaliação de desempenho</i>	91
5.1.3	<i>Metodologia de execução das simulações</i>	92
5.2	Análise dos Resultados	93
5.2.1	<i>Redução de tráfego sobre as redes móveis</i>	93
5.2.2	<i>Impacto da amplitude das AAs na criação dos CGs e no AMU</i>	95
5.2.3	<i>Distribuição espacial dos CHs</i>	96
5.2.4	<i>Tamanho das amostras de dados e ocupação de espaço de armazenamento nos buffers dos CHs</i>	97
5.3	Metodologia de Avaliação da EUCLIDEAN com o uso da I-BEACON	98
5.3.1	<i>Configuração da Simulação</i>	98
5.3.2	<i>Métricas para avaliação de desempenho</i>	99
5.3.3	<i>Metodologia de execução dos experimentos</i>	99
5.4	Análise dos Resultados	100
5.4.1	<i>Redução de tráfego sobre as redes celulares</i>	100
5.4.2	<i>Impacto do uso da I-BEACON na aquisição dos dados do VCS</i>	102
5.4.3	<i>Taxa de amostra de dados duplicados recebidos pela aplicação servidora</i>	103
5.4.4	<i>Caracterização das transmissões de dados do VCS</i>	104
6	CONCLUSÃO	107
6.1	Considerações finais	107
6.2	Contribuições	109
6.3	Publicações Geradas	110
6.4	Trabalhos Futuros	110
	REFERÊNCIAS	113
	GLOSSÁRIO	121

INTRODUÇÃO

Este capítulo realiza uma introdução ao tema de pesquisa no qual o projeto de doutorado está inserido. Ele foi estruturado da seguinte maneira: a [Seção 1.1](#) trata do contexto do trabalho; a [Seção 1.2](#) discorre sobre o problema estudado; os objetivos do projeto são elencados na [Seção 1.3](#); a [Seção 1.4](#) aponta a hipótese formulada; e, por fim, a [Seção 1.5](#) apresenta a organização do texto no restante deste documento.

1.1 Contextualização

Os recentes avanços das tecnologias computacionais móveis e das tecnologias de transmissão sem fio têm provocado uma verdadeira transformação na composição e no modo de operação da Internet. Para [ITU \(2005\)](#) e [Ma, Zhao e Yuan \(2014\)](#), o que estamos vivenciando neste início do século XXI é o começo de uma revolução tecnológica batizada de Internet das Coisas (em inglês, *Internet of Things*) (IoT) ([XIA et al., 2012](#)). Na perspectiva da IoT, uma quantidade cada vez maior de “coisas” (objetos) inteligentes (e.g., *smartphones*, *tablets*, óculos, relógios, televisores e veículos), providas de capacidades computacionais e de comunicação, têm se acoplado na borda da Internet criando uma rede mundial integrada, capaz de possibilitar uma gama de novas interações entre as pessoas, entre pessoas e “coisas”, e até mesmo entre “coisas” diretamente.

O fato é que o desenvolvimento tecnológico está construindo um novo paradigma computacional altamente dinâmico, caracterizado pela “onipresença” da informática e pelo suporte à mobilidade. A incorporação das tecnologias de computação e de comunicação nos veículos modernos, por exemplo, está viabilizando uma nova geração de automóveis conectados. Essa nova geração não está sendo pensada somente para o transporte de pessoas e/ou objetos, mas também de dados. Com a capacidade de se organizarem em rede, nas chamadas redes veiculares

*ad hoc*¹ (em inglês, *Vehicular Ad hoc NETworks*) (VANETs), esses veículos poderão, num futuro próximo, (i) tornar o trânsito mais seguro para os motoristas, passageiros e pedestres e/ou (ii) promover uma experiência de transporte mais agradável, com maior conforto (AL-SULTAN *et al.*, 2014; SHAREF; ALSAQOUR; ISMAIL, 2014).

De acordo com Gorrieri *et al.* (2016), a variedade de tecnologias que vêm sendo embarcadas nos veículos atuais está transformando esse meio de transporte em verdadeiras Plataformas de Sensores Móveis (em inglês, *Mobile Sensor Platforms*) (MSP), capazes de obter e transportar uma coleção riquíssima de informações do próprio veículo (e.g., o consumo de combustível, a localização geográfica, o *status* de funcionamento do motor e a velocidade de deslocamento) ou do ambiente em que estão inseridos (e.g., a temperatura, o nível de ruído e índices de poluição do ar). Essas informações podem ser (i) compartilhadas diretamente entre os automóveis, usando transmissões *ad hoc* do tipo Veículo-para-Veículo (V2V), ou (ii) enviadas para a Internet através de transmissões do tipo Veículo-para-Infraestrutura (V2I). A infraestrutura neste último caso pode ser representada (a) por uma estação computacional especificamente projetada para apoiar comunicações em VANET e que é posicionada ao longo das vias públicas (em inglês, *Road Side Unit*) (RSU)², (b) por um ponto de acesso do tradicional Wi-Fi ou (c) por uma Estação Rádio Base (ERB) da rede celular que oferece conectividade móvel.

Enquanto MSPs, e devido aos dados que eles podem gerar, tais veículos vêm demonstrando um alto potencial para suportar a criação de uma diversidade de aplicações inovadoras, sejam elas relacionadas à segurança do trânsito, ao gerenciamento do tráfego ou mesmo ao entretenimento e informação (TIMPNER; WOLF, 2016). É neste contexto que se destaca o Sensoriamento Veicular Colaborativo (em inglês, *Vehicular CrowdSensing*) (VCS), um paradigma emergente e promissor para a realização de coleta de dados em veículos. A essência por trás desse modelo está em tirar proveito das tecnologias já embarcadas nos próprios automóveis para extrair informações deles ou do ambiente, de modo a construir representações/mapeamentos do mundo real e auxiliar na tomada de decisão, trazendo, de alguma forma, benefícios para a vida das pessoas.

No paradigma VCS, as aplicações servidoras residentes em uma central de monitoramento, que pode estar localizada em qualquer ponto da Internet (i.e., na nuvem³), enviam tarefas de aquisição de dados *in loco* para as aplicações clientes instaladas nos veículos. Ao receberem uma tarefa, as aplicações clientes obtêm dos dados solicitados a partir dos sensores dos veículos e os enviam à central de monitoramento. As aplicações servidoras então processam os dados

¹ O modelo de comunicação *ad hoc* será detalhado no Capítulo 2.

² As RSUs operam como pontos de acesso, oferecendo, aos veículos, a possibilidade de eles trocarem dados com a Internet por intermédio delas. Normalmente, as RSUs estão interligadas à Internet por meio de *links* cabeados de alta velocidade.

³ Neste documento, o termo nuvem é usado com o sentido de Computação em Nuvem (em inglês, *Cloud Computing*), em que recursos de Tecnologia da Informação (TI), tais como poder computacional, armazenamento e até mesmo aplicações são disponibilizados como plataformas na Internet para serem usados sob demanda.

reportados, os armazenam e os disponibilizam para os usuários ou para outras aplicações interessadas neles. O VCS tem demonstrado ser um modelo auspicioso para o desenvolvimento e implantação dos Sistemas Inteligentes de Transporte (BENAMAR *et al.*, 2014), já que ele possibilita a construção e operacionalização de aplicações dinâmicas e contemporâneas a um esforço e custo reduzido (GANTI; YE; LEI, 2011).

1.2 Descrição do problema

De maneira alternativa ao paradigma convencional de sensoriamento, que geralmente emprega o uso de dispositivos sensores fixados em equipamentos e locais predefinidos, assim como de infraestruturas particulares de conectividade com a Internet, no VCS, as tecnologias residentes nos próprios veículos são exploradas com o intuito de habilitar serviços de monitoração em larga escala (GANTI; YE; LEI, 2011; MA; ZHAO; YUAN, 2014). Monitorar fenômenos em larga escala usando as abordagens tradicionais de Redes de Sensores Sem Fio (em inglês, *Wireless Sensor Networks*) (WSN) exige um grande esforço humano e financeiro para a implantação do sistema e para a manutenção dele, o que na maioria das vezes o torna inexecutável (MA; ZHAO; YUAN, 2014). Cabe ressaltar, ainda, que a natureza da mobilidade veicular impõe uma série de novos desafios (e.g., tempo de contato reduzido, desconexões frequentes e interferências no sinal), fazendo com que as abordagens usuais de WSN sejam ineficientes ou mesmo ineficazes quando empregadas nesse domínio (BENAMAR *et al.*, 2014).

Ocorre, todavia, que, em grandes centros urbanos, dependendo do evento monitorado, e da frequência com que os dados são obtidos, as aplicações de VCS podem gerar um tráfego de dados colossal entre os veículos e o centro de monitoramento. Considerando que as informações dos automóveis são geralmente enviadas para as aplicações servidoras usando as redes móveis, como ilustrado na Figura 1a, o número massivo de transmissões geradas durante as atividades de sensoriamento pode sobrecarregá-las e degradar consideravelmente a Qualidade de Serviço (em inglês, *Quality of Service*) (QoS) que elas oferecem⁴. Em circunstâncias excepcionais, as redes celulares podem até mesmo entrar em colapso. Esta não é uma suposição exagerada se levarmos em consideração que a era da IoT está apenas em sua fase embrionária e que, num futuro próximo, uma abundância de dispositivos, além de veículos, também estarão competindo por recursos dessas redes na tentativa de obterem acesso à Internet. Isso significa que o paradigma ilustrado

⁴ No campo de estudo da pesquisa apresentada neste documento de tese, algumas métricas de desempenho que nos permite avaliar a QoS da rede são: (i) atraso fim a fim/latência: é o tempo gasto pela rede para transportar um dado entre uma origem e o um destino qualquer; (ii) jitter: a variação máxima das latências entre pacotes de um mesmo fluxo de transmissão; (iii) taxa de perda de pacotes: a relação entre a quantidade de pacotes perdidos e a quantidade total de pacotes enviados; e (iv) taxa de transmissão/vazão: medida pela quantidade de dados máxima que pode ser transportada pela rede por unidade de tempo. Para as métricas (i), (ii) e (iii), quanto menores forem os valores observados, melhor será a QoS, ou seja, melhor é o desempenho da rede. Para a métrica (iv), quanto maiores forem os valores observados, melhor será a QoS percebida.

pela [Figura 1a](#) não escala adequadamente para atender às demandas latentes dos ambientes com alta densidade de dispositivos móveis e de veículos conectados.

Figura 1 – Cenário de *upload* dos dados de VCS sob quatro perspectivas: (a) todos os veículos enviam seus dados diretamente ao centro de monitoramento usando transmissões V2I ERB; (b) os veículos enviam seus dados ao centro de monitoramento por intermédio de RSUs, usando transmissões V2I RSU; (c) os veículos enviam seus dados ao centro de monitoramento por intermédio de APs Wi-Fi, usando transmissões V2I Wi-Fi; e (d) os dados são enviados ao centro de monitoramento por intermédio de outros veículos, usando transmissões V2V, e por meio de transmissões V2I ERB. Nos modelos (b) e (c) é assumido que as RSUs e os APs Wi-Fi estão ligadas à Internet por meio de *links* de banda larga de alta velocidade.

(a) Upload usando transmissões V2I ERB

(b) Upload usando transmissões V2I RSU

(c) Upload usando transmissões V2I Wi-Fi

(d) Upload usando transmissões V2V e V2I ERB

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota – Neste caso, V2I ERB representa uma transmissão infraestruturada usando a rede 3G/4G/5G.

Estratégias para aliviar a sobrecarga das redes móveis se fazem necessárias, portanto, para garantir a operacionalização eficiente das aplicações de VCS e, ainda, promover o “bem estar da rede”. Algumas iniciativas presentes na literatura ([BAZZI; MASINI; PASOLINI, 2012](#); [STANICA; FIORE; MALANDRINO, 2013](#)) sugerem que os dados do sensoriamento veicular

sejam escoados para a central de monitoramento alternativamente por meio do uso de RSUs, como ilustrado na [Figura 1b](#). Nesse modelo, um conjunto desses equipamentos é fixado no ambiente para apoiar as comunicações dos veículos com a Internet. Todavia, como as RSUs possuem uma área de cobertura limitada, a sua implantação em larga escala se mostra inviável devido aos elevados custos envolvidos com a aquisição, instalação e manutenção das mesmas. [Rebecchi et al. \(2015\)](#) sustentam que Pontos de Acesso (em inglês, *Access Points*) (APs) Wi-Fi também podem ser explorados como tecnologia sem fio complementar para drenar os dados que, originalmente, eram destinados às redes de acesso das operadoras móveis, reduzindo, assim, a sobrecarga sobre elas (ver [Figura 1c](#)). O problema com a adoção de APs Wi-Fi é que eles possuem uma cobertura de sinal ainda mais reduzida que a das RSUs. Além do mais, devido à dinâmica de autenticação e associação de dispositivos⁵ requerida pela tecnologia, ela tem apresentado baixa eficiência quando empregada para apoiar as comunicações em VANETs.

Outras iniciativas ([ARKIAN; ATANI; KAMALI, 2014](#); [SALVO et al., 2016](#)) propõem o uso de comunicações do tipo V2V como estratégia para desafogar as infraestruturas das operadoras (ver [Figura 1d](#)). Esses trabalhos têm empregado técnicas de clusterização para a realização da coleta de dados *in loco* em contraponto ao esquema retratado na [Figura 1a](#). A principal desvantagem das abordagens encontradas é que o processo de formação de clusters relatado pelos trabalhos geralmente envolve várias etapas e transmissões de pacotes especiais para (i) criar a melhor formação em cluster possível; (ii) garantir que a formação criada seja consistente e atualizada; e (iii) realizar a eleição e eventuais mudanças dos *Cluster Heads*⁶ (CHs). Ocorre que, devido ao padrão de alta mobilidade dos veículos, as formações em cluster podem ficar inconsistentes muito rapidamente, fazendo com que as mensagens de manutenção delas resultem numa sobrecarga considerável para as comunicações locais em VANET. Os principais efeitos dessa sobrecarga são: (i) aumento da taxa de perda de pacotes; (ii) geração de um número alto e indesejado de dados redundantes dentro da rede; (iii) elevação dos atrasos na troca de dados fim a fim; e (iv) ocorrência mais frequente do problema de contenção de acesso ao meio. Por não requerer mudanças ou a adição de novas infraestruturas no ambiente, a clusterização se apresenta como uma técnica factível para reduzir o tráfego de dados sobre as redes móveis. Entretanto, elas precisam ser adaptadas para operar de forma mais aderente à dinâmica dos ambientes veiculares e para servir às aplicações de VCS de maneira mais eficiente.

⁵ Uma conexão com a rede sem fio IEEE 802.11a/b/g/n (Wi-Fi) passa por duas etapas: (i) a autenticação e (ii) a associação. Na autenticação, o AP verifica a identidade do dispositivo móvel. Ao final da autenticação, ocorre a fase de associação. Nela, os dispositivos móveis se registram com um AP para, só então, terem acesso completo à rede ([INTEL, 2018](#)).

⁶ *Cluster Head* é um nó selecionado (dinamicamente ou não) dentro de um cluster cuja responsabilidade é coletar informações de seus vizinhos em formação e encaminhá-las a um destino especificado (e.g., um servidor local ou na Internet). Ele também poderá executar funções de gerenciamento do cluster.

1.3 Objetivos

Inserido na problemática de promover o descarregamento de dados móveis provenientes de atividades do sensoriamento veicular, o objetivo principal desta tese de doutorado foi responder à seguinte questão de pesquisa:

- **Como promover o descarregamento dos dados de VCS em redes celulares sem a implantação de novas infraestruturas no ambiente e considerando os aspectos particulares da mobilidade veicular?**

O objetivo principal desta tese foi investigado a partir das atividades relacionadas na sequência:

- Avaliar o potencial de redução das transmissões através das redes celulares quando comunicações do tipo V2V são empregadas para apoiar o processo de coleta e *upload* dos dados de VCS em ambientes urbanos; e
- Projetar, implementar e avaliar uma estratégia de clusterização de veículos aderente ao padrão de mobilidade que eles possuem e que seja capaz de suportar as aplicações de VCS, reduzindo, tanto quanto possível, a demanda geral por recursos das redes móveis.

1.4 Hipótese de Pesquisa

Como discutido na [Seção 1.2](#), a dinâmica inerente dos cenários de VCS impõe uma série de limitações para o funcionamento das aplicações tradicionais de sensoriamento, assim como para a implantação de técnicas de redução do tráfego de dados gerado por elas. A hipótese defendida neste projeto é que o descarregamento de dados móveis provenientes do sensoriamento veicular pode ser implementado de forma eficaz e eficiente com o uso de comunicações V2V associadas a uma estratégia de clusterização geográfica que leve em consideração a natureza de deslocamento dos automóveis.

Desta forma, os veículos poderão tirar proveito das transmissões *ad hoc* V2V entre eles para se organizarem em agrupamentos, para realizarem a coleta *in loco* dos dados e para determinarem um subconjunto de CHs que se encarregará de encaminhar as informações requisitadas ao centro de monitoramento. Somente os CHs acessarão as redes celulares e não todos os veículos participantes do sensoriamento. Se comparado com outras abordagens da literatura, esse modelo de descarregamento de dados se mostra bastante flexível e ainda possui a vantagem de dispensar a implantação de novas infraestruturas de comunicação com a Internet, passando a aproveitar de forma mais eficiente as já existentes.

1.5 Organização do texto

O restante deste documento está estruturado em cinco outros capítulos:

O [Capítulo 2](#) é dedicado a uma revisão da literatura sobre as redes veiculares. Seu foco principal está em caracterizar tais redes e apresentar uma visão geral sobre suas aplicações, mais especificamente sobre aquelas que fazem uso do sensoriamento veicular colaborativo.

O [Capítulo 3](#) realiza uma fundamentação teórica sintetizada sobre o descarregamento de dados em redes móveis. O capítulo versa sobre os principais conceitos envolvidos e sua importância para o correto funcionamento de um conjunto amplo de aplicações contemporâneas. Este capítulo também realiza uma discussão sobre os estudos da literatura que tratam sobre descarregamento de dados no contexto veicular, destacando aqueles que mais se relacionam com o projeto de pesquisa conduzido ao longo do doutoramento.

O [Capítulo 4](#) descreve uma solução chamada EUCLIDEAN, que foi desenvolvida para prover o descarregamento de dados móveis gerados pelas aplicações de VCS. O capítulo também descreve um método de coleta de dados *in loco* baseado no uso de *beacons*, chamado de I-BEACON.

O [Capítulo 5](#) discorre sobre as avaliações das abordagens propostas, contemplando a metodologia adotada e os resultados experimentais obtidos.

O [Capítulo 6](#), por fim, apresenta as principais conclusões inferidas a partir dos resultados obtidos com a pesquisa. Nele, são apresentadas, ainda, algumas perspectivas e oportunidades de trabalhos futuros.

REDES VEICULARES E SUAS APLICAÇÕES

Este capítulo de fundamentação teórica disserta sobre as redes veiculares, apresentando os conceitos envolvidos mais relevantes. Ele está estruturado da seguinte maneira: a [Seção 2.1](#) trata das considerações iniciais; a [Seção 2.2](#) discorre sobre as redes móveis *ad hoc*; e a [Seção 2.3](#) descreve as redes veiculares caracterizando suas principais aplicações.

2.1 Considerações iniciais

O modelo de provimento de serviços da Internet, baseado no conjunto de protocolos da pilha TCP/IP¹, pressupõe a existência de um caminho de dados fim a fim² entre os dispositivos para que a comunicação possa ser estabelecida e dados possam ser trocados pela rede. A criação desse caminho na Internet é feito com o uso de meios físicos cabeados (e.g., coaxial, par trançado e fibra ótica) e/ou não cabeados (e.g., ondas de rádio e infravermelho). Considerando então a existência deles, os protocolos que gerenciam as comunicações na Internet buscam oferecer, para as aplicações, o menor atraso possível nas transmissões e uma pequena taxa de erros e de perda de pacotes de dados ([FALL, 2003](#)).

Com o avanço das tecnologias móveis e o aprimoramento das tecnologias de comunicação sem fio, esse modelo no qual a Internet está apoiada se mostrou limitado para servir a um conjunto de redes emergentes, e não convencionais, tais como (i) as redes móveis terrestres para fins militares, (ii) as redes interplanetárias, (iii) as redes de sensores e, mais recentemente, (iv) as redes de veículos. Embora os conceitos presentes na arquitetura projetada para a Internet sejam aplicáveis nesses novos tipos de redes, os seus protocolos se mostraram ineficientes para

¹ A pilha Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de Internet (em inglês, *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP) é composta por um conjunto de protocolos que gerencia a comunicação na Internet e provê transmissões confiáveis pela rede.

² Modelo de comunicação fim a fim é aquele em que a comunicação é estabelecida e gerida pelos nós origem e destino. No caminho de dados fim a fim assume-se que haja um conjunto de enlaces correntemente ativos viabilizando a conectividade entre os nós.

contornar os problemas de conectividade intermitente e de atrasos elevados de transmissão e propagação que surgiram (BURLEIGH *et al.*, 2003; FALL, 2003).

Essas redes, também conhecidas pela denominação Redes Tolerante ao Atraso/Desconexão (em inglês, *Disruption/Delay-Tolerant Networks*) (DTNs), são caracterizadas por sua capacidade de operar mesmo em ambientes adversos, sujeitos a ocorrências de desconexões frequentes e a longos atrasos nas transmissões de dados. Além disso, as DTNs devem tratar também outras limitações comuns em redes de comunicação sem fio, tais como largura de banda reduzida, alta probabilidade de taxas de erros e longevidade reduzida dos nós (FALL, 2003). Com tais propriedades, é possível notar que o projeto arquitetural de uma DTN possui algumas distinções em relação ao da Internet. Segundo Fall (2003), as principais diferenças conceituais entre elas são:

- **Latência e taxa de dados:** os atrasos de transmissão e propagação estão diretamente relacionados ao tipo de meio físico empregado. A Internet requer altas taxas de dados e baixas latências para oferecer seus serviços de forma eficiente. As DTNs, por outro lado, devem operar mesmo condicionadas a taxas de dados bastante reduzidas (e.g., 10-15 kbps em redes de sensores) e latências elevadas;
- **Desconexão:** enquanto a Internet pressupõe uma conexão permanente fim a fim para o transporte de dados, as transmissões em uma DTN deverão tratar situações em que a rede permanece mais tempo desconectada do que conectada. Essas condições adversas são mais comuns em redes sem fio, principalmente em decorrência da mobilidade dos nós e/ou da obstrução dos sinais de rádio por objetos, árvores, construções etc.;
- **Tempo de espera na fila dos roteadores:** na comutação por pacotes³ realizada na Internet, os atrasos de fila são, em geral, da ordem de poucos milissegundos, raramente igual ou superior a um segundo. Em DTNs, esses atrasos poderão atingir grandezas da ordem de minutos, horas ou mesmo dias;
- **Descarte de pacotes:** se o elemento de rede do próximo salto, indicado pela tabela de repasse, não estiver acessível no momento do encaminhamento do pacote, este é descartado imediatamente pelos roteadores da Internet. Um novo pacote é então enviado pelo dispositivo de origem da transmissão. Em uma DTN, as operações de retransmissão a partir da fonte da comunicação sobrecarregam consideravelmente a rede e, portanto, devem ser evitadas ao máximo. Neste sentido, se o elemento de rede do próximo salto não estiver acessível, as mensagens deverão ser armazenadas e poderão ter que permanecer no roteador por longos intervalos de tempo, até que os enlaces sejam reestabelecidos ou que novos sejam criados;

³ Verificar a definição de comutação por pacotes no glossário.

- **Segurança:** Enquanto na Internet a segurança é implementada entre os processos comunicantes residentes nos sistemas finais, por meio de trocas de chaves, por exemplo, em DTNs os mecanismos de autenticação, confidencialidade, integridade etc. devem ser implementados em cada salto, ao longo do caminho de dados;
- **Longevidade dos dispositivos finais:** devido às limitações de capacidade energética de alguns dispositivos pertencentes a uma DTN (e.g., sensores, *smartphones* e *tablets*, que usam bateria), o encaminhamento de dados pela rede deverá considerar, dentre outros fatores, as condições de energia dos nós. Essa preocupação não é muito relevante na Internet, já que a maioria dos dispositivos está ligada a uma fonte de alimentação permanente; e
- **Recursos limitados:** uma DTN pode ser formada por dispositivos com capacidades reduzidas não só de energia, mas também de memória e processamento. Neste sentido, uma DTN deverá incorporar mecanismos que contornem ou minimizem os impactos provocados por essas limitações no funcionamento da rede. Embora na Internet os recursos também sejam escassos, seus efeitos são menos danosos nela do que em uma DTN.

Como em DTNs não se pode assumir previamente a existência de caminhos fim a fim antes de iniciar uma comunicação, as mensagens devem, então, ser transportadas da origem para o seu destino por meio de enlaces construídos dinamicamente ao longo do tempo, chamados neste contexto de contatos oportunos. Um contato oportuno é caracterizado por uma situação em que um nó roteador de mensagem entra no alcance de comunicação de outro nó, de maneira não programada, possibilitando a troca de dados entre ambos (BURLEIGH *et al.*, 2003; FALL, 2003).

Para que esse tipo de encaminhamento seja possível, o roteamento de mensagens em DTN se utiliza de um modelo de transmissão chamado transferência de custódia. Nele, a entrega confiável de mensagens é feita a cada salto do roteamento e não entre a origem e o destino da comunicação. Uma vez que a mensagem foi entregue de forma confiável a um nó DTN, esse assume a custódia da mensagem e a responsabilidade encaminhá-la adiante também de forma confiável. Esse processo de troca de custódia é realizado repetidas vezes, até que a mensagem encontre o seu destino. Por se utilizar desta técnica, as DTNs são também conhecidas como redes do tipo armazena-transporta-e-encaminha (em inglês, *store-carry-and-forward*). Além de eliminar a necessidade de uma conexão fim a fim para prover confiabilidade, o modelo baseado em transferência de custódia preserva recursos da rede evitando eventuais retransmissões a partir da origem (FALL, 2003). O Quadro 1 apresenta uma sumarização com as principais distinções arquiteturais entre a Internet e as DTNs.

Para obter qualidade e desempenho nas transmissões em DTNs, é importante que mecanismos de sincronização de relógio, segurança e controle de congestionamento sejam empregados. Além disso, como as retransmissões são operações que consomem muitos recursos da rede e comprometem a eficiência da comunicação, o descarte de mensagens deve ser evitado ao máximo. Ao

Quadro 1 – Principais diferenças arquiteturais entre a Internet e as DTNs.

Internet	DTN
Pacotes	Mensagem
Confiabilidade fim a fim	Confiabilidade salto por salto
Roteamento baseado em endereço	Roteamento baseado em nome
Atrasos em geral são pequenos	Atrasos em geral são longos
Conectividade persistente	Conectividade intermitente
Rede de grafo completamente conectado	Rede de grafo parcialmente conectado

Fonte: Dados da pesquisa.

longo do tempo, uma série de DTNs para propósitos específicos foram sendo desenvolvidas pela academia e pela indústria. As mais comumente encontradas na literatura e que estão relacionadas a este projeto de pesquisa são as redes móveis *ad hoc* (e.g., as composta por sensores) e as redes veiculares. No decorrer das próximas seções serão apresentados mais detalhes a respeito delas.

2.2 Redes móveis *ad hoc*

O modelo de formação em rede baseado em transmissões *ad hoc*⁴ apoia-se na capacidade aprimorada dos nós de se comunicarem uns com os outros de maneira direta, sem o suporte da infraestrutura da Internet. Uma Rede Móvel *Ad hoc* (em inglês, *Mobile Ad hoc Networking*) (MANET) é um tipo de rede DTN específica em que os nós, dotados de mobilidade, exploram suas habilidades de comunicação sem fio para criarem associações entre si, em modo *ad hoc*, com o intuito de trocarem dados (BASAGNI *et al.*, 2013). Por dispensarem a necessidade da existência da infraestrutura de Internet para a sua implantação e operacionalização, essas redes são muitas vezes referenciadas na literatura como redes sem fio não infraestruturadas. A Internet, por outro lado, é conhecida como uma grande rede infraestruturada.

Além de poderem comunicar-se diretamente entre si, os nós móveis pertencentes a uma MANET também podem estabelecer conectividade com a Internet por meio de dispositivos especiais da rede chamados de gateways MANET. Esses nós podem ser úteis, por exemplo, para habilitar serviços da Internet em regiões desprovidas de infraestrutura (BASAGNI *et al.*, 2013). A Figura 2 ilustra a topologia de uma MANET com a presença de um gateway MANET.

Compreender as características peculiares existentes na topologia de uma MANET é essencial para o desenvolvimento de soluções eficientes de roteamento e encaminhamento das mensagens pela rede. Ao considerar que os principais padrões de comunicação empregados em MANETs são sem fio e de curto alcance (e.g., ZigBee (IEEE 802.15.4), Bluetooth (IEEE 802.15.1) e o Wi-Fi (IEEE 802.11)), a identificação de possíveis caminhos de dados entre uma

⁴ No contexto de redes de computadores, o termo *ad hoc*, em latim, significa: de maneira inesperada; não preparada; com finalidades específicas.

Figura 2 – Topologia de uma MANET.

Fonte: Adaptada de [Basagni et al. \(2013\)](#).

origem e o destino é, muitas vezes, uma tarefa desafiadora para as aplicações. Se os dispositivos estiverem localizados dentro do alcance de comunicação sem fio um do outro, eles podem realizar transmissões de dados entre si diretamente, com um único salto (em inglês, *single-hop*). Entretanto, quando dois nós da MANET que desejam trocar dados estão fora do alcance de comunicação um do outro, é preciso estabelecer um modelo de transmissão indireta, baseada em múltiplos saltos (em inglês, *multi-hop*). Neste caso, alguns nós intermediários devem assumir o papel de roteadores MANET e devem encaminhar as mensagens para outros nós da rede na tentativa de que elas alcancem o seu(s) destinatário(s). Protocolos para comunicações de múltiplos saltos são mais complexos.

As MANETs podem ser criadas, configuradas e administradas de maneira autônoma, a partir da cooperação entre os próprios nós móveis, com uma intervenção humana mínima ou até mesmo sem ela. Desta maneira, novos dispositivos podem se incorporar ou deixar a formação em rede a qualquer momento, fazendo com que a topologia seja bastante dinâmica. De acordo com [Hoebeke et al. \(2004\)](#) essas características fazem com que as MANETs sejam versáteis e adequadas para aquelas situações em que a infraestrutura de rede (i) não está disponível, (ii) não é segura, (iii) é cara ou (iv) não é confiável.

As MANETs foram inicialmente concebidas para aplicações militares, a fim de aperfeiçoar a comunicação em campos de batalhas, já que esse ambiente é bastante hostil para a operacionalização de redes infraestruturadas. Posteriormente, com a popularização dos dispositivos portáteis elas se mostraram adequadas para diversos outros cenários, tais como monitoramento do clima, monitoramento de animais e apoiar a recuperação de desastres naturais. As redes veiculares, descritas na [Seção 2.3](#), que segue, são consideradas um exemplo de MANET emergente com um grande potencial para auxiliar na construção dos sistemas de transporte do futuro.

2.3 Redes veiculares

A incorporação de tecnologias computacionais e de interfaces de transmissão sem fio em veículos tem outorgado a esses a capacidade de comunicação em rede entre si e com o ambiente em que estão inseridos. Redes veiculares são tipos emergentes de DTN, caracterizadas pela intensa mobilidade dos nós, pela topologia altamente dinâmica, enlaces com acentuada perda de conectividade e latências frequentemente elevadas na transmissão de dados (BASAGNI *et al.*, 2013). Essas redes têm sido projetadas para suportar a criação de aplicações que alertam sobre condições da estrada, do tráfego e eventos de trânsito, a fim de possibilitar uma maior segurança e conforto para os motoristas e passageiros (BENAMAR *et al.*, 2014; SHAREF; ALSAQOUR; ISMAIL, 2014).

Uma rede veicular pode se formar e organizar: (i) a partir da comunicação direta entre os veículos, de forma não infraestruturada, conhecida como comunicação Veículo-para-Veículo (em inglês, *Vehicle-to-Vehicle*) (V2V); (ii) a partir da comunicação entre veículo e a infraestrutura de rede, num modelo conhecido como Veículo-para-Infraestrutura (em inglês, *Vehicle-to-Infrastructure*) (V2I); e (iii) de forma híbrida, a partir de uma integração dos modelos V2V e V2I. Assim, as redes veiculares possuem a capacidade de operar tanto de forma puramente *ad hoc*, de forma puramente infraestruturada e, mais comumente, de forma híbrida (AL-SULTAN *et al.*, 2014; SHAREF; ALSAQOUR; ISMAIL, 2014).

No modelo arquitetural V2V puro (Figura 3a), os veículos comunicam-se uns com os outros em modo *ad hoc* para formar uma Rede Veicular *Ad hoc* (em inglês, *Vehicular Ad hoc Network*) (VANET). As VANETs são consideradas especializações ou subclasses das MANETs, onde os veículos assumem o papel dos nós móveis (BASAGNI *et al.*, 2013). Essa derivação decorre do fato de que elas apresentam algumas particularidades que são observadas em sua arquitetura, nos desafios enfrentados, nas características da comunicação ou mesmo nas suas aplicações. Assim como nas MANETs, nessas redes os veículos são capazes de se organizarem e de se gerenciarem de forma autônoma, explorando suas habilidades de comunicação sem fio.

Figura 3 – Cenário de uma rede veicular.

Fonte: Adaptada de Sharef, Alsaqour e Ismail (2014).

No modelo infraestruturado V2I (Figura 3b), os veículos se comunicam (i) diretamente com equipamentos computacionais particulares localizados ao longo das ruas e estradas, também conhecidos como Unidades de Acostamento (em inglês, *Road Side Unit*) (RSU), (ii) com APs Wi-Fi e/ou (iii) com antenas de redes celulares (e.g., 3G, 4G/LTE e 5G). No caso das RSUs, elas podem atuar tanto como elementos centralizadores do tráfego, fazendo *caching* de dados e intermediando a troca de mensagens entre os veículos, por exemplo, quanto como um AP para a Internet ou outras redes. As RSUs foram projetadas exclusivamente para assessorar comunicações em VANETs e são capazes, inclusive, de hospedar certos tipos de aplicações (SHAREF; ALSAQOUR; ISMAIL, 2014).

No modelo arquitetural híbrido (Figura 3c), os veículos se comunicam tanto em modo *ad hoc* (V2V) quanto em modo infraestruturado (V2I). Esse modelo é utilizado para melhorar a conectividade entre os veículos quando a rede encontra-se esparsa, já que essa condição compromete a comunicação se adotado o modelo *ad hoc* puro. Além disso, o modelo híbrido possibilita a interconexão entre redes, que é necessária para o funcionamento de determinadas aplicações (e.g., e-mail, FTP e HTTP). De acordo com Sharef, Alsaqour e Ismail (2014), a vantagem da arquitetura híbrida é que ela oferece uma maior flexibilidade para a operacionalização das aplicações de redes veiculares.

Embora exista uma distinção entre os modelos de comunicação em redes veiculares (i.e., entre as transmissões realizadas de modo infraestruturado e não infraestruturado), é comum encontrarmos na literatura o termo VANET sendo usado para fazer referência a uma arquitetura genérica de comunicação entre veículos, independentemente da presença ou não da infraestrutura. É também com este mesmo sentido que o termo VANET será empregado ao longo deste documento.

2.3.1 Os padrões de comunicação em VANETs

As redes veiculares não se beneficiam exclusivamente de uma tecnologia de comunicação sem fio, mas de um conjunto delas (e.g., Wi-Fi, 3G, 4G/LTE, 5G e WiMax). Embora essas diversas tecnologias possam ser usadas em VANET, desde 2004 há um direcionamento de esforços do grupo de trabalho do IEEE 802.11 para a criação do padrão específico de Comunicação de Curto Alcance Dedicado (em inglês, *Dedicated Short Range Communication*) (DSRC) para essas redes (BASAGNI *et al.*, 2013; AL-SULTAN *et al.*, 2014).

O DSRC é essencialmente o padrão IEEE 802.11a melhorado para prover comunicação de curto alcance de forma eficiente e com uma sobrecarga baixa. Esse novo padrão se tornou conhecido como IEEE 802.11p, ou IEEE 802.11p DSRC, e juntamente com a família de protocolos IEEE 1609 e o SAE J2735 formaram a pilha de Acesso Sem Fio em Ambiente Veicular (em inglês, *Wireless Access in Vehicular Environment*) (WAVE). Uma vantagem do IEEE 802.11p é que ele permite que as estações compatíveis com WAVE se comuniquem e troquem mensagens entre si num ambiente altamente dinâmico, sem a necessidade de elas

ingressarem em um Conjunto Básico de Serviços (em inglês, *Basic Service Set*) (BSS), como ocorre nos padrões IEEE 802.11a/b/g/n do Wi-Fi (AWANG *et al.*, 2017).

Os protocolos da WAVE são capazes de proporcionar transmissões de dados entre os veículos mesmo com eles se deslocando a 200 km/h. Ademais, eles permitem um alcance de comunicação de até 1000 metros e proporcionam taxas de dados que chegam a 27 Mbps (AL-SULTAN *et al.*, 2014). As aplicações DSRC utilizam 75 MHz do espectro de frequências na faixa de 5.9 GHz (5.850-5.925 GHz) para as comunicações veiculares (BASAGNI *et al.*, 2013). Dentro dessa banda existem os Canais de Controle (em inglês, *Control Channel*) (CCH), reservados para as transmissões de alta prioridade, com baixa tolerância a atrasos, e os Canais de Serviço (em inglês, *Service Channel*) (SCH), usados para as demais trocas de dados em geral.

2.3.2 Roteamento de dados em VANETs

As características de mobilidade e dinamicidade próprias das redes veiculares implicam em uma série de condições limitantes para a comunicação, o que acaba tornando os protocolos existentes para DTNs (e.g., aqueles desenvolvidos para MANETs), ineficientes quando aplicados em VANETs (BENAMAR *et al.*, 2014). Algumas das particularidades encontradas nas redes veiculares que motivaram o desenvolvimento de novos algoritmos de roteamento são: (i) a sua topologia bastante dinâmica; (ii) a conectividade intermitente devido a alta velocidade de deslocamento dos carros; (iii) o padrão característico de mobilidade dos nós (e.g., acompanhando as vias); (iv) a distribuição heterogênea dos nós móveis (i.e., VANET densa e esparsa); (v) as restrições no atraso requeridas por algumas aplicações de segurança; e (vi) o acesso restrito ou inexistente à infraestrutura de Internet (SHAREF; ALSAQOUR; ISMAIL, 2014).

Ao contrário do que ocorre em outros tipos de redes móveis, a mobilidade dos veículos pertencentes a uma VANET está fortemente condicionada ao traçado das ruas/rodovias e as orientações impostas pelas sinalizações do código de trânsito. Para Al-Sultan *et al.* (2014), o modelo de mobilidade veicular ainda está diretamente relacionado ao padrão de tráfego e ao padrão de deslocamento resultante do comportamento do motorista. Entender e caracterizar a mobilidade dos veículos são condições relevantes para o desenvolvimento de algoritmos de roteamento mais eficazes e eficientes.

Protocolos eficientes em redes veiculares são aqueles que buscam maximizar a taxa de transferência dos dados enquanto minimizam a taxa de perda de mensagem e, ainda, controlam a sobrecarga computacional dessas operações (SHAREF; ALSAQOUR; ISMAIL, 2014). Existem diversos protocolos de roteamento em VANET reportados pela literatura. Para discutirmos as principais abordagens empregadas nas publicações, iremos considerar a taxonomia apresentada na Figura 4, que está baseada na versão definida por Sharef, Alsaqour e Ismail (2014). Essa taxonomia divide os protocolos de roteamento das redes veiculares em duas categorias principais: (i) protocolos para apoiar comunicações V2V; e (ii) protocolos para apoiar comunicações V2I.

Figura 4 – Taxonomia dos protocolos de roteamento em VANETs.

Fonte: Adaptada de [Sharef, Alsaqour e Ismail \(2014\)](#).

2.3.2.1 Protocolos para V2V

Os protocolos de roteamento para redes veiculares baseados em comunicação V2V são aqueles protocolos focados na transmissão de mensagens pela rede sem a participação das RSUs e/ou das infraestruturas de Internet. Neste sentido, tais protocolos foram projetados para operar no modo *ad hoc*. [Sharef, Alsaqour e Ismail \(2014\)](#) dividem essa categoria nos seguintes grupos:

- Roteamento baseado em topologia:** os protocolos de roteamento baseados em topologia utilizam informações a respeito dos *links* existentes na rede para a tomada de decisão sobre o encaminhamento das mensagens de uma determinada transmissão. As informações dos *links* são mantidas em tabelas e essas são distribuídas pela rede para informar mudanças na topologia. A principal desvantagem desse grupo de protocolos está no consumo excessivo de banda, já que as mudanças constantes na topologia da rede acarretam numa grande quantidade de trocas de tabelas para as atualizações das rotas. Outra desvantagem está no consumo excessivo de memória e processamento em redes veiculares com muitos nós, uma vez que as tabelas trocadas e armazenadas são grandes. As principais estratégias empregadas nos algoritmos desse grupo são derivadas do roteamento baseado em vetor

de distância (Bellman-Ford) e do roteamento baseado em estado de enlace (Dijkstra). Os algoritmos podem ser proativos, reativos ou híbridos. Alguns dos protocolos existentes para a abordagem baseada em topologia são: *Destination-Sequenced Distance Vector*; *Global State Routing Protocol*; *Wireless Routing Protocol*; *Optimized Link State Routing*; *Temporally Ordered Routing Algorithm*; *Ad hoc On-demand Distance Vector*; *Preferred Group Broadcasting*; e *Hybrid Ad hoc Routing Protocol*;

- **Roteamento baseado em localização:** os protocolos pertencentes a esse grupo utilizam informações sobre a localização geográfica dos nós móveis da rede para rotear uma mensagem entre o emissor e o destinatário. As decisões sobre o encaminhamento de mensagens são apoiadas principalmente nas informações provenientes de dispositivos receptores do chamado Sistema de Posicionamento Global (em inglês, *Global Positioning System*) (GPS) e não de tabelas de roteamento, como acontece nos algoritmos baseado em topologia. De acordo com [Sharef, Alsaqour e Ismail \(2014\)](#), esses protocolos dispensam a criação e a manutenção de rotas completas entre a origem e o destino da comunicação. Os algoritmos deste grupo geralmente apresentam um bom desempenho quando empregados em redes veiculares mais densas e com uma distribuição de nós mais regulares, mas sofrem de um problema sério chamado Máximo Local⁵. Alguns dos protocolos existentes que se enquadram na abordagem baseada em localização são: *Greedy Perimeter Stateless Routing*; *Advanced Greedy Forwarding*; *Geographic Source Routing*; *Spatially Aware Packet Routing*; *Anchor-based Street and Traffic Aware Routing*; *Spatial and Traffic Aware Routing*; *MULTI-hop Routing protocols for Urban vanet*; *Grid-based Predictive Geographical routing*; *Position-Based Routing with Distance Vector recovery protocol*; *Landmark Overlays for Urban Vehicular Routing Environments*; e *Junction-based Adaptive Reactive Routing*;
- **Roteamento baseado em *cluster*:** os protocolos de roteamento baseados em *cluster* criam composições de pequenos grupos (i.e., *clusters*) de veículos ao longo das vias de tráfego e se utilizam deles para encaminhar mensagens pela rede. Para cada *cluster* há um veículo atuando como o líder daquele grupo, também chamado de *Cluster Head*. O gerenciamento das comunicações *intra-cluster* e *inter-clusters* é de responsabilidade desse líder. Alguns exemplos de protocolos baseados em clusterização são: *Cluster-Based Routing*; *Cluster-Based Directional Routing Protocol*; *LOCATION Routing Algorithm with Cluster-Based Flooding*; *Clustering for Open IVC Network*; e *Traffic Infrastructure-Based Cluster Routing Protocol with Handoff*;

⁵ O problema chamado de Máximo Local surge quando a estratégia de roteamento dos dados alcança um ponto próximo do destinatário, mas não consegue entregá-los a ele por não haver um *link* de comunicação direta entre eles. Desta forma, os dados ficam estacionados definitivamente nesse ponto. Uma ilustração detalhada do problema pode ser encontrada em ([SHAREF; ALSAQOUR; ISMAIL, 2014](#))

- **Roteamento baseado em *geocast*:** os protocolos pertencentes a esse grupo apoiam-se no uso de informações de localização geográfica dos nós móveis, de maneira similar ao que acontece nos protocolos baseados em localização, para direcionar as transmissões de dados pela rede. Nestas propostas, as mensagens são disseminadas para todos os nós localizados em uma determinada região. Fundamentalmente, trata-se de um serviço *multicast* delimitado por áreas geográficas específicas (SHAREF; ALSAQOUR; ISMAIL, 2014). Alguns dos representantes para essa abordagem baseada em *geocast* são: *Inter-Vehicle Geocast*; *Cached Geocast Routing*; *Abiding Geocast Routing*; *RObust VEhicular Routing*; e *Mobicast*;
- **Roteamento baseado em *multicast*:** os protocolos de roteamento pertencentes a esse grupo geralmente fazem uso de algum tipo de informação (e.g., regiões geográficas e padrões especiais de endereçamento ou identificação dos nós) para realizarem transmissões de mensagens a partir de um único veículo para múltiplos destinatários (i.e., grupos de nós móveis). De acordo com Sharef, Alsaqour e Ismail (2014), esses protocolos constroem estruturas do tipo árvore ou malha para conectar os emissores e os receptores. Alguns dos protocolos existentes que utilizam essa abordagem são: *Multicast Ad hoc On-demand Distance Vector protocol*; *Adaptive Demand-driven Multicast Routing*; *Multicast with Ant colony optimization for VANETs based on MAODV protocol*; *The Multicast Optimized Link State Routing protocol*; *On-Demand Multicast Routing Protocol*; e *Destination Driven On Demand Multicast Routing Protocol*; e,
- **Roteamento baseado em *broadcast*:** os protocolos de roteamento baseados em *broadcast* seguem o método de disseminação de dados via inundação da rede. Nesse esquema, um nó móvel inicia enviando mensagens para todos os outros nós que estiverem ao seu alcance. Na sequência, os nós que receberam tais mensagens irão retransmiti-las para todos os seus nós vizinhos. Essa última etapa do processo se repetirá até que todos os nós móveis da rede sejam alcançados. O modelo de roteamento baseado em *broadcast* sempre encontrará o caminho ótimo até o destinatário das mensagens, mas ele impõe uma sobrecarga considerável à rede, já que utiliza muita banda, ocupa bastante memória e consome muita energia dos nós. Além disso, em redes muito densas essa abordagem pode gerar um problema conhecido como tempestade de *broadcast*⁶. Alguns dos protocolos representantes desse grupo são: *BROADCOMM*; *Urban Multi-hop Broadcast*; *Distributed Vehicular Broadcast*; *Edge-Aware Epidemic Protocol*; *Hybrid Data Dissemination*; e *DENsity-aware reliable broadCasting*.

⁶ Uma tempestade de *broadcast* ocorre quando uma rede é sobrecarregada pelo tráfego das transmissões e retransmissões contínuas. Em condições extremas, o número de colisões de pacotes será tão alto que os nós não conseguirão mais se comunicar uns com os outros.

2.3.2.2 Protocolos para V2I

Os protocolos de roteamento para redes veiculares baseados em comunicação V2I são aqueles protocolos focados na transmissão de mensagens pela rede com a participação de RSUs, redes celulares ou de APs Wi-Fi. De acordo com [Sharef, Alsaqour e Ismail \(2014\)](#), os protocolos de modo infraestruturado gozam da vantagem de proporcionar uma maior taxa média de entrega de mensagens e de reduzir os atrasos fim a fim nas transmissões. Os autores dividem essa categoria de protocolos nos dois grupos a seguir:

- **Roteamento baseado em infraestrutura estática:** os protocolos de roteamento baseados em infraestrutura estática empregam o uso de RSUs dispostas ao longo das vias de tráfego ou em pontos específicos (e.g., cruzamentos) para auxiliar no roteamento de mensagens. Neste grupo de protocolos, as RSUs podem atuar tanto como nós retransmissores de pacotes, quanto como APs para outras redes (e.g., Internet). A maior desvantagem destes protocolos é a quantidade de RSUs que podem ser necessárias para oferecer ampla conectividade aos veículos. Como são equipamentos caros, os custos relacionados à aquisição, implantação e manutenção de tais infraestruturas pode inviabilizar a adoção destas propostas. Alguns dos protocolos existentes que empregam o uso de roteamento baseado em infraestrutura estática são: *Static node-assisted ADaptiVe routing protocol*; *Roadside-Aided Routing*; *Vertex-based Predictive Greedy Routing*; *Infrastructure-Assisted Geo-Routing*; e *MOtion VEctor routing algorithm*; e,
- **Roteamento baseado em infraestrutura móvel:** os protocolos de roteamento pertencentes a esse grupo empregam o uso de alguns veículos da própria VANET para prover os mesmos serviços disponibilizados pelas RSUs estáticas. Neste sentido, um ou mais veículos atuam como *gateways* móveis da rede. Veículos com a capacidade de atuarem com *gateways* são equipados com pelo menos duas interfaces de comunicação sem fio: (i) uma para a comunicação V2V (i.e., IEEE 802.11p); e (ii) outra para a comunicação V2I (e.g., 3G, 4G/LTE e 5G). Alguns dos protocolos existentes que empregam o uso de roteamento baseado em infraestrutura móvel são: *Mobile Infrastructure-Based vanet Routing*; *Mobile Gateway Routing Protocol*; e *Prediction-Based Routing*.

O projeto e desenvolvimento de protocolos de roteamento em VANETs são cruciais para suportar a criação de aplicações para tornar o trânsito mais seguro e mais confortável para os seus usuários ([SHAREF; ALSAQOUR; ISMAIL, 2014](#)). A proposta desenvolvida nesta tese de doutoramento explora as vantagens das abordagens de roteamento baseadas em V2V, e os benefícios daquelas baseadas em V2I, para a composição de uma solução híbrida V2V-V2I. Nesta direção, esta pesquisa está alinhada com uma tendência recente cujo foco é combinar as duas técnicas de roteamento para a obtenção de resultados mais eficientes e/ou desejáveis, conforme apontado por [Sharef, Alsaqour e Ismail \(2014\)](#).

2.3.3 Sistemas inteligentes de transporte

Uma das aplicações das VANETs é apoiar o funcionamento dos Sistemas Inteligentes de Transporte (em inglês, *Intelligent Transportation System*) (ITS) ⁷. Os ITSs podem ser definidos como um conjunto de serviços (e.g., de gerenciamento do tráfego, de acompanhamento das condições da pista e de monitoramento das condições de risco para o motorista) que são integrados na tentativa de tornarem os sistemas de transporte mais seguros e eficientes. Eles também buscam oferecer mais conforto para os condutores e para os passageiros, tornando suas experiências com a direção ou com os meios de transporte mais agradáveis (BENAMAR *et al.*, 2014).

Os ITSs exploram a comunicação entre os veículos ou entre os veículos e as infraestruturas (e.g., as RSUs) para a transmissão de dados necessários para o funcionamento de seus serviços. De acordo com Al-Sultan *et al.* (2014) e Benamar *et al.* (2014), as principais aplicações que estão sendo idealizadas para apoiar os ITSs podem ser divididas nos seguintes grupos:

- **Aplicações para a segurança no trânsito:** visam prevenir acidentes e garantir uma maior proteção para a integridade dos motoristas e dos passageiros. Alguns exemplos desta categoria são as aplicações de (i) prevenção de colisão em cruzamentos, (ii) alerta para a prevenção ou ocorrência de acidentes em rodovias, (iii) alerta sobre condições adversas do veículo e (iv) assistentes de conversão em vias ortogonais;
- **Aplicações para a eficiência e gerenciamento do tráfego:** visam monitorar condições do trânsito a fim de melhorar sua eficiência. Essa categoria é composta por aplicações, tais como as (i) de monitoramento de congestionamentos, (ii) de acompanhamento e coordenação das condições de fluxo do tráfego, (iii) de assistência ao motorista para encontrar vagas em estacionamento, e as (iv) de sugestão de rotas; e,
- **Aplicações para o entretenimento e informação:** visam prover um maior nível de conforto para os motoristas e passageiros. Essa categoria é composta também por aplicações de valor agregado, tais como as de (i) pagamento eletrônico de pedágio e estacionamento, (ii) localização de pontos de interesses próximos (e.g., restaurantes, postos de combustível e hotéis), (iii) acesso à internet e (iv) envio/recebimento de mensagens.

Dentre os entraves existentes para a difusão em massa dos ITSs está o alto investimento necessário para a aquisição e implantação da infraestrutura de suporte às aplicações. Uma alternativa viável para tal problema seria criar aplicações de ITS que façam uso das tecnologias já embarcadas nos veículos modernos para operacionalizar a coleta e disponibilização de dados. Além de tornar as aplicações mais flexíveis, os custos envolvidos poderiam ser consideravelmente

⁷ A tradução da denominação em inglês *Intelligent Transportation System* adotada nesta tese foi a mesma empregada pela Associação Nacional de Transportes Urbanos, disponível em <<http://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub635889696401808391.pdf>>

menores. Foi com esse propósito que surgiu o sensoramento veicular colaborativo, discutido em detalhes na próxima Subseção.

2.3.4 Sensoriamento veicular colaborativo

O Sensoriamento Colaborativo Móvel (em inglês, *Mobile CrowdSensing*) (MCS)⁸ emergiu como um paradigma inovador de sensoriamento que é caracterizado pelo uso de dispositivos móveis tradicionalmente já integrados na vida cotidiana das pessoas (e.g., *smartphones*, *tablets*, relógios inteligentes e veículos) como fonte de dados para uma série de aplicações (GANTI; YE; LEI, 2011). Devido às capacidades computacionais e ao número de tecnologias embarcadas nesses dispositivos (e.g., sensores e interfaces de comunicação sem fio), eles podem gerar uma grande quantidade de dados que, se enviados para a Internet, são potencialmente úteis para o monitoramento de diversos fenômenos do mundo real.

A terminologia *Mobile CrowdSensing* foi cunhada em 2011 pelos então pesquisadores da IBM Ganti, Ye e Lei (2011), mas outras nomenclaturas, tais como *Human/People-Centric Networks* (CAMPBELL *et al.*, 2008), *Participatory Sensing* (ESTRIN *et al.*, 2010) e *Opportunistic Sensing* (TAVENARD *et al.*, 2007; KAPADIA; KOTZ; TRIANDOPOULOS, 2009) também são encontradas na literatura com significados adjacentes a esse modelo de sensoriamento. Uma das maiores vantagens do MCS é a possibilidade de observação de fenômenos em larga escala, dificilmente realizada com as abordagens tradicionais do sensoriamento estático.

De acordo com Ganti, Ye e Lei (2011), o MCS pode ser subdividido em duas classes: (i) sensoriamento participativo (em inglês, *Participatory Sensing*) (PS), que demanda um envolvimento ativo dos usuários na atividade de coleta de dados (e.g., respondendo explicitamente a um questionário, tirando uma fotografia e executando uma aplicação específica); e (ii) sensoriamento oportunista (em inglês, *Opportunistic Sensing*) (OS), em que a participação ativa dos usuários no processo de coleta de dados é mínima ou inexistente (e.g., um serviço executando em *background* que registra automaticamente as coordenadas de GPS do dispositivo e as envia para um servidor mediante alguma condição programada). A escolha da classe de MCS a ser empregada nas atividades de sensoriamento é uma tarefa importante e, normalmente, está condicionada ao fenômeno observado e a natureza da aplicação.

O MCS tem aberto novas possibilidades para a criação de diversos tipos de aplicações inovadoras, nos mais variados domínios. Ganti, Ye e Lei (2011) realizam uma segmentação genérica das principais em três categorias: (i) de monitoramento ambiental; (ii) de monitoramento da infraestrutura; e (iii) de monitoramento social e/ou de cuidado de saúde.

Na categoria (i) o fenômeno observado está relacionado ao ambiente natural, podendo ser, por exemplo, o nível de poluição sonora e/ou do ar em uma cidade (e.g., *Common Sense*

⁸ Neste documento de tese, o termo Sensoriamento Colaborativo Móvel será empregado como uma tradução livre da terminologia *Mobile CrowdSensing*, cujo sentido foi definido originalmente em (GANTI; YE; LEI, 2011).

(DUTTA *et al.*, 2009)), a temperatura média em uma determinada região, o nível da água em um rio urbano e os hábitos de animais selvagens. Aplicações de MCS para acompanhar o nível da água em um rio urbano, por exemplo, para alertar a população sobre enchentes, poderiam ter os dados reportados pelas pessoas residentes nas margens do rio via PS, usando seus dispositivos móveis para enviar fotos do rio ou Serviço de Mensagens Curtas (em inglês, *Short Message Service*) (SMS). Já para o monitoramento dos hábitos comportamentais de animais selvagens, seria mais apropriado empregar o OS.

Na categoria (ii), o fenômeno observado tem correspondência com a infraestrutura pública, podendo ser, dentre outros, o nível de congestionamento do trânsito (e.g., CarTel (HULL *et al.*, 2006) e Nirecell (MOHAN; PADMANABHAN; RAMJEE, 2008)), as condições das ruas e estradas, a disponibilidade de vagas em estacionamentos públicos e as condições de sinalização das vias. Aplicações de MCS para identificar pontos de congestionamentos em pistas urbanas, por exemplo, podem obter os dados tanto via OS, com os registros dos sensores dos veículos sendo reportados periodicamente, ou usando PS, através de fotografias ou de SMS enviadas(os) pelos próprios motoristas e/ou passageiros. O Waze⁹ é um excelente exemplo de aplicativo de MCS que opera com o uso de PS.

Na categoria (iii), o fenômeno observado está associado a hábitos de relacionamento dos indivíduos em sociedade e/ou ao cuidado de saúde. Alguns exemplos de fenômenos observados nesta categoria são: nível de obesidade da população de uma cidade; hábitos alimentares de pacientes com doenças crônicas (e.g., DietSense (REDDY *et al.*, 2007)); atividades físicas praticadas pelas pessoas; e hábitos e atividades de lazer dos indivíduos. Aplicações de MCS para acompanhar os hábitos alimentares de pessoas com diabetes, por exemplo, usualmente utilizam dados reportados pelos usuários via PS, por meio de publicações de fotografias e/ou mensagens a respeito de suas dietas nas mídias sociais. Outras pessoas com a mesma doença podem usar informações geradas por essas aplicações para melhorarem seus hábitos alimentares ou para se manterem aderentes às dietas que lhes foram recomendados.

A variedade de tecnologias que vem sendo incorporada nos automóveis modernos está lhes concedendo a capacidade de atuarem como verdadeiras MSPs (GORRIERI *et al.*, 2016). Com uma grande quantidade de recursos embarcados, a nova geração de veículos inteligentes/-conectados (em inglês, *smart vehicles*) possui a capacidade de transportar consigo uma coleção riquíssima de dados (e.g., relacionados ao consumo de combustível, posicionamento do GPS, *status* do motor, velocidade, direção e medições de poluição) que podem servir a uma pluralidade de aplicações, sejam elas relacionadas à segurança do trânsito, ao gerenciamento do tráfego ou mesmo ao entretenimento e informação (TIMPNER; WOLF, 2016).

O Sensoriamento Veicular Colaborativo (em inglês, *Vehicular CrowdSensing*) (VCS) é uma especialização mais recente do MCS. Trata-se de um campo particular de aplicação do MCS em que os nós móveis considerados no sensoriamento são basicamente compreendidos

⁹ Waze: <<https://www.waze.com/pt-BR>>.

por veículos (MASINI, 2016). No domínio dos ITSs, o VCS apresenta um potencial promissor para a viabilização de diversos serviços inovadores que são considerados essenciais para a construção das chamadas Cidades Inteligentes (em inglês, *Smart Cities*) (SC) (SU; LI; FU, 2011; KYRIAZOPOULOU, 2015). Ele permite a implantação de poderosos sistemas de monitoramento explorando apenas as tecnologias já incorporadas nos veículos, dispensando a necessidade de instalação extensiva de novas infraestruturas (BAZZI; ZANELLA, 2016). Como resultado, essa abordagem torna o paradigma de monitoramento remoto mais dinâmico e com um custo de implantação reduzido.

2.3.4.1 Arquitetura Genérica do VCS

A arquitetura genérica do VCS normalmente engloba três componentes, reproduzidos graficamente na Figura 5. O primeiro é representado pelos veículos, que são equipados com capacidade de processamento, de armazenamento, com tecnologias de comunicação sem fio e com vários tipos de sensores. Seus elementos de *hardware* estão geralmente interligados a uma Unidade de Bordo (em inglês, *On Bord Unit*) (OBU), que também hospeda um Sistema Operacional (SO) e aplicações clientes projetadas para a coleta de dados diretamente dos dispositivos sensores. O segundo é representado por um servidor de monitoramento, normalmente hospedado na nuvem, que, dotado de alta capacidade computacional e armazenamento, é responsável pelo processamento, persistência e disponibilização dos dados para os usuários ou para serem consumidos por outras aplicações via comunicação Máquina-para-Máquina (em inglês, *Machine-to-Machine*) (M2M) (WEYRICH; SCHMIDT; EBERT, 2014). O terceiro, e último, é representado pelas infraestruturas de conectividade sem fio instaladas no ambiente, que possibilita a comunicação entre os dois componentes anteriores.

As funcionalidades atribuídas a cada um dos componentes descritos anteriormente pode variar de acordo com o cenário e o subdomínio das aplicações. Algumas abordagens distintas têm sido propostas pela comunidade acadêmica na tentativa de aperfeiçoar o monitoramento em termos de (i) redução no consumo de recursos, (ii) aumento da segurança dos dados, (iii) aumento da qualidade do sensoriamento e (iv) garantia da integridade dos dados. Por exemplo, Higuchi *et al.* (2014) sugerem que os dados dos sensores passem por um pré-processamento *in loco* na tentativa de reduzir o consumo de recursos da rede que os transportará ao centro de monitoramento.

Uma das grandes vantagens do modelo adotado pelo VCS, em comparação ao do paradigma tradicional de sensoriamento, é a sua capacidade de permitir que aplicações diversas coexistam na mesma infraestrutura e, ainda, que elas façam reuso dos dados coletados. Monitorar fenômenos em larga escala incorre, na maioria das vezes, na necessidade de tratamento/processamento de um volume enorme de dados. Não reaproveitá-los para diferentes propósitos, ou seja, ter de coletar o mesmo dado diversas vezes para atender às necessidades de cada aplicação resultaria num desperdício muito grande de recursos (e.g., banda, memória e processamento).

Figura 5 – Arquitetura genérica do VCS

Fonte: Adaptada de [Ganti, Ye e Lei \(2011\)](#), [Ma, Zhao e Yuan \(2014, 2014\)](#).

Um exemplo apresentado em ([GANTI; YE; LEI, 2011](#)) ilustra algumas situações que demonstram o potencial de reuso dos dados coletados usando o VCS. Digamos que registros dos acelerômetros de um conjunto de veículos estejam sendo coletados por uma aplicação $\mathcal{A}$, residente num centro de monitoramento, que acompanha padrões comportamentais dos motoristas enquanto eles dirigem. Esses registros obtidos poderiam ser também aproveitados por uma aplicação $\mathcal{B}$, para detectar, por exemplo, problemas de infraestrutura na pista (e.g., buracos), e/ou até mesmo por uma aplicação $\mathcal{C}$, que identifica condições de congestionamento no trânsito. Desta forma, evita-se a necessidade de novas aquisições específicas de dados por parte de cada uma delas.

No aspecto da comunicação, a arquitetura do VCS prevê dois tipos de transmissões: (i) baseada exclusivamente em V2I, em que os dados dos sensores dos veículos são reportados para o servidor de monitoramento via conexões diretas com a Internet (e.g., 3G, 4G/LTE, 5G, RSUs e APs Wi-Fi); e (ii) baseadas em V2V e V2I, em que os dados *in loco* são coletados e compartilhados entre os veículos usando a tecnologia de comunicação *ad hoc* sem fio do padrão IEEE 802.11p, e, posteriormente, enviados ao centro de monitoramento por um número reduzido de acessos V2I. Este último modo de transmissão é útil para duas situações específicas:

(a) permitir que alguns veículos participem das atividades de sensoriamento mesmo diante da ausência de conectividade direta entre eles e a Internet, condição em que os dados não poderiam ser enviados ao servidor; e, (b) para implementar técnicas de descarregamento de dados do sensoriamento sobre as redes móveis (MA; ZHAO; YUAN, 2014; MASINI, 2016). As investigações conduzidas neste projeto de doutorado consideraram o uso de transmissões V2V e V2I tendo em vista o propósito definido em (b).

2.3.4.2 Desafios em VCS

Os cenários de VCS são bastante dinâmicos e heterogêneos, já que normalmente compreendem diversas categorias de veículos (e.g., passeio, utilitários, caminhões e ônibus), dos mais simples aos mais sofisticados. Além disso, as condições de comunicação encontradas nesses ambientes nem sempre são favoráveis para o funcionamento das atividades de sensoriamento. Para Ganti, Ye e Lei (2011), Ma, Zhao e Yuan (2014), Masini (2016) e Bazzi e Zanella (2016), essas e outras características trazem uma série de desafios para as aplicações.

A limitação de recursos dos veículos, por exemplo, é um desses desafios. Os autores destacam que os automóveis que participam do VCS são bastante diversificados e com configurações distintas. Garantir a qualidade geral do sensoriamento considerando a disponibilidade de recursos de cada um é uma tarefa complexa, mas necessária. Esse controle também é importante para que as tarefas de coleta de dados não comprometam a Qualidade de Experiência (em inglês, *Quality of Experience*) (QoE)¹⁰ dos usuários (i.e., motoristas e passageiros) com as suas aplicações.

O paradigma VCS é altamente dependente do envolvimento dos usuários nas atividades de coleta e transmissão de dados, já que os veículos usados no sensoriamento são de propriedade deles. Considerando que o altruísmo é condição *sine qua non* para o funcionamento das aplicações, é fundamental que se crie e implemente mecanismos de incentivos (e.g., micropagamentos e recompensas) para garantir a adesão e participação de voluntários nas atividades de sensoriamento.

Um terceiro desafio está relacionado com a garantia de privacidade e segurança dos dados e dos usuários. Dados de sensores de GPS, por exemplo, usados por aplicações que fazem a detecção de regiões de congestionamento em uma cidade, podem acabar expondo informações privadas de localização dos motoristas. Logo, é importante que haja mecanismos para evitar que os dados dos diversos sensores sejam revelados para pessoas mal intencionadas. Além disso, é preciso garantir aspectos como autenticação, confiabilidade e integridade, isto é, assegurar que os dados são provenientes de uma fonte segura, confiável, e que não foram alterados.

Promover transmissão eficiente de dados entre os veículos ou entre eles e a Internet também é considerada um enorme desafio em cenários de VCS. Os autores ressaltam que a transmissão dos dados brutos coletados a partir dos sensores pode levar a um consumo excessivo

¹⁰ A Qualidade de Experiência é avaliada na perspectiva do usuário e tem relação direta com a sua expectativa e satisfação ao utilizar um determinado serviço (REBECCHI *et al.*, 2015).

de banda e sobrecarregar tanto a rede quanto o servidor de monitoramento. Neste sentido, é preciso criar mecanismos de análises das informações *in loco*, nos próprios veículos, de forma que tanto os recursos da rede quanto os dos automóveis sejam preservados. Aplicar técnicas (i) de agregação/fusão de dados ou (ii) de descarregamento do tráfego de dados nas redes móveis são algumas das possibilidades. Alinhada com essa última abordagem, a proposta desenvolvida neste projeto de doutorado busca prover uma solução para o descarregamento de dados nas infraestruturas celulares, considerando que essas são mais empregadas no VCS. É neste desafio que estão centrados os estudos e as principais contribuições de nossa pesquisa.

DESCARREGAMENTO DE DADOS EM REDES MÓVEIS

Este capítulo de fundamentação teórica versará sobre as principais técnicas usadas para o descarregamento de dados em redes móveis, destacando a sua importância para as comunicações infraestruturadas. Ele está organizado da seguinte maneira: a [Seção 3.1](#) esboça as considerações iniciais; a [Seção 3.2](#) trata das abordagens criadas para o descarregamento de dados *in-band*; as estratégias de descarregamento de dados *out-of-band* são discutidas na [Seção 3.3](#); a [Seção 3.4](#) aponta os principais desafios de pesquisa ainda existentes nesse domínio; e por fim, a [Seção 3.5](#) apresenta algumas abordagens da literatura para o descarregamento de dados em redes celulares, consideradas do estado da arte, e que estão diretamente relacionadas com a proposta descrita neste documento.

3.1 Considerações iniciais

A (i) adoção massiva aos dispositivos móveis, tais como os *smartphones*, *tablets* e relógios inteligentes; a (ii) implantação ainda que embrionária da IoT e dos veículos inteligentes; o (iii) uso intensivo dos aplicativos de mídias sociais, de comércio eletrônico e de serviços da economia compartilhada¹ (e.g., *Blablacar* e *Uber*); e o (iv) surgimento de paradigmas inovadores para a coleta de dados de forma colaborativa (e.g., MCS e VCS), têm contribuído para que a quantidade de dados transmitidos através das infraestruturas das redes celulares tenha atingido, nos últimos anos, patamares inimagináveis para esse começo do século.

¹ Economia Compartilhada (do inglês, *Sharing Economy*) é um modelo de economia inovador em que as relações de consumo dos recursos são desenvolvidas de forma mais sustentável, baseadas na ideia de compartilhamento, troca ou empréstimo. Os recursos nesse contexto podem ser tanto mercadorias (e.g., casa, carro, ferramentas e dinheiro) quanto serviços (e.g. de hospedagem, de transporte e de viagens) ([HEINRICHS, 2013](#)).

De acordo com (CISCO, 2018), o volume de dados móveis² cresceu 18 vezes nos últimos 5 anos e, globalmente, poderá ultrapassar a marca dos 49 exabytes mensal até o ano de 2021, o que representará um montante anual superior a 0,5 zettabyte e uma sobrecarga sem precedentes para as redes celulares. Gerenciar essa escalada exponencial de tráfego, juntamente com uma demanda crescente dos usuários por acessos móveis cada vez mais rápidos, é, hoje em dia, um dos desafios mais envolventes para as operadoras. Para acomodar essas demandas é necessário grandes investimentos, tanto na aquisição e/ou melhoria dos equipamentos da Rede de Acesso via Rádio (em inglês, *Radio Access Network*) (RAN) quanto na adequação dos equipamentos da chamada infraestrutura de núcleo. Ademais, o espectro licenciado disponibilizado às operadoras é escasso e isso dificulta os aprimoramentos das RANs (REBECCHI *et al.*, 2015).

A principal consequência desse crescimento acelerado de tráfego sobre uma infraestrutura que já se encontra estrangulada é a deterioração do desempenho da rede e, portanto, da QoS fornecida às aplicações. Essa situação pode ser evidenciada, por exemplo, durante condições de pico de uso dos dados móveis em grandes centros urbanos (e.g., nos eventos musicais e esportivos com altas aglomerações), onde normalmente se nota latências mais elevadas, baixa taxa de transferência de dados e interrupções de conectividade. Isso ocorre porque os recursos dessas redes sem fio são limitados e, portanto, devem ser compartilhados entre os usuários. Quanto mais usuários envolvidos na comunicação, maior será o congestionamento e a sobrecarga no nível da RAN. Com menos recursos disponíveis para atender cada um deles, menor será então a QoS percebida.

Cientes deste enorme desafio, a academia, a indústria e as empresas de telecomunicação móvel começaram a se debruçar em propostas menos onerosas do que a de simplesmente promover a substituição, atualização e/ou ampliação das infraestruturas de comunicação. Desde então, vários métodos têm emergido nessa direção e com grande potencial de aliviar toda essa pressão sobre as redes celulares. A essência dos que iremos destacar aqui consiste em promover o chamado Descarregamento de Dados Móveis (em inglês, *Mobile Data Offloading*) (MDO) (REBECCHI *et al.*, 2015), cujo propósito é reduzir a demanda geral de recursos na RAN das operadoras. Ele pode ser empregado tanto nos canais de *upload* quanto nos de *download* dos dados.

De acordo com Rebecchi *et al.* (2015), as principais soluções que estão sendo desenvolvidas para a implementação do MDO são: (i) uso de tecnologias sem fio complementares (e.g., Wi-Fi) para escoar os dados que, originalmente, eram destinados à rede móvel³; (ii) empregando um modelo inovador de comunicação em redes celulares que explora transmissões oportunistas⁴

² A terminologia dados móveis é empregada neste documento para se referir aos dados que são transmitidos sobre a infraestrutura das redes celulares.

³ No contexto de MDO, os termos *redes móveis* e *redes celulares* serão usados de maneira alternada ao longo desta tese, mas ambos compartilham da mesma semântica. Cabe apresentar uma ressalva aqui para o fato de que o termo *redes móveis* tratado neste capítulo diverge fundamentalmente do termo *redes móveis ad hoc* tratado no Capítulo 2 - Seção 2.2.

⁴ Transmissões oportunistas são aquelas transmissões que ocorrem de forma não programada, de maneira

do tipo Dispositivo-para-Dispositivo (em inglês, *Device-to-Device*) (D2D); (iii) utilização de ERBs de tamanho reduzido (e.g., *picocells* e *femtocells*); (iv) integração de mecanismos de rádio cognitivos; e (v) uso de *pushing*⁵ proativo de conteúdo popular.

As abordagens (i) e (ii) tratadas acima estão representadas na Figura 6, juntamente com o modelo de acesso e comunicação móvel que não implementa o descarregamento de dados (Figura 6a). Cabe ressaltar aqui que, em uma rede celular tradicional, sem o uso do MDO, todas as comunicações devem passar obrigatoriamente pela ERB, mesmo que ambas as partes comunicantes estejam próximas o bastante para uma possível transmissão direta entre elas (ASADI; WANG; MANCUSO, 2014). A técnica (i) está ilustrada na Figura 6b, onde o MDO é realizado com o suporte de um AP Wi-Fi. Na figura, um dispositivo móvel recebe os dados diretamente da ERB e os demais, por intermédio de um AP Wi-Fi, liberando, assim, recursos da RAN para o atendimento de outras requisições. O esquema (ii) está reproduzido graficamente na Figura 6c. Nele, o MDO é implementado por meio do uso de transmissões diretas entre os dispositivos, sem que a troca de dados passe pela ERB ou pela infraestrutura de núcleo da rede móvel. Na figura, a ERB envia os dados a um dispositivo e este se encarrega de disseminá-los aos demais interessados através de transmissões D2D. O estabelecimento dos *links* de comunicação D2D pode ocorrer com ou sem o suporte de uma ERB⁶.

Figura 6 – Abordagens para o descarregamento de dados em redes celulares.

Fonte: Adaptada de Rebecchi *et al.* (2015).

Além de reduzir o congestionamento na infraestrutura das redes celulares, Feng *et al.* (2014) e Rebecchi *et al.* (2015) destacam que a implantação do MDO é capaz de proporcionar outros benefícios adjacentes: (i) o aumento da capacidade e disponibilidade das redes móveis; (ii) o aumento da taxa média de transmissão de dados; (iii) a diminuição do atraso global percebido;

espontânea, mediante alguma condição inesperada e favorável para a comunicação.

⁵ Neste modo, os dados podem ser pró-ativamente armazenados em *cache* no dispositivo do usuário, na ERB da rede celular ou nos APs Wi-Fi, ficando à disposição imediata para as próximas requisições (REBECCHI *et al.*, 2015).

⁶ Uma ERB também é conhecida como *Evolved NodeB* ou *E-UTRAN Node B* (eNodeB) nas redes de telefonia móvel de quarta geração (4G).

(iv) a melhoria na eficiência energética dos equipamentos; (v) a melhoria na eficiência do uso do espectro; e (vi) a ampliação das áreas de coberturas das redes celulares. Essas vantagens favorecem tanto as operadoras móveis quanto os usuários, já que o aumento na qualidade dos serviços de comunicação ofertados proporciona uma melhor experiência de uso das aplicações.

Em se tratando do descarregamento baseado na abordagem D2D, uma vez que a pesquisa apresentada nesta tese concentra-se nesse modo de operação do MDO, as propostas que estão sendo criadas podem ser divididas em duas vertentes, conforme destacado em (REBECCHI *et al.*, 2015): (i) soluções que dedicam parte da banda licenciada⁷ das redes celulares às comunicações diretas, também chamadas de soluções D2D *in-band* ou D2D *inband*; e (ii) soluções dependentes de tecnologias de comunicação sem fio alternativas, que operam em bandas não licenciadas⁸, para estabelecerem as comunicações diretas. As soluções deste último grupo são chamadas de D2D *out-of-band* ou D2D *outband*. Para fins de padronização, usaremos os termos D2D *in-band* e D2D *out-of-band* no texto desta tese.

Segundo Asadi, Wang e Mancuso (2014) o modelo de comunicação D2D *in-band* pode ser implementado como D2D *in-band underlay* ou D2D *in-band overlay*; e o D2D *out-of-band* como D2D *out-of-band controlled* ou D2D *out-of-band autonomous*. Uma representação gráfica de como essas comunicações estão estruturadas pode ser visualizada na Figura 7. As características e as particularidades de cada modo de operação do D2D, assim como as suas contribuições para o MDO, serão discutidas nas próximas subseções.

Figura 7 – Uma classificação para as comunicações do tipo D2D

Fonte: Adaptada de Asadi, Wang e Mancuso (2014).

⁷ Como o próprio nome indica, essas faixas de frequência precisam de uma autorização (licença) de órgãos reguladores para que possam ser utilizadas pelas operadoras.

⁸ As faixas de frequência utilizadas para essas tecnologias são a banda Industrial, Científica e Médica (em inglês, *Industrial, Scientific & Medical*) (ISM), que compreende três segmentos do espectro: 902 MHz a 928 MHz, 2.400 MHz a 2.483,5 MHz e 5.725 MHz a 5.850 MHz; e a banda Infraestrutura Nacional de Informação Não Licenciada (em inglês, *Unlicensed National Information Infrastructure*) (U-NII), que contém as faixas de frequências entre 5.150 MHz e 5.725 MHz.

3.2 Descarregamento de dados D2D *in-band*

Para o provimento de MDO D2D *in-band*, as linhas de desenvolvimento dos padrões 3GPP⁹ *Long Term Evolution* (LTE) e *Long Term Evolution-Advanced* (LTE-A) (Rel-12) (WANNSTROM, 2013) trabalham para integrar as capacidades de comunicação do D2D em futuras arquiteturas das redes celulares. Isso significa que as transmissões do tipo D2D ocorrerão na mesma banda licenciada das transmissões infraestruturadas tradicionais das redes móveis.

Nas comunicações diretas do tipo D2D *in-band* é essencial que os dispositivos estejam suficientemente próximos fisicamente uns dos outros para que as transmissões ocorram. A distância máxima entre os nós até então considerada pela especificação é de 1000 m (FENG *et al.*, 2014). Para apoiar esse modo de trocas de dados, a rede móvel oferece um serviço de descoberta de dispositivos e de determinação das proximidades entre os mesmos, chamado de Serviço de Proximidade Dispositivo-a-Dispositivo (em inglês, *Device-to-Device Proximity Service*) (D2D ProSe) (REBECCHI *et al.*, 2015). De acordo com Mota *et al.* (2016), o D2D ProSe reutiliza a interface de radio LTE para permitir a comunicação direta entre dispositivos e a infraestrutura possui um papel essencial na configuração da conexão, da sessão e até mesmo no estabelecimento das rotas para os dados que estão sendo transmitidos.

O processo de descoberta dos dispositivos que irão estabelecer a comunicação D2D pode ser abordado sob duas perspectivas: (i) dos usuários; e (ii) da rede. Na (i), os dispositivos, chamados no contexto de redes móveis de Equipamento de Usuário (em inglês, *User Equipment*) (UE), poderão ser descobertos uns pelos outros somente mediante autorização explícita de seus usuários (descoberta restrita), ou eles podem estar configurados para detecção automática assim que entram no alcance de comunicação uns dos outros (descoberta aberta). Na perspectiva (ii), a ERB pode solicitar aos usuários que desejam iniciar o D2D ProSe que transmitam sinais de descoberta especiais (e.g., de identidade e de serviços desejados) para que ela especifique então quais usuários ao redor estarão aptos a receberem tais sinalizações. Neste modelo assistido pela rede, a ERB pode transmitir em modo *broadcast* o conjunto de recursos que pode ser usado para enviar ou receber sinais de descoberta. Usuários que desejarem participar de comunicações D2D podem então ouvir e enviar as suas sinalizações de descoberta dentro dos recursos disponíveis (FENG *et al.*, 2014).

A literatura sobre comunicações D2D *in-band* propõe duas formas de utilização do espectro licenciado das redes celulares para acomodar as transmissões: (i) uso do espectro inteiro tanto para as comunicações diretas D2D quanto para as comunicações tradicionais da rede móvel. Este modelo compartilha os mesmos recursos de rádio e é chamado de *D2D in-band underlay*; e (ii) uso de uma parte do espectro para as comunicações diretas D2D e outra para as comunicações sobre os *links* móveis. Este último, que dedica recursos para cada modo de

⁹ 3GPP é um acrônimo para Projeto de Parceria para a Terceira Geração (em inglês, *3rd Generation Partnership Project*) (3GPP). Trata-se de uma organização do setor de telecomunicações que gerencia o desenvolvimento de padrões para as tecnologias das redes móveis.

operação, é conhecido como *D2D in-band overlay*. O maior desafio em (i) está em tratar as interferências resultantes dos dois modos de comunicação sobre o mesmo espectro, enquanto que na abordagem (ii) está em como otimizar a alocação de recursos para as comunicações celulares e para a D2D, já que eles precisam ser divididos (ASADI; WANG; MANCUSO, 2014). Essas duas formas de uso do espectro celular estão reproduzidas graficamente na Figura 8.

Figura 8 – Representação gráfica das formas de utilização do espectro das redes celulares no D2D *in-band*

Fonte: Adaptada de Asadi, Wang e Mancuso (2014).

De acordo com Rebecchi *et al.* (2015), apesar de todos os avanços e benefícios do MDO *in-band*, as tecnologias de D2D *out-of-band* têm se mostrado candidatas mais promissoras para a implementação do MDO num curto e médio prazo. A padronização das comunicações D2D *in-band* em redes celulares encontra-se ainda em estágios muito iniciais e precisa ser bastante amadurecida antes de ser colocada em campo para operação, conforme destacado em (ANDREEV *et al.*, 2014).

3.3 Descarregamento de dados D2D *out-of-band*

Do ponto de vista técnico, as ERBs das redes celulares são projetadas para cobrirem áreas que vão de 1-2 km de diâmetro em centros urbanos e de 4-12 km em áreas periféricas e/ou rurais. Os padrões da família IEEE 802.11 Wi-Fi, por outro lado, oferecem coberturas mais moderadas, cujos alcances são da ordem de 30-100 metros. Em relação às taxas de transmissão, as redes locais sem fio baseadas em Wi-Fi são geralmente muito mais rápidas do que as redes celulares (REBECCHI *et al.*, 2015). Neste sentido, o uso combinando dessas diferentes tecnologias, com suas características e capacidades diversificadas, vem demonstrando um potencial promissor para a operacionalização do MDO tipo *out-of-band* (FUXJAGER *et al.*, 2011; LEE *et al.*, 2013).

Um exemplo particular presente na literatura que comprova tal potencial é a distribuição cooperativa de dados. Nos esquemas apresentados em (KANG; MUTKA, 2005; STIEMERLING; KIESEL, 2010), um nó móvel da rede se encarrega de realizar o *download* dos dados via rede celular. Os demais nós interessados neles tomam ciência das informações por meio de transmissões locais do tipo *multicast* ou *broadcast*, que são realizadas via Wi-Fi. De acordo com

os autores, a integração das tecnologias foi capaz reduzir os custos de conexão em até 90 %, além de manter um uso mais justo dos recursos da rede móvel.

Como se pode notar, este esquema de descarregamento de dados está frequentemente associado ao uso de múltiplas interfaces de comunicação para realização das transmissões. Além dos padrões Wi-Fi (e.g., Wi-Fi *Direct*), outras tecnologias de comunicação sem fio de curto alcance, tais como o *Bluetooth* e o *ZigBee*, também são candidatas de peso para a operacionalização do D2D *out-of-band* (REBECCHI *et al.*, 2015). Com suas capacidades de comunicação ampliadas, alguns trabalhos da literatura sugerem que o controle de uso dessas diferentes interfaces de transmissão seja mantido pela própria rede celular (D2D *out-of-band Controlled*). Outros, porém, propõem deixar esse gerenciamento para os próprios dispositivos móveis (D2D *out-of-band Autonomous*). As propostas baseadas em D2D *out-of-band Controlled* defendem que esse modelo é capaz de diminuir os problemas de contenção de canais para a comunicação D2D, aumentando a vazão da rede, enquanto que aquelas baseadas em D2D *out-of-band Autonomous* reivindicam que esse paradigma é capaz de proporcionar menos sobrecarga nas redes celulares, já que dispensa o uso das ERBs (ASADI; WANG; MANCUSO, 2014).

As estratégias de MDO da categoria *out-of-band* normalmente fazem uso de APs Wi-Fi fixos para a troca dados com a Internet, ignorando parcialmente ou completamente a infraestrutura da rede celular. Além de servirem como um meio de escoar os dados para a rede mundial de computadores, os APs Wi-Fi podem atuar também como retransmissores de pacotes para outros nós móveis interessados neles (REBECCHI *et al.*, 2015). Algumas estratégias, por outro lado, se utilizam de técnicas empregadas em DTN para promoverem o descarregamento de dados. Nestas, os nós móveis aproveitam condições de contatos oportunistas com outros nós móveis para realizarem as suas transmissões D2D. Liu *et al.* (2015) ressaltam que os procedimentos de comunicação entre os pares de dispositivos que exploram essa abordagem é idêntico aos adotados pelas redes *ad hoc*, onde os próprios nós são os principais responsáveis pela disseminação dos dados pela rede, dispensando o suporte das ERBs ou APs Wi-Fi. O paradigma de roteamento dos dados usados nesse modo de operação do MDO, assim como os empregados nas DTNs, é o armazena-transporta-e-encaminha, ou seja, está apoiado no conceito de transferência de custódia de mensagens.

Para Li *et al.* (2011), o descarregamento de dados com o D2D *out-of-band* é uma maneira rápida e barata de aumentar a capacidade da rede móvel, já que, usualmente, apenas um subconjunto dos nós fazem acesso direto à infraestrutura da rede celular (ver Figura 6c). Entretanto, essa abordagem costuma oferecer atrasos médios maiores na entrega dos pacotes.

3.4 Desafios de operacionalização do MDO

Conforme vem sendo abordado ao longo deste capítulo, a incorporação de estratégias de descarregamento de dados nos novos serviços e aplicações com suporte à mobilidade tem sido

apontada como uma ação indispensável para garantir uma “sobrevida” maior às infraestruturas atuais de comunicação. Essa tarefa é ainda mais relevante se considerarmos que essas aplicações estarão presentes em um número cada vez maior de dispositivos de agora em diante, haja vista que a era da IoT está apenas em sua fase inicial. Os estudos recentes em descarregamento de dados vêm tratando diversas questões ainda em aberto neste campo de pesquisa, que apontam para múltiplas direções. Todavia, os trabalhos convergem no entendimento de que os ganhos para o MDO são maiores quando diferentes infraestruturas e/ou tecnologias de comunicação sem fio são usadas de forma combinada (LIU *et al.*, 2015; REBECCHI *et al.*, 2015).

Em certos casos, a combinação dessas tecnologias pode requerer a integração de provedores de acesso, uma tarefa um tanto quanto complexa. Realizar esse processo de forma transparente não é uma operação trivial, já que envolve parcerias entre diferentes provedores (e.g, Wi-Fi e celular) para a implantação conjunta (i) de políticas comuns de faturamento, (ii) de bancos de dados de assinantes compartilhados para autenticação, autorização, contabilização e tarifação, e (iii) de provisionamento de segurança.

Nas estratégias de MDO baseadas em APs Wi-fi, definir a implantação desses equipamentos no ambiente é um ponto crucial e, ao mesmo tempo, também desafiador. Determinar a densidade, a disposição espacial e as capacidades dos APs são algumas das questões problemáticas envolvidas com esse modelo, já que essas definições impactam diretamente no custo de operacionalização da abordagem. A dificuldade aqui está em cobrir a maior área geográfica possível, para aumentar o potencial de MDO, a um custo mínimo. Neste caso, se mal planejado, as despesas contidas com a não ampliação dos recursos das infraestruturas celulares seriam apenas transferidas para as infraestruturas alternativas de suporte ao MDO.

Se consideradas as estratégias de D2D para o MDO que dispensam o uso de APs Wi-Fi, o maior desafio reside em selecionar quais dos nós presentes no ambiente poderão acessar a rede celular para realizarem as trocas de dados com a Internet. Além de fatores relacionados à mobilidade dos dispositivos, esse modelo é altamente dependente da colaboração dos usuários. É imprescindível, portanto, que os envolvidos nas comunicações aceitem compartilhar alguns dos seus próprios recursos disponíveis (e.g., bateria, processamento, espaço de armazenamento e franquia de dados móveis) para que os benefícios do MDO sejam alcançados. Duas questões-chaves que emergem neste contexto são: (i) como controlar o acesso às RANs das operadoras? e (ii) como motivar os usuários a participarem voluntariamente do descarregamento de dados?

Para Rebecchi *et al.* (2015), o MDO é um campo fértil para o desenvolvimento de várias pesquisas científicas, já que muitas questões ainda continuam em aberto. Aspectos relacionados ao gerenciamento da(s) infraestrutura(s), à mobilidade dos dispositivos, à tarifação, aos modelos de negócio e até mesmo à carência de padrões bem definidos, ainda precisam ser melhores investigados.

3.5 Descarregamento de dados no contexto veicular

Esta seção descreve um mapeamento sistemático¹⁰ da literatura que foi realizado com o objetivo de identificar estudos primários¹¹ que buscaram prover soluções para as problemáticas envolvidas com o MDO no contexto veicular e que representam o estado da arte neste referido tópico. Para limitar a abrangência da investigação e elencar somente os trabalhos que mais se relacionam com o tema abordado neste projeto de doutorado, foi desenvolvido um plano de estudo estruturado baseado nas versões de [Bailey et al. \(2007\)](#), [Kitchenham e Charters \(2007\)](#) and [Kitchenham et al. \(2009\)](#). Esse plano compreendeu 3 fases básicas: (i) definição das Questões de Pesquisa (QPs); (ii) busca, identificação e seleção dos estudos primários; e (iii) análise e extração dos dados. O mapeamento sistemático aqui relatado foi orientado pelas seguintes QPs:

QP1: Quais são as principais abordagens de MDO projetadas para apoiar as aplicações de sensoriamento veicular?

QP2: Quais são as principais limitações das abordagens levantadas pela QP1?

Para a fase de busca dos trabalhos, foram consideradas pesquisas publicadas em eventos e periódicos científicos que estão disponíveis em bibliotecas digitais (e.g., IEEE e ACM) e que podem ser localizadas por meio de motores de busca, tais como *IEEE Xplore* e *ACM Digital Library*. Os termos de busca expandidos definidos para recuperar os trabalhos a partir das bases de dados são apresentados no [Quadro 2](#). Todas as palavras-chaves usadas foram escritas no idioma inglês.

Quadro 2 – Termos de busca expandidos para o mapeamento sistemático.

```
((("crowdsensing" OR "crowd-sensing" OR "mobile sensing" OR
  "participatory sensing" OR "opportunistic sensing" OR
  "data sensing" OR "FCD sensing" OR "Float Car Data" OR "FCD"
  "data" OR "traffic"
  AND
  ("vehicular ad hoc network" OR "VANET" OR "V2V" OR "vehicular" OR
  "vehicular network" OR "vehicular sensor network" OR "vehicle")
  AND
  ("data offloading" OR "offloading" OR "offload"
  "off-load" OR "off-loading")
  AND
  ("cellular" OR "mobile network" OR "LTE" OR "LTE-A" OR "4G")))
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

¹⁰ Ver definição de “Mapeamento Sistemático” na Seção Glossário.

¹¹ Estudo primário consiste num estudo empírico que investiga uma questão de pesquisa específica.

No total, foram utilizados oito motores de busca: *IEEE Xplore*, *ACM Digital Library*, *Science Direct*, *SpringerLink*, *CiteSeerX*, *Google Scholar*, *Web of Science* e *Scopus*. Coletivamente, estes motores são capazes de recuperar trabalhos das principais conferências e periódicos relacionadas(os) ao campo de estudo considerado.

As atividades do mapeamento sistemático relatadas nesta seção foram realizadas repetidas vezes ao longo do curso de doutorado, com uma última atualização entre os meses de maio e junho de 2018. Os termos definidos no [Quadro 2](#), sumarizados ([Quadro 3](#)) e formatados apropriadamente para cada um dos motores de busca ([Tabela 1](#)), resultou na localização de 1381 trabalhos, distribuídos conforme consta na [Tabela 1](#). Nenhum filtro em relação aos periódicos, eventos ou data de publicação foi aplicado, mas a execução da busca ficou restrita aos campos Título, *Abstract* e Palavras-Chaves dos artigos. A grande quantidade de trabalhos retornados está relacionada ao escopo bastante abrangente intencionalmente considerado no momento da definição dos termos de busca.

Quadro 3 – Termos de busca sumarizados usados nos motores de busca.

```
((“*sensing” OR “traffic” OR “data” OR “Float Car Data”)
AND
(“vanet” OR “vehic*” OR “V2V”)
AND
(“off-load” OR “off-loading” OR offload*)
AND
(“mobile network” OR “cellular” OR “LTE*” OR “4G”))
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota – O * é usado para procurar palavras que possuam variações de ortografia. O caractere curinga * representa zero, um ou vários caracteres alfanuméricos na posição que ocupa ([IEEE, 2018](#)).

Após a etapa de busca dos trabalhos, iniciou-se fase de seleção preliminar dos estudos relevantes para responder as questões de pesquisa definidas no início do mapeamento. O primeiro passo desta fase foi a identificação e eliminação dos artigos duplicados, ou seja, o descarte daqueles trabalhos retornados pelos diferentes motores de busca que, na verdade, referenciavam a mesma pesquisa. Ao final deste passo, foram eliminados 323 estudos. O procedimento seguinte do mapeamento foi realização da leitura do título de todos os artigos únicos retornados.

Para cada trabalho foram aplicados os seguintes critérios de inclusão:

- Livros, artigos e relatórios técnicos descrevendo estudos sobre abordagens empregadas para provimento de MDO em sensoriamento veicular;
- Livros, artigos, relatórios técnicos, monografias, dissertações e teses descrevendo estudos sobre abordagens projetadas para MDO em sensoriamento veicular, mesmo que não estejam controlados por editoras comerciais;

- Para ocorrências de vários artigos que relatam o mesmo estudo, não considerado no passo anterior como sendo duplicado, apenas o artigo mais recente foi selecionado;
- Os textos dos trabalhos devem estar em inglês; e,
- Os estudos devem estar disponíveis publicamente na web.

Adicionalmente, para cada trabalho foram aplicados os seguintes critérios de exclusão:

- Livros, artigos e relatórios técnicos descrevendo estudos não relacionados ao MDO em sensoriamento veicular;
- Livros, artigos, relatórios técnicos, monografias, dissertações e teses, mesmo que não estejam controlados por editoras comerciais, descrevendo estudos que não se enquadrem como estudos primários relacionados ao MDO em sensoriamento veicular;
- Estudos em outros idiomas que não inglês; e,
- Trabalhos com acessos pagos e aqueles disponíveis apenas em formato de *abstracts*, *poster* ou apresentações (i.e., *PowerPoint/Impress*).

Ao final do segundo passo da seleção preliminar, o conjunto inicial de 1381 estudos foi reduzido para um subconjunto de 174. Na sequência, realizou-se a leitura do resumo de cada trabalho, aplicando-se, novamente, os critérios de inclusão e exclusão. Esse procedimento resultou em um segundo subconjunto de 46 estudos, chamado na [Tabela 1](#) de Grupo Candidato. O Grupo Candidato contém artigos potencialmente úteis para responder a(s) questão(ões) de pesquisa **QP1** e/ou **QP2**. Os trabalhos pertencentes ao Grupo Candidato passaram por mais uma rodada de verificação, com a leitura da introdução e conclusão de cada artigo, aplicando-se, novamente, os critérios de inclusão e exclusão. O resultado desta ação foi um terceiro subconjunto de 25 estudos primários, chamado então na [Tabela 1](#) de Grupo Seleção Final.

Os 25 trabalhos presentes no Grupo Seleção Final foram submetidos à fase de análise e extração dos dados. Nesta etapa, todos os artigos foram lidos na íntegra e analisados com o objetivo de nos auxiliar a encontrar respostas para as questões de pesquisa apresentadas no início desta Subseção. Aqueles estudos que foram considerados mais relevantes para esta pesquisa estão elencados na Subseção que segue.

3.5.1 Abordagens da Literatura para MDO no contexto do sensoriamento veicular

Dentre os estudos primários selecionados ao final do mapeamento sistemático, aqueles que mais se relacionam com a proposta de doutorado retratada neste documento são apresentados ao longo desta seção. As abordagens descritas nestes trabalhos foram segmentadas em 3 grupos:

Tabela 1 – Resultados das buscas nas bibliotecas digitais.

Base de dados	Termos de busca sumarizados e formatados para cada motor de busca	Nº de Artigos
ACM Digital Library	+(+(sensing traffic data “Float Car Data”) +(vanet vehicular V2V vehicle) + (“off-load” “off-loading” offload) + (“mobile network” cellular LTE 4G))	33
CiteSeerX	((sensing OR traffic OR data OR “Float Car Data”) AND (vanet OR V2V OR vehicular) AND (“off-load” OR “off-loading” OR offload) AND (“mobile network” OR cellular OR LTE OR 4G))	91
Google Scholar	((sensing OR traffic OR data OR “Float Car Data”) (vanet OR V2V OR vehicular) (“off-load” OR “off-loading” OR offload) (“mobile network” OR cellular OR LTE OR 4G))	100*
IEEE Xplore	(((*sensing OR traffic OR data OR “Float Car Data”) AND (vanet OR vehic* OR V2V) AND (“off-load” OR “off-loading” OR offload*) AND (“mobile network” OR cellular OR LTE* OR 4G))	197
Science Direct	((traffic OR data OR “Float Car Data”) AND (vanet OR V2V OR vehicle OR vehicular) AND (“off-load” OR “off-loading” OR offload))	14
Scopus	TITLE-ABS-KEY((*sensing OR traffic OR data OR “Float Car Data”) AND (vanet OR vehic* OR V2V) AND (“off-load” OR “off-loading” OR offload*) AND (“mobile network” OR cellular OR LTE* OR 4G))	132
SpringerLink	(((*sensing OR traffic OR data OR “Float Car Data”) AND (vanet OR vehic* OR V2V) AND (“off-load” OR “off-loading” OR offload*) AND (“mobile network” OR cellular OR LTE* OR 4G))	709
Web of Science	Topic:((*sensing OR traffic OR data OR “Float Car Data”) AND (vanet OR vehic* OR V2V) AND (“off-load” OR “off-loading” OR offload*) AND (“mobile network” OR cellular OR LTE* OR 4G))	105
Total de artigos recuperados		1381
Grupo Candidato		46
Grupo Seleção Final		25

Fonte: Dados da pesquisa.

Nota – *Devido ao número excessivo de itens retornados pelo motor de busca *Google Scholar*, optamos por considerar somente as dez primeiras páginas de resultados. Como, por padrão, são apresentados 10 itens por página, nossa análise aqui se limitou aos primeiros 100 estudos.

(i) baseadas no uso de comunicações V2V; (ii) baseadas no uso de RSUs; e (iii) baseadas no uso de APs Wi-Fi.

3.5.1.1 Baseadas no uso de comunicações V2V

As abordagens desta categoria não dependem da implantação de equipamentos adicionais (e.g., RSUs e APs Wi-Fi) no ambiente para que o MDO possa ser realizado. Nestas, a redução do tráfego sobre as infraestruturas das redes celulares é alcançada explorando-se as capacidades de comunicação V2V IEEE 802.11p dos próprios veículos. Em (ANCONA; STANICA; FIORE,

2014), os autores empregaram tais comunicações para a obtenção de *Floating Car Data* (FCD)¹² em ambientes urbanos. Os dados são coletados usando transmissões V2V e enviados ao servidor de monitoramento remoto via comunicação V2I LTE. Na proposta apresentada, o acesso à rede móvel é delegado somente a um subconjunto de veículos, que se encarregam, então, de reportar os dados em nome de seus vizinhos. A maior contribuição do trabalho, entretanto, reside no estudo de mecanismos de agregação *in loco* dos dados antes de eles serem reportados ao centro de monitoramento. No trabalho, Ancona, Stanica e Fiore (2014) defendem que com a incorporação desses mecanismos, o MDO pode ser promovido tanto pela redução do número de veículos que acessam as redes móveis (i.e., através da redução de transmissões LTE) quanto pela diminuição do volume de dados que trafegam sobre elas.

Em (SALVO *et al.*, 2016), o MDO foi implementado por meio do uso de clusterização veicular. A ideia central por trás da lógica adotada pelos autores consiste na designação de alguns nós especiais, dentre todos os presentes no ambiente, para, de forma análoga à descrita em (ANCONA; STANICA; FIORE, 2014), realizarem a coleta de informações de seus vizinhos via V2V e, então, enviá-las ao servidor de processamento remoto usando V2I LTE. Para selecionar os nós especiais, uma mensagem de controle REQUEST é gerada por um veículo localizado em uma posição central da ROI. Essa mensagem é disseminada por toda a rede usando comunicações V2V, de acordo com as regras estabelecidas pelo protocolo GeoBroadcast, conforme detalhado em (SALVO *et al.*, 2016). Os veículos eleitos como retransmissores de mensagens REQUEST durante o processo de disseminação, isto é, que encaminham essas mensagens a outros veículos da rede, são identificados como veículos representativos. Esses veículos atuam como CHs e são eles os encarregados de reportar os dados de seus vizinhos (CMs) ao servidor de processamento. Somente os veículos representativos usam as redes celulares. Nessa abordagem, cada *cluster* é definido a partir de um veículo representativo e sua abrangência é limitada ao alcance de transmissão da tecnologia V2V IEEE 802.11p dele.

Feng e Feng (2017) elaboraram um esquema que também se apoia em comunicações V2V para promover o MDO em regiões metropolitanas. Os autores argumentam que a distribuição heterogênea dos veículos no ambiente urbano induz sobrecargas consideráveis em algumas ERBs enquanto outras permanecem com seus recursos subutilizados. Para contornar esse problema, os pesquisadores definiram uma arquitetura capaz de explorar ERBs vizinhas que estão ociosas para receber o tráfego destinado a veículos que estão sob cobertura de ERBs sobrecarregadas. Os dados são escoados entre as ERBs por meio de comunicações do tipo V2V.

Na pesquisa desenvolvida em (BRAVO-TORRES *et al.*, 2015), o descarregamento de dados é tratado no *downlink* da rede móvel. O modo de operação da abordagem proposta consiste em três etapas: (i) baixar conteúdos de servidores remotos através da rede celular; (ii) injetar os pacotes de dados na VANET através das comunicações *ad hoc* V2V; e (iii) rotear tais

¹² *Floating Car Data* são informações (e.g., localização, velocidade e direção) geradas por veículos em movimento e enviadas a um centro de monitoramento na Internet para processamento e análise (STANICA; FIORE; MALANDRINO, 2013).

dados até os veículos destinatários das informações. O passo (i) é realizado somente por alguns veículos presentes no ambiente. Abordagens semelhantes também são descritas em (VIGNERI; SPYROPOULOS; BARAKAT, 2016; ZHU *et al.*, 2017). Nestas, o MDO *out-of-band* emprega comunicações do tipo V2V para o compartilhamento local de dados requisitados recorrentemente pelos veículos. Os autores demonstram que quando alguns automóveis são configurados para atuarem como *caches* de dados para outros veículos, as redes móveis acabam tratando um número menor de requisições para a recuperação de dados a partir da Internet, aliviando suas RANs.

3.5.1.2 Baseadas no uso de RSUs

As abordagens deste grupo consideram a implantação de infraestruturas de VANETs (i.e., RSUs) no ambiente como requisito para a operacionalização do descarregamento de dados. Bazzi *et al.* (2015) descrevem um estudo relacionado ao uso das comunicações V2I WAVE/IEEE 802.11p para o provimento de MDO em atividades de sensoriamento veicular. Nele, os autores discutem sobre o potencial de preservação dos recursos das redes celulares quando RSUs são usadas como RANs para o envio dos dados *in loco* ao centro de monitoramento. No trabalho, experimentos adotando diferentes densidades de RSUs no ambiente e diferentes abordagens de roteamento dos dados para que eles alcancem as RSUs foram realizados. Comunicações do tipo V2V são empregadas para a troca de dados entre os próprios veículos e transmissões do tipo V2I RSU são utilizadas para enviá-los para a Internet. Os resultados apresentados demonstraram que as RSUs podem proporcionar uma diminuição significativa na ocupação dos recursos das redes móveis. No melhor caso, a redução do tráfego na RAN das operadoras foi superior a 90 % quando comparado ao gerado pelo modelo V2I LTE puro.

Zhioua *et al.* (2014) propuseram um algoritmo de transmissão de dados cooperativo que explora a integração das infraestruturas das redes celulares com as infraestruturas das VANETs para auxiliar no escoamento do tráfego da Internet para os veículos. A abordagem apresentada pelos autores considera as seguintes formas de entrega dos dados para os veículos, quando estes são requisitados: (i) diretamente pela RSU, quando há presença dessas infraestruturas e viabilidade de comunicação direta com elas; (ii) via RSU, mas com o uso de transmissões oportunistas V2V entre os veículos, quando não existe conexão direta com elas; e (iii) usando um acesso direto à rede móvel. Os resultados apresentados demonstraram que essa integração é capaz de proporcionar reduções de tráfego consideráveis sobre as redes celulares.

Empenhados na ideia de explorar o uso de RSUs para aliviar a sobrecarga sobre as redes móveis, Lee *et al.* (2015) e Wang e Wu (2016) propuseram mecanismos que avaliam a disponibilidade dessas infraestruturas no ambiente a fim de fornecer subsídios para as aplicações e auxiliar na escolha da melhor forma de troca de dados com a Internet: (i) com o uso direto das redes celulares, quando a tolerância a atrasos é reduzida; e (ii) com o suporte das RSUs, quando o foco está em diminuir do custo com as comunicações. Os autores destacam que o modelo proposto foi efetivo em oferecer uma boa QoE aos usuários e, ainda, em promover o MDO.

3.5.1.3 Baseadas no uso de APs Wi-Fi

As propostas de MDO desta categoria confiam na existência de APs Wi-Fi (i.e., IEEE 802.11a/b/g/n) dispersos no ambiente para reduzir o congestionamento sobre as infraestruturas das redes móveis. Para trabalharem neste modelo, os veículos são equipados com pelo menos duas tecnologias de comunicação sem fio: (i) uma para se conectarem com a rede Wi-Fi; e (ii) outra para trocarem dados com a rede celular (e.g., 3G, 4G e 5G). É importante ressaltar que para garantir uma melhor eficiência no MDO, os APs Wi-Fi devem operar no modo aberto e devem ser capazes de suportar uma quantidade razoável de veículos conectados ao mesmo tempo, principalmente em grandes centros urbanos.

Abordagens que adotam essa estratégia de descarregamento de dados precisam considerar o fato de que os APs Wi-Fi possuem uma área de cobertura pequena e eles normalmente estão distribuídos de maneira não uniforme pelo ambiente. Essas duas condições representam um desafio enorme para as comunicações entre os veículos e a Internet. Inseridos nesta problemática, [Alawi et al. \(2016\)](#) propuseram um modelo preditivo para apoiar esse esquema de MDO. Com um receptor de GPS integrado, cada veículo é capaz de construir e armazenar um histórico sobre os APs Wi-Fi que ele se conectou ao longo de seu trajeto. Assim, com tais informações, o modelo pode ser usado para verificar a disponibilidade de uma conexão futura com a rede Wi-Fi de maneira a auxiliar as aplicações na tomada de decisão sobre as transmissões de dados: (i) se elas deverão aguardar a próxima conexão com a rede Wi-Fi ou (ii) se elas deverão fazer uso imediato da rede celular. O uso de APs Wi-Fi como método de provimento do MDO em redes veiculares também foi avaliado em ([CHENG et al., 2014](#)). O trabalho demonstrou que o descarregamento de dados móveis pode ser efetivo com o uso de um número razoável de APs implantados no ambiente, mas o atraso agregado na entrega dos dados não são desprezíveis devido às coberturas reduzidas dessas tecnologias.

Em ([BRIANTE et al., 2014](#)), os autores desenvolveram uma plataforma de VCS, chamada de *SMARTphone-based floating CAR data collection* (SmartCar), para a aquisição de FCD a fim de apoiar aplicações de ITS (e.g., de monitoramento do tráfego, de sugestão de rota e de detecção de congestionamento). Na proposta apresentada, os autores especificaram prioridades para o encaminhamento dos dados para o centro de monitoramento: (i) prioridade alta, para aqueles dados sensíveis a atrasos da ordem de milissegundos; (ii) prioridade média, para dados que suportam atrasos da ordem de segundos ou minutos; e (iii) prioridade baixa, para dados que apresentam sensibilidade de atraso da ordem de horas ou até mesmo dias. Os FCDs são obtidos e transmitidos periodicamente a um centro de monitoramento remoto e as prioridades estabelecidas são usadas para determinar se as comunicações ocorrerão preponderantemente via APs Wi-Fi ou alternativamente por meio das redes de telefonia celular. Essa abordagem de prioridades tem como objetivo principal desafogar as redes móveis, já que o tráfego das categorias (ii) e (iii) tenderão a fluir pelas infraestruturas do Wi-Fi. Na ausência de conectividade com essas redes, os dados poderão ser mantidos pelos veículos até que um próximo AP esteja disponível.

3.5.2 Questões de Pesquisa do Mapeamento Sistemático

No VCS as informações presentes nos veículos precisam ser enviadas a uma central de monitoramento remota, localizada na nuvem. Quando esse processo é realizado por meio de conectividade direta dos veículos com a Internet, usando exclusivamente as redes celulares, o volume de dados que é gerado e transportado pelas infraestruturas das operadoras pode degradar consideravelmente a QoS oferecida. Neste sentido, mecanismos de MDO passam a ser considerados cruciais para garantir o bom funcionamento das aplicações. Guiado pelas questões de pesquisa definidas no início da [Seção 3.5](#), o mapeamento sistemático realizado nos permitiu identificar as principais técnicas de MDO projetadas para suportar o sensoriamento veicular. Conforme apresentado na Subseção anterior, as soluções presentes na literatura têm atuado em três frentes principais: (i) as que se apoiam no uso de comunicações V2V e V2I ERB, sem a necessidade de incorporação de novas infraestruturas auxiliares no ambiente; (ii) aquelas que empregam o uso de RSUs como meio de obtenção de acesso alternativo à Internet; e (iii) as que exploram os APs Wi-Fi para aliviar o tráfego de dados originalmente destinados à RANs das redes móveis. Essas observações respondem a QP1.

As condições de comunicação encontradas nos cenários de VCS impactam significativamente na eficácia proporcionada pelas estratégias de MDO mencionadas, independentemente se elas demandam a implantação de infraestruturas adicionais ou não. Para [Alawi et al. \(2016\)](#), embora os APs Wi-Fi IEEE 802.11a/b/g/n se apresentem como alternativas factíveis para aliviar a sobrecarga de tráfego sobre as redes móveis, a dinâmica de mobilidade veicular insere algumas características indesejáveis para a conectividade deles com a Internet. É preciso considerar que além de os APs Wi-Fi não estarem disponíveis em todas as regiões, eles oferecem uma área de cobertura reduzida. Segundo [Zhu et al. \(2017\)](#), essas restrições resultam num tempo de conexão limitado dos veículos com a rede, comprometendo a capacidade de troca de dados. Adicionalmente, [Ezirim e Jain \(2015\)](#) apontam que ao mover o tráfego das redes celulares para as redes Wi-Fi, o desempenho das transmissões também é afetado pelas interferências provocadas por outras redes locais sem fio ativas na mesma região.

Embora as RSUs ofereçam coberturas de comunicação superiores àquelas apresentadas pelas tecnologias Wi-Fi tradicionais, ainda assim elas possuem uma abrangência limitada, que na prática é da ordem de poucas centenas de metros. Para as trocas de dados veiculares, essa configuração representa um tempo de conexão ainda pequeno, pois os automóveis trafegam a velocidades elevadas. Ademais, como possuem um custo de implantação e manutenção muito maior se comparado ao dos equipamentos Wi-Fi IEEE 8011a/b/g/n, o uso das RSUs em larga escala pode tornar as soluções de MDO que as empregam impraticáveis. Quando disponibilizadas no ambiente em menor número, os protocolos que tratam a troca de dados com a Internet por meio de transmissões V2I RSU precisam ser mais complexos, já que necessitam contornar as situações de conectividade intermitente ou mesmo de ausência dela em função da falta de ampla cobertura do sinal de comunicação.

Quanto às abordagens que dispensam a introdução de infraestruturas adicionais, i.e., baseadas exclusivamente em comunicações V2V e V2I ERB, elas gozam da vantagem de oferecer um baixo custo de implantação, mas também incorporam novos desafios operacionais. Para que os benefícios desse modelo de MDO sejam observados, é indispensável o engajamento voluntário dos usuários. A colaboração torna-se aqui uma condição *sine qua non* para garantir a eficácia e/ou eficiência do descarregamento de dados. Além disso, para conter a demanda geral de recursos das redes móveis é preciso definir quais veículos, dentre todos os presentes na região monitorada, têm direito ao acesso direto à Internet por meio das infraestruturas das operadoras. Essa tarefa não é trivial se levado em consideração o padrão de mobilidade veicular, que é altamente dinâmico. As considerações apresentadas nestes últimos parágrafos respondem a QP2.

3.5.3 Análise Comparativa dos Trabalhos Relacionados

A partir das leituras dos trabalhos relacionados encontrados na literatura, foi possível constatar que as principais abordagens de MDO projetadas para apoiar as aplicações veiculares são baseadas no modelo de comunicação D2D *out-of-band*, operam nos canais de *downlink* das redes celulares e geralmente empregam o uso de infraestruturas de acesso complementares, tais como os APs Wi-Fi e as RSUs. Um segundo conjunto de trabalhos, porém, mais restrito, buscou projetar soluções de MDO no *uplink* das RANs das operadoras. Essas observações nos permitiu identificar como esse campo de pesquisa ainda é pouco pavimentado.

Considerando a natureza das aplicações de VCS, orientada por operações massivas de *upload* dos dados, os estudos presentes neste último segmento se mostram mais adequados para esse contexto. O projeto discutido neste documento de tese está alinhado com tais abordagens, ao passo que adota o MDO do tipo *out-of-band* com o intuito de preservar os recursos de *uplink* das redes móveis. De forma mais específica, este trabalho se enquadra no subgrupo de pesquisas que buscam promover o descarregamento de dados sem a necessidade de implantação de novas infraestruturas de apoio (e.g., APs Wi-Fi e RSUs), assim como em (ANCONA; STANICA; FIORE, 2014) e (SALVO *et al.*, 2016). A proposta aqui defendida, todavia, se distingue da descrita em (ANCONA; STANICA; FIORE, 2014) no tocante ao foco do estudo, uma vez que neste os autores centraram as investigações em técnicas de agregação de dados, e da retratada em (SALVO *et al.*, 2016) pela estratégia usada para a clusterização veicular e para a aquisição de dados *in loco*. A Tabela 2 apresenta, resumidamente, uma análise comparativa das características da proposta que foi desenvolvida com as dos trabalhos relacionados encontrados a partir do mapeamento sistemático.

Tabela 2 – Análise comparativa sumarizada entre os trabalhos relacionados e a proposta de doutorado.

Trabalhos/Características	MDO com o uso de V2V	MDO empregando RSUs	MDO empregando APs Wi-Fi	Provê MDO no <i>uplink</i>	Provê MDO no <i>downlink</i>	Implementa Agregação de dados	Técnica de aquisição de dados <i>in loco</i>	Abordagens de comunicação	Abordagem distribuída ou centralizada	Emprega transmissões V2V de múltiplos saltos
Ancona, Stanica e Fiore (2014)	✓	χ	χ	✓	χ	✓	1	V2V & V2I ERB	centralizada e distribuída	✓
Salvo <i>et al.</i> (2016)	✓	χ	χ	✓	χ	χ	2	V2V & V2I ERB	distribuída	χ
Feng e Feng (2017)	✓	χ	χ	χ	✓	χ	NA	V2P* & V2I ERB	centralizada	χ
Bravo-Torres <i>et al.</i> (2015)	✓	χ	χ	χ	✓	χ	NA	V2V & V2I ERB	distribuída	✓
Bazzi <i>et al.</i> (2015)	✓	✓	χ	✓	χ	χ	3	V2V, V2I RSU & V2I ERB	distribuída	✓
Zhioua <i>et al.</i> (2014)	✓	✓	χ	χ	✓	χ	NA	V2V, V2I RSU & V2I ERB	híbrida	✓
Wang e Wu (2016)	χ	✓	χ	χ	✓	χ	NA	V2I RSU & V2I ERB	centralizada	χ
Alawi <i>et al.</i> (2016)	χ	χ	✓	χ	✓	χ	NA	V2I AP Wi-Fi & V2I ERB	distribuída	χ
Briante <i>et al.</i> (2014)	χ	χ	✓	✓	χ	χ	4	V2I AP Wi-Fi & V2I ERB	distribuída	χ
Proposta	✓	χ	χ	✓	χ	χ	5	V2V & V2I ERB	híbrida	✓

Fonte: Dados da pesquisa.

Legenda – ✓: oferece a característica; χ: não oferece a característica; NA: Não se Aplica; ND: Não Definida; 1: (i) *Degree-based*, (ii) *Degree-Based with Confirmation* e (iii) *Reservation-Based*; 2: clusterização; 3: roteamento baseado em distância e roteamento baseado em saltos; 4: uso de *smartphones* que funcionam como retransmissores Wi-Fi e transmissões baseadas em prioridades; e 5: clusterização geográfica e *beaconing*.

* – Contração para a comunicação Veículo-para-Pedestre. Isso significa que essa abordagem de MDO visa suportar usuários móveis que se encontram às margens das vias de tráfego veicular.

EUCLIDEAN

Este capítulo apresenta a proposta de pesquisa tratada no doutoramento. Ele está organizado da seguinte forma: a [Seção 4.1](#) tece as considerações iniciais; a seção [Seção 4.2](#) descreve uma abordagem de clusterização geográfica que foi desenvolvida para apoiar o MDO no contexto de VCS; e a seção [Seção 4.3](#) detalha um esquema de coleta de dados *in loco* baseado no uso de *beacons* para potencializar o descarregamento de dados da proposta elaborada e reduzir o atraso médio fim a fim durante a obtenção das informações.

4.1 Considerações iniciais

Além de um número cada vez maior de dispositivos sensores, os automóveis de última geração estão sendo equipados com um maior poder computacional (podendo inclusive hospedar e executar aplicativos dos usuários) e com diferentes capacidades de comunicação sem fio (e.g, Bluetooth, Wi-Fi e 3G/4G/5G). Embora essas tecnologias hoje em dia estejam mais presentes nos carros de segmento de luxo, previsões apontam que num futuro próximo elas também integrarão os modelos mais populares. Com tais características, esses veículos modernos estão sendo considerados verdadeiras plataformas de sensores móveis, dada a quantidade de informação e dados que eles podem gerar e transportar ao longo de seu trajeto ([TIMPNER; WOLF, 2016](#)). É neste contexto que se destaca o uso em potencial do Sensoriamento Veicular Colaborativo (VCS), já que ele se aproveita dessas tecnologias disponíveis para viabilizar a criação de serviços de sensoriamento versáteis a um custo reduzido de investimento nas infraestruturas de apoio.

A discussão que emerge deste cenário, entretanto, é que em grandes centros urbanos, com alta concentração de veículos, as aplicações de VCS serão capazes gerar uma quantidade de tráfego colossal para ser transmitida sobre as redes celulares. Cabe destacar aqui que essa demanda é resultado do fato de que nesse paradigma de sensoriamento, os dados coletados *in loco* são periodicamente reportados para uma central de monitoramento remota, hospedada na nuvem, conforme abordado pela [Subseção 2.3.4](#) do [Capítulo 2](#). Devido a essa natureza

infraestruturada do VCS, o volume de transmissões de dados resultante pode representar uma sobrecarga considerável para as Redes de Acesso via Rádio (RANs) e para o *backhaul*¹ das redes móveis, já que estas se posicionam como a principal interface para a realização do *upload* das informações para a Internet.

Na tentativa de minimizar esse impacto, foi elaborada uma Abordagem de Clusterização Geográfica de Veículos para o Descarregamento de Dados do VCS em Redes Celulares (em inglês, *gEo-clUstering approaCh for celluLar vehIcular crowDsEnsing dAta offloadiNg*) (EUCLIDEAN). Trata-se de uma estratégia que se enquadra no modelo de Descarregamento de Dados Móveis (MDO) do tipo Dispositivo-para-Dispositivo (D2D) *out-of-band* e que trabalha nos canais de *uplink* das redes. Nela, comunicações Veículo-para-Veículo (V2V) são exploradas para apoiar as tarefas de VCS a fim de reduzir a utilização dos recursos das redes móveis durante a fase de *upload* dos dados. O projeto e desenvolvimento desta proposta foram guiados por duas premissas: (i) não demandar ampliações/mudanças nas redes móveis e tampouco a implantação de infraestruturas do tipo RSUs ou APs Wi-Fi; e (ii) a cada ciclo de coleta de dados, apenas um subconjunto dos veículos considerados no sensoriamento poderá fazer uso da rede celular. Veículos pertencentes a esse subconjunto foram nomeados de retransmissores ERB.

4.2 EUCLIDEAN

Para uma melhor compreensão da abordagem apresentada neste documento, foram criadas as Definições 1, 2, 3 e 4, assim como as notações discriminadas na Tabela 3.

Definição 1 (Região de Interesse). Região de Interesse (em inglês, *Region Of Interest*) (ROI) é uma região geográfica física bem definida (e.g., um bairro, uma zona ou mesmo uma cidade inteira) cujas informações correlacionadas a ela são relevantes para as aplicações de sensoriamento.

Definição 2 (Área de Atração). Neste documento, uma Área de Atração (AA) consiste numa região geográfica lógica, caracterizada por ser circular e estacionária, estabelecida dentro de uma ROI. Toda Área de Atração possui um centroide² e uma região de abrangência, que está diretamente relacionada ao tamanho do seu raio. O termo amplitude é usado neste contexto para representar a área de cobertura das AAs, ou seja, a dimensão delas. Quanto maior o raio, maior será a amplitude das AAs.

Definição 3 (Cluster Geográfico). Um Cluster Geográfico (CG) é um agrupamento de veículos criado dentro de uma Área de Atração, de forma que eles possam cooperar uns com os outros para trocarem dados entre si.

¹ Trata-se de uma infraestrutura de conexão que interliga as redes de acesso das operadoras de telefonia ao núcleo da Internet (*backbone*).

² Centróide: “ponto ou coordenada de uma forma geométrica que estabelece o seu centro geométrico”. Definição dada pelo Dicionário Priberam da Língua Portuguesa (<<https://www.priberam.pt>>).

Definição 4 (Retransmissor ERB). Retransmissor ERB (RERB) é um veículo selecionado oportunamente dentro de um CG cuja responsabilidade é: (i) coletar os dados do sensoriamento de seus vizinhos; e (ii) reportar tais dados ao centro de monitoramento por meio da rede celular. Durante o VCS somente os RERBs têm acesso às redes móveis e não todos os veículos que participam do monitoramento.

Tabela 3 – Notações

Símbolo	Significado
$\mathcal{R}_i$	Uma ROI i genérica
$\mathcal{A}_i$	Uma Área de Atração i genérica
$\mathcal{A}_{\mathcal{R}_i}^*$	Conjunto de todas as Áreas de Atração mapeadas dentro de uma $\mathcal{R}_i$
$\mathcal{CG}_i$	Um Cluster Geográfico i genérico
$\mathcal{CG}_{\mathcal{R}_i}^*$	Conjunto de todos os Clusters Geográficos criados dentro de uma $\mathcal{R}_i$
$\mathcal{C}_{\mathcal{R}_i}^*$	Conjunto de todos os centroides mapeados dentro de uma $\mathcal{R}_i$
$\mathcal{V}_{\mathcal{R}_i}^*$	Conjunto de todos os veículos trafegando dentro de uma $\mathcal{R}_i$
$\mathcal{N}_{v_i}^*$	Conjunto de todos os vizinhos de um veículo v_i
a_{aa}	Amplitude das Áreas de Atração
d_v	Densidade de veículos

A operacionalização da EUCLIDEAN está condicionada ao uso de dois algoritmos: (i) Algoritmo de Alocação de Áreas de Atração Estacionárias (em inglês, *Stationary Attraction Areas Allocation Algorithm*) (S4A); e (ii) Protocolo de Clusterização Baseado em Áreas de Atração (em inglês, *Attraction Area-based Clustering Protocol*) (AACCP).

4.2.1 S4A

Localizar um subconjunto de veículos, dentre todos os presentes na ROI, que estejam aptos para atuarem como retransmissores ERB em um sistema de VCS não é uma tarefa trivial. Levando-se em consideração que o sensoriamento é geralmente realizado dentro de uma região geográfica específica, a definição de quais veículos serão selecionados como retransmissores ERB envolve considerar também onde eles estão posicionados. Essa tarefa é considerada bastante desafiadora, dado os padrões de alta mobilidade que eles possuem. Além disso, fazer com que os retransmissores ERB estejam distribuídos uniformemente dentro de uma ROI é relevante para garantir que eles possam tirar vantagem do uso de comunicações V2V para coletarem os dados de seus vizinhos, aumentando, assim, o potencial de preservação dos recursos de *uplink* da rede celular. Nesse sentido, a abordagem proposta foi projetada para realizar uma distribuição geográfica homogênea de veículos retransmissores ERB que serão encarregados de drenar os dados da ROI para a Internet.

O método que foi desenvolvido está apoiado no conceito lógico de Áreas de Atração (Ver Definição 2). Neste modelo, todos os veículos localizados dentro de uma AA se organizarão

em cluster e enviarão os seus dados para um retransmissor ERB correspondente, situado na mesma AA, via comunicações do tipo V2V. Este, por sua vez, será então o responsável por reportar tais dados para um servidor de monitoramento remoto via transmissões V2I ERB, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Representação ilustrativa da EUCLIDEAN

Fonte: Adaptada de Nunes *et al.* (2017).

Para posicionar geograficamente as AAs no cenário alvo, o S4A primeiramente realiza o mapeamento das coordenadas limítrofes de uma ROI $\mathcal{R}_i$. Na sequência, ele irá segmentar $\mathcal{R}_i$ em n AAs. Para a realização destas etapas, o algoritmo S4A requer a definição das coordenadas geográficas de demarcação de $\mathcal{R}_i$ e da amplitude das AAs (i.e., o valor do raio das AAs) a ser adotada. Essas entradas podem ser fornecidas por meio de interfaces gráficas na aplicação servidora, de maneira que o usuário selecione a área de interesse em um mapa digital da cidade ou mesmo através de campos de texto. Após n ser determinado, o S4A começará a alocar as AAs lado-a-lado ao longo dos eixos x e y , obedecendo as margens identificadas no passo anterior, até que $\mathcal{R}_i$ esteja completamente coberta por elas.

O processo de alocação de AAs considerando $n = 9$, $n = 30$ e $n = 126$ pode ser visualizado na Figura 10. O valor de n tem um impacto significativo na quantidade de RERBs que serão selecionados pelo algoritmo AACCP, descrito na sequência. Uma vez que um único RERB é esperado para cada AA, quanto maior o valor de n , menor a amplitude das AAs e maior será o número de RERBs ativos durante o sensoriamento. Cabe destacar, todavia, que ao reduzir o

número de RERBs, o número de transmissões usando as redes celulares também será reduzido, de modo que os benefícios da solução para o MDO tendem a aumentar. O algoritmo de seleção dos RERBs será melhor detalhado na próxima Subseção.

Figura 10 – Representação ilustrativa do processo de alocação das AAs

Fonte: Elaborada pelo autor.

O S4A foi projetado para automatizar o processo de determinação da quantidade de AAs necessárias para cobrir toda a ROI e, sobretudo, para determinar onde cada uma delas será posicionada. Esse processo é realizado pela aplicação servidora, no centro de monitoramento, antes que as tarefas de coleta de dados sejam encaminhadas para os veículos. Executar o S4A no servidor de monitoramento tem como principal objetivo permitir que as AAs pudessem ser redimensionadas e realocadas dinamicamente, a qualquer momento, tornando a abordagem de MDO mais flexível e aderente aos requisitos das aplicações. Ao final desta etapa, uma lista das coordenadas geográficas dos centroides e o valor do raio adotado serão enviados para os veículos juntamente com as tarefas de aquisição de dados. Cada veículo manterá essas informações armazenadas em seu banco de dados local, já que elas são indispensáveis para que o AACP possa realizar a formação dos clusters. O pseudocódigo do S4A está representado no [Algoritmo 1](#).

4.2.2 AACP

Para reduzir a quantidade de transmissões usando as redes móveis nas atividades de VCS, a EUCLIDEAN explora um modelo baseado no agrupamento de veículos. O algoritmo AACP foi especificado com o objetivo de realizar a criação desses agrupamentos. Para tanto, ele faz uso das AAs estabelecidas pelo S4A. Por definição, em nossa proposta um cluster geográfico $\mathcal{CG}_i \in \mathcal{CG}_{\mathcal{R}_i}^*$ é delimitado pela $\mathcal{AA}_i \in \mathcal{AA}_{\mathcal{R}_i}^*$ correspondente. Em outras palavras, uma $\mathcal{AA}_i$ representa o escopo geográfico da formação $\mathcal{CG}_i$, como ilustrado na [Figura 11c](#).

Cada CG tem associado com ele um conjunto de veículos chamados de Membros do Cluster (MC) e um representante do agrupamento, chamado de Cluster Head (CH). O CH é um veículo selecionado oportunamente para reportar ao centro de monitoramento, em

Algoritmo 1 – S4A

```

1:  $ROI_{cl} \leftarrow \{cl_{1(x,y)}, cl_{2(x,y)}, \dots, cl_{n(x,y)}\}$   $\triangleright$  Vetor de coordenadas limítrofes (cl) da ROI
2:  $AA_{cc} \leftarrow \{\}$   $\triangleright$  Vetor de coordenadas dos centroides (cc) das AAs
3:  $raio \leftarrow x$   $\triangleright x$  é um valor positivo que define a amplitude das AAs
4:  $\gamma \leftarrow [0.5, 1.0]$   $\triangleright \gamma$  é um valor positivo no intervalo  $[0.5, 1.0]$ .
5:  $distancia \leftarrow (2 \times raio) \times \gamma$   $\triangleright \gamma$  é usado para determinar o grau de sobreposição das AAs
6:  $Coord_y \leftarrow TopMaxCoord_y(ROI_{cl})$ 
7:  $i \leftarrow 0$ 
8: enquanto  $Coord_y > BottomMinCoord_y(ROI_{cl})$  faça
9:    $Coord_x \leftarrow LeftMinCoord_x(ROI_{cl})$ 
10:  enquanto  $Coord_x < RightMaxCoord_x(ROI_{cl})$  faça
11:     $cci_{(x,y)} \leftarrow (Coord_x, Coord_y)$ 
12:     $appendToAA_{cc}(cci_{(x,y)})$ 
13:     $i \leftarrow i + 1$ 
14:     $Coord_x \leftarrow Coord_x + distancia$ 
15:  fim enquanto
16:   $Coord_y \leftarrow Coord_y + distancia$ 
17: fim enquanto
18: retorna  $AA_{cc}, raio$ 

```

nome de seus vizinhos de único salto, os dados do VCS. Nesse sentido, espera-se que apenas CHs utilizem os recursos da rede móvel e não todos os veículos dentro da ROI que estejam participando do sensoriamento. O termo CH nesta subseção é usado com o mesmo sentido do termo retransmissor ERB empregado anteriormente para descrever o S4A.

Figura 11 – Processo de criação de clusters geográficos baseados em AAs

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para criar um CG, os veículos fazem uso: (i) das suas coordenadas de GPS; (ii) das coordenadas de GPS de seus vizinhos; (iii) das coordenadas dos centroides das AAs mapeadas na ROI; e (iv) do *raio* das AAs. As coordenadas de GPS do próprio veículo são obtidas a partir

do receptor GPS embarcado nele. As coordenadas de GPS dos veículos vizinhos são conhecidas através do serviço de *beaconing*³ usado por ele. Os dois últimos parâmetros são fornecidos pela aplicação servidora, como mencionado na descrição do S4A.

Cada veículo $v_i, \forall v \in \mathcal{V}_{\mathcal{R}_i}^*$, mantém um banco de dados local com a lista de centroides mapeados para $\mathcal{R}_i$, denotado por $\mathcal{C}_{\mathcal{R}_i}^*$, e uma tabela atualizada de IDs e coordenadas geográficas atuais de todos os seus vizinhos, denotado por $\mathcal{N}_{v_i}^*$. Com esses dados, um veículo é capaz de localizar o centroide mais próximo dele, definir o CG ao qual ele pertence e, ainda, selecionar seu CH correspondente, de maneira distribuída e direta. O centroide mais próximo é descoberto por meio do cálculo da distância Euclidiana entre o próprio veículo e todos os centroides mapeados para $\mathcal{R}_i$,

$$d(v_i, c_j) = \sqrt{(v_{ix} - c_{jx})^2 + (v_{iy} - c_{jy})^2}, \quad (4.1)$$

onde, $\{v_{ix}, v_{iy}\}$ e $\{c_{jx}, c_{jy}\}$ são as coordenadas de GPS mapeadas em coordenadas cartesianas do veículo v_i e do centroide c_j , respectivamente. O centroide mais próximo do veículo v_i será aquele $c_j, \forall c \in \mathcal{C}_{\mathcal{R}_i}^*$, com a menor distância Euclidiana medida, ou seja,

$$c_j = \{c_j \in \mathcal{C}_{\mathcal{R}_i}^* : \min\{d(v_i, c_j) \mid \forall \mathcal{C}_{\mathcal{R}_i}^*, v_i \in \mathcal{V}_{\mathcal{R}_i}^*\}\} \quad (4.2)$$

Como o AACP assume que todos os veículos posicionados a uma distância do centroide inferior ao comprimento do *raio* da AA pertencem ao mesmo CG, ao conhecer o c_j mais próximo, assim como as posições correntes de seus vizinhos $\mathcal{N}_{v_i}^*$, um veículo v_i torna-se consciente de toda a sua formação em cluster. Deste modo, o processo de formação do cluster geográfico $\mathcal{CG}_i$ pode ser definido como,

$$\mathcal{CG}_i = \{v_i \in \mathcal{V}_{\mathcal{R}_i}^* : d(v_i, c_j) \leq r \mid \forall \mathcal{V}_{\mathcal{R}_i}^*\}, \quad (4.3)$$

onde r é o raio da AA. Essa estratégia é capaz de assegurar que um veículo v_i só pertencerá a um determinado $\mathcal{CG}_i$ num dado instante de tempo t . A próxima etapa consiste na definição dos CHs. Um veículo v_j será considerado um CH de sua formação $\mathcal{CG}_j$ se ele possuir a menor distância $d_{\min}$, dentre os seus vizinhos $\mathcal{N}_{v_j}^*$, para o centroide c_j correspondente daquela formação (Ver [Figura 11](#)). Ou seja,

$$v_j = \{v_j \in \mathcal{CG}_j : \min\{d(v_j, c_j) \mid \forall \mathcal{N}_{v_j}^*, c_j \in \mathcal{C}_{\mathcal{R}_j}^*, v_j \in \mathcal{V}_{\mathcal{R}_j}^*\}\} \quad (4.4)$$

³ É assumido que todas as OBUs transmitem periodicamente sua IDentidade (ID) e sua localização GPS em pacotes especiais chamados de *beacons*, com o objetivo de tornar os veículos conscientes da presença de seus vizinhos em tempo quase real. A transmissão regular desses pacotes é fundamental para apoiar as trocas de dados em VANETs.

Ao tomar ciência das coordenadas de GPS e IDs de seus vizinhos, um veículo pode calcular por si só as distâncias de cada MC até o centroide de sua formação. Assim, todos os veículos pertencentes a um CG são capazes de identificar seus respectivos CHs de forma distribuída, a qualquer momento, sem a necessidade de trocar mensagens adicionais específicas para isso (e.g., CLUSTERDISCOVER, CLUSTERHEADELECTION e CLUSTERLEAVE). Se os CHs se afastarem dos centroides de sua formação, devido às suas mobilidades, novos CHs serão identificados. Neste contexto, a EUCLIDEAN considera que os centroides são, na verdade, pontos âncoras de apoio para as formações em cluster e, ao mesmo tempo, uma localização onde se espera encontrar CHs. Em outras palavras, eles são considerados pontos de atração na direção dos quais os dados do entorno devem fluir, na tentativa de alcançarem o acesso à infraestrutura da rede móvel.

No modelo proposto, os CGs são construídos de maneira imediata, no momento em que os dados *in loco* precisam ser reportados ao centro de monitoramento. Após todos os veículos (i.e., MCs e CHs) realizarem o *upload* das informações requeridas, os agrupamentos criados serão desprezados. Novas formações deverão então ser geradas para que outras coletas sejam realizadas. Isso significa que a vida útil de um CG, assim como a do CH, é efêmera, quase instantânea, enquanto durar a execução da ação (a_2), descrita na sequência, do evento `obter_e_Enviar_Dados_do_VCS()`.

Diferente de outras abordagens, tal como a *Cluster Based Routing* (CBR) apresentada em (LUO; ZHANG; HU, 2010), no esquema que foi projetado, os CHs não precisam fazer *broadcasts* de mensagens do tipo LEAD para orientar os membros do cluster sobre a sua localização e tampouco fazer *broadcasts* de mensagens do tipo LEAVE para iniciar o procedimento de escolha de um novo CH. Ademais, a EUCLIDEAN goza da vantagem de não necessitar manter tabelas de roteamento mapeando toda a topologia da rede, o que poderia gerar entradas obsoletas/inconsistentes devido à mobilidade veicular e demandar trocas constantes de tabelas entre os veículos, acarretando numa sobrecarga considerável para a comunicação em nível local V2V. O pseudocódigo do AACCP é apresentado no Algoritmo 2. Ele é executado por cada um dos veículos envolvidos com o VCS e na mesma periodicidade de emissão dos *beacons*. A Figura 12 traz uma visão geral da arquitetura de MDO na qual a EUCLIDEAN está inserida.

Durante o processo de aquisição de dados, cada um dos veículos do CG executa regularmente, no escopo da aplicação cliente de VCS, um evento chamado `obter_e_Enviar_Dados_do_VCS()`, que desencadeará as seguintes ações (a):

- (a_1) Ler os dados dos sensores e armazená-los em um *buffer* local juntamente com a data e hora da coleta;
- (a_2) Verificar se ele é o CH corrente. Em caso afirmativo, ele irá enviar os dados registrados em seu *buffer* local para a central de monitoramento, eliminando da memória, logo na sequência, todas as entradas que acabaram de ser reportadas. Caso contrário, por se tratar

Algoritmo 2 – AACCP

```

1:  $v_{i(x,y)} \leftarrow \text{ler\_coordenadas\_GPS\_do\_veículo}()$ 
2:  $\mathcal{N}_{v_i}^* \leftarrow \{n_{1(x,y)}, n_{2(x,y)}, \dots, n_{n(x,y)}\}$   $\triangleright$  Vetor de coordenadas de GPS dos veículos vizinhos de  $v_i$ 
3:  $\mathcal{C}_{\mathcal{R}_i}^* \leftarrow \{c_{1(x,y)}, c_{2(x,y)}, \dots, c_{n(x,y)}\}$   $\triangleright$  Vetor de coordenadas dos centroides mapeados para a ROI
4:  $\text{nearestCentroid} \leftarrow c_{1(x,y)}$ 
5: para todo  $c_j \in \mathcal{C}_{\mathcal{R}_i}^*$  faça
6:    $d \leftarrow \text{eucliDistance}(v_i, c_j)$ 
7:   se  $d < \text{eucliDistance}(v_i, \text{nearestCentroid})$  então
8:      $\text{nearestCentroid} \leftarrow c_{j(x,y)}$ 
9:   fim se
10: fim para
11: se  $\text{eucliDistance}(v_i, \text{nearestCentroid}) < \text{radius}$  então
12:    $\text{CGA}_{ID} \leftarrow \text{nearestCentroid}_{ID}$   $\triangleright$  Determina a afiliação do CG (CGA) a que ele pertence
13: fim se
14:  $\text{CH}_{ID} \leftarrow v_i$ 
15:  $d_{\min} \leftarrow \text{eucliDistance}(v_i, \text{nearestCentroid})$ 
16: para todo  $n_i \in \mathcal{N}_{v_i}^*$  faça
17:    $d \leftarrow \text{eucliDistance}(n_i, \text{nearestCentroid})$ 
18:   se  $d < d_{\min}$  então
19:      $d_{\min} \leftarrow d$ 
20:      $\text{CH}_{ID} \leftarrow n_i$   $\triangleright$  Identificando o CH
21:   fim se
22: fim para
23: retorna  $\text{CGA}_{ID}, \text{CH}_{ID}$ 

```

de um MC, ele transmitirá todos os dados para o seu CH e aguardará por uma confirmação de recebimento. Assim que um *ACK*⁴ for recebido pelo MC, os dados correspondentes a ele serão removidos do *buffer*. Essas comunicações entre MCs e CHs acontecem por meio de transmissões V2V *ad hoc* de um único salto. Para evitar uma troca contínua de dados entre CHs (i.e., transmissões do tipo *flip-flop* que podem ocorrer durante a mudança de CH dentro de um CG), um tamanho máximo de *buffer* e um tempo de vida máximo para os dados armazenados nele foram definidos. Toda vez que um desses limites for atingido, o CH atual enviará imediatamente todos os registros mantidas em *buffer* para o centro de monitoramento remoto usando a rede celular; e

- (a_3) Agendar a ocorrência do próximo evento `obter_e_Enviar_Dados_do_VCS()`. Quando o temporizador expirar, retornar para a ação (a_1).

Veículos que foram nomeados como CHs também são capazes realizar a agregação/fusão dos dados adquiridos antes de reportá-los ao servidor de monitoramento. Quando tais mecanismos são empregados, o volume de dados transmitidos sobre as redes móveis pode ser reduzido

⁴ *ACK* (contração de *acknowledgement*) é um pacote especial de tamanho reduzido usado entre dois nós em rede para a confirmação da troca de dados entre eles. Ao receber um *ack*, uma fonte está sendo informada pelo destinatário de que os dados enviados por ela foram devidamente recebidos.

Figura 12 – Arquitetura de MDO para o VCS considerando a EUCLIDEAN: (a) lado do Servidor de Monitoramento; e (b) lado do Cliente (veículo).

Fonte: Elaborada pelo autor.

drasticamente. Por outro lado, mesmo que a aplicação servidora de VCS solicite os dados genuínos de cada veículo envolvido com o sensoriamento, a vantagem de se usar uma única pilha de cabeçalhos para enviar um conjunto de dados em um único pacote da rede móvel não é insignificante, como será mostrado na [Seção 5.2](#). Nós adotamos este último modelo em nossa abordagem. A discussão sobre técnicas de agregação de dados está fora do escopo deste trabalho e será considerada em pesquisas futuras.

4.3 I-BEACON

Conforme abordado nos capítulos anteriores, os vários elementos de sensoriamento presentes nos veículos modernos (e.g., para a monitoração do funcionamento do motor, do consumo de combustível, da temperatura, do nível do óleo e da velocidade de deslocamento), têm transformado esse meio de transporte em poderosas fontes de dados, capazes de servir a uma variedade de aplicações, principalmente aquelas relacionadas aos Sistemas Inteligentes de Transporte (ITSs). No VCS, esses dados podem ser coletados diretamente dos veículos por uma aplicação servidora remota, usando as infraestruturas das redes celulares para a realização das comunicações V2I necessárias, ou eles podem ser obtidos localmente explorando as formações em VANET, por meio de comunicações V2V. De acordo com o domínio da aplicação de VCS, as comunicações do tipo V2V e V2I podem ser empregadas de forma complementar, o que dá ainda mais flexibilidade para a implantação dos serviços de monitoração remota. A EUCLIDEAN faz uso dessa abordagem híbrida para prover descarregamento de dados do sensoriamento veicular nas RANs das operadoras móveis.

Como discutido na Seção anterior, a EUCLIDEAN opera apoiada em dois algoritmos: (i) o S4A, usado para fazer alocações de AAs na ROI; e (ii) o AAP, que se baseia nas AAs criadas pelo S4A para definir agrupamentos de veículos, já que a técnica de MDO proposta está baseada no uso de clusterização geográfica. Nesta Seção, será apresentada uma Abordagem de Aquisição de Dados *in loco* baseada em *Beaconing* para a EUCLIDEAN (em inglês, *In*

loco BEaconing-based dAta Collection ApprOach for euclidean (I-BEACON), que difere da abordagem de aquisição de dados via V2V tratada na [Subseção 4.2.2](#).

No esquema descrito na [Subseção 4.2.2](#), os dados dos MCs são encaminhados aos CHs por um evento chamado `obter_e_Enviar_Dados_do_VCS()`, que é executado periodicamente pela `VCS_AppCliente`. Essa periodicidade é definida pelo parâmetro `frequencia_de_upload_dos_dados` e configurada pela `VCS_AppServidora` antes de iniciar o VCS. Quando o evento `obter_e_Enviar_Dados_do_VCS()` é acionado, os dados são inseridos em uma Mensagem Curta WAVE (em inglês, *WAVE Short Message*) (WSM) particular, que é então transmitida ao CH usando o Protocolo de Mensagem Curta WAVE (em inglês, *WAVE Short Message Protocol*) (WSMP), da pilha WAVE. Essa abordagem é funcional, mas acaba gerando um atraso fim a fim superior ao desejado por muitas aplicações, conforme verificado na [Subseção 5.2.2](#). Além disso, ela incorre numa certa sobrecarga para a comunicação local, já que os dados são encaminhados aos CHs em WSM específicas.

A I-BEACON se apresenta como uma evolução da proposta discutida anteriormente ao passo que insere uma nova maneira de os veículos MCs disponibilizarem seus dados do VCS para os CHs. Ela também habilita a EUCLIDEAN para trabalhar com transmissões V2V de múltiplos saltos. Nesta abordagem, os dados de cada veículo são anexados em pacotes de controle que são transmitidos regularmente pelo serviço de *beaconing*. A estrutura do pacote empregado pela proposta I-BEACON pode ser visualizada na [Figura 13](#).

Figura 13 – Estrutura do *beacon* de controle.

Fonte: Elaborada pelo autor.

onde,

- **Versão**: indica a versão do WSMP empregada;
- **ID do Provedor de Serviço**: identifica o serviço ao qual a carga útil da WSM está associada. Esse campo do cabeçalho possui finalidade semelhante a exercida pelos campos *porta de origem* e *porta de destino* nos protocolos TCP e UDP. Um dispositivo cria uma lista de IDs de Provedores de serviço relacionados aos processos de camada superior que estão ativos e trocando dados em rede. Quando uma nova WSM chega, se o ID de Provedor de serviço constar nessa lista, a carga útil da WSM será encaminhada para o processo correspondente;

- Número do canal: especifica o número do canal que será usado para a transmissão do pacote;
- Potência de transmissão: define a potência de transmissão do sinal a ser usada, com resolução de 1dbm;
- Taxa de dados: indica a taxa de dados empregada na transmissão;
- Endereço de origem: identificação única do veículo gerador do pacote enviado na transmissão;
- Endereço de destino: identificação única para o veículo destinatário do pacote;
- Tamanho: este é o último campo do cabeçalho definido no pacote de *beacon* criado. O seu valor é igual ao número de bytes inseridos na carga útil da WSM. Esse campo é necessário porque a carga útil do pacote pode variar; e
- Carga útil: usado para a inserção dos dados propriamente.
 - Os subcampos Longitude, Latitude, Velocidade e Direção referem-se às propriedades dos veículos, ou de seu deslocamento, e são autoexplicativos.
 - Lista de vizinhos: usado para divulgar os vizinhos de único salto do veículo que emite o *beacon*.

A motivação do uso dos *beacons* para auxiliar no processo de clusterização proposto deve-se ao fato de eles possibilitarem uma troca rápida de informações entre os veículos sem a necessidade de uma configuração prévia da rede. Essa característica é muito relevante quando considerada a intensa mobilidade dos automóveis e as frequentes alterações ocorridas na topologia da VANET. Ao adotar *beacons* também para a troca de dados do VCS entre os MCs e os CHs, espera-se que a nova abordagem seja capaz de (i) fornecer menores atrasos na entrega de dados fim a fim, (ii) diminuir a sobrecarga local de comunicação V2V, e (iii) reduzir o problema de contenção. Com a integração da I-BEACON na EUCLIDEAN, os CHs agora possuem a habilidade de reconhecer MCs que se deslocam a mais de um salto de distância dele, bem como obter seus dados por meio de um veículo intermediário.

A característica de operação com transmissões de múltiplos saltos faz com que a I-BEACON seja capaz de reduzir a probabilidade de que falsos CHs coexistam no CG, diminuindo, assim, as chances de que dados do VCS sejam perdidos no *buffer* desses veículos. Na abordagem definida na [Seção 4.2](#), caracterizada por empregar comunicações de salto único, foi observado que alguns MCs não conseguiam enviar seus dados diretamente aos CHs devido à falta de conectividade direta com ele, conforme ilustrado na [Figura 14](#). Essa situação emergiu nas circunstâncias onde as AAs definidas pela VCS_AppServidora possuíam uma amplitude elevada,

maior ou igual ao alcance da tecnologia IEEE 802.11p⁵. Por definição do protocolo AACP, veículos que se encontrarem em condições de isolamento, sem conectividade direta com o CH ou com qualquer outro MC (ver Figura 14a), se autodeclararam CHs de sua formação, que neste caso é composta somente pelo próprio veículo. Esse comportamento foi assim especificado para que os dados desses veículos pudessem ser reportados para a central de monitoramento, uma vez que eles não conseguem tirar proveito das comunicações V2V. Nesta configuração, ocorrerá a presença de mais de um CH dentro da mesma AA.

O falso CH, por sua vez, retratado na Figura 14c, tem sua origem na situação ilustrada na Figura 14b. Neste cenário, como o veículo MC1 reconhece que MC2 está situado a uma distância menor do centroide correspondente daquela formação, verificação que é realizada pelo AACP, conforme Equação 4.4, MC1 o identifica, de maneira incorreta, como sendo o seu CH. Assim, o MC1 não se autodeclarará como CH de seu agrupamento e os seus dados serão enviados ao veículo MC2. A condição indesejada neste caso está no fato de que esses dados jamais serão reportados ao centro de monitoramento, haja vista que MC2 não se reconhece como um CH, tratando-se, portanto, de um falso CH. Assim, os dados de MC1 ficarão retidos no *buffer* de MC2 e jamais alcançarão a VCS_AppServidora.

Figura 14 – Configuração em que surge o problema do falso CH na abordagem de único salto: (i) MC isolado; (ii) MC oculto; e (iii) Falso CH.

As características incorporadas pela I-BEACON permitem que a EUCLIDEAN suprima o problema do falso CH. Uma vez que MC2 agora tem ciência dos vizinhos diretos de MC1 através dos *beacons* recebidos dele, assim como dos vizinhos diretos do verdadeiro CH, também por meio de seus *beacons*, MC2 é capaz de inferir que MC1 não possui conectividade com o CH, já que o identificador do CH não estará relacionado na Lista de vizinhos de MC1. Ao analisar ambas as Lista de vizinhos recebidas, MC2 verifica que ele é um candidato em

⁵ Em nossos experimentos, o alcance máximo do IEEE 802.11p foi estabelecido em 500 m.

potencial para atuar como *gateway* da comunicação entre MC1 e o CH. Declarando-se como um retransmissor V2V, MC2 se encarregará de encaminhar todos os dados recebidos de MC1 para o CH correspondente. Esse processo de retransmissão se manterá ativo até que (i) MC2 perca o contato direto com MC1, (ii) MC2 perca o contato direto com o CH ou que (iii) MC1 entre no alcance de comunicação do CH corrente.

O processo de aquisição de dados *in loco* com o uso da I-BEACON se dá mediante a realização dos seguintes procedimentos (p), que são executados por cada um dos veículos do CG:

(p_1) Ler os dados dos sensores, anexá-los na carga útil da estrutura do *beacon*, juntamente com a lista de IDs dos vizinhos de único salto, e efetuar a transmissão do pacote em modo *broadcast*;

(p_2) Verificar se ele é o CH corrente:

($p_{2.1}$) Em caso afirmativo, a VCS_AppCliente irá verificar o parâmetro *frequência_de_upload_dos_dados* para decidir o momento de enviar as informações registradas no *buffer* local para a central de monitoramento; e

($p_{2.2}$) Caso contrário, por se tratar de um MC, ele analisará os *beacons* recebidos do CH e os *beacons* recebidos de outros MCs na tentativa de identificar a existência de MCs ocultos, conforme representado na [Figura 14b](#):

($p_{2.2.1}$) Se detectado algum veículo nesta condição, o MC em cena declara-se como um retransmissor V2V e se encarrega de enviar os dados correspondentes ao MC oculto, uma vez que eles se encontram armazenados em seu *buffer*, para o CH da formação; e

($p_{2.2.2}$) Se não houver MCs ocultos, nenhuma ação será iniciada.

(p_3) Aguardar a ocorrência do evento que emitirá o próximo *beacon*, quando o processo de coleta de dados *in loco* retorna para o procedimento (p_1).

AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo discorre sobre a avaliação da abordagem de descarregamento de dados proposta. O texto do capítulo está organizado da seguinte forma: a [Seção 5.1](#) aborda a metodologia empregada para a realização da avaliação da EUCLIDEAN; os seus resultados experimentais são apresentados e discutidos na [Seção 5.2](#); a [Seção 5.3](#) trata da metodologia de avaliação da EUCLIDEAN com o uso da I-BEACON; e a [Seção 5.4](#) finaliza o capítulo analisando os resultados experimentais desta última. As discussões e resultados aqui apresentadas(os) foram publicadas(os) em (NUNES *et al.*, 2017) ou submetidas(os) para publicação no *Journal of Network and Computer Applications* (JNCA)¹.

5.1 Metodologia de Avaliação da EUCLIDEAN

5.1.1 Configuração da Simulação

Para avaliar o desempenho da EUCLIDEAN, foram realizados alguns experimentos usando uma suíte de ferramentas de simulação consideradas do estado da arte, que são bastante empregadas nas pesquisas recentes envolvendo redes veiculares. A primeira delas é o *Objective Modular NEtwork Testbed in C++* (OMNET++)², um *framework* e um conjunto de bibliotecas extensíveis e modulares para suportar a criação de simulações de redes. A segunda ferramenta é um pacote de *software* de código aberto chamado *Simulation of Urban MObility* (SUMO) (KRAJZEWICZ *et al.*, 2012), que foi empregado para modelar nosso cenário urbano e para modelar um sistema de transporte em operação (i.e., para definir os tipos de veículos, as ruas, os semáforos, o comportamento de deslocamento dos veículos e o tráfego em si). Por fim, foi utilizado o *Vehicles in network simulation LTE* (VEINS LTE) (HAGENAUER; DRESSLER; SOMMER, 2014) para acoplar os modelos de rede fornecidos pelo OMNET++ aos modelos de

¹ <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-network-and-computer-applications>

² <https://omnetpp.org/>

tráfego de veículos fornecidos pelo SUMO. O VEINS LTE é um *framework* de código aberto criado com base no OMNET++ e no SUMO para permitir a criação de simulações de redes veiculares. As [Tabela 4](#) e [Tabela 5](#) apresentam, de forma resumida, os principais parâmetros de simulação da rede e do cenário que foram empregados nos experimentos.

Tabela 4 – Parâmetros e valores usados na simulação da EUCLIDEAN

Parâmetro	Valor
Formato do pacote V2V	WAVE short message
Frequência do <i>beaconing</i> V2V	1 Hz
Alcance da transmissão V2V	500 m
Tecnologia MAC, PHY para transmissões V2V	IEEE 802.11p
Frequência usada pelo 802.11p	5.9 GHz
Potência de transmissão do 802.11p	20 mW
Sensibilidade do 802.11p	-89 dBm
Taxa de bit do MAC 802.11p	18 Mbps
Modelo de propagação do rádio 802.11p	Simple path loss model
Intervalo de <i>upload</i> dos dados do VCS	30 s
Tempo de duração da simulação	300 s
Protocolo de transporte LTE	UDP
Tamanho da fila MAC do LTE	2 MB
Frequência usada pelo LTE	2.1 GHz

Para reproduzir um cenário urbano, foi utilizado uma porção de $\approx 4 \text{ km}^2$ da cidade de Bologna, na Itália (Ver [Figura 15](#)). Uma amostragem real de tráfego desta região foi reproduzida por [Bieker et al. \(2015\)](#) e disponibilizada para estudos no ambiente de simulação SUMO. O fluxo de automóveis considerado se modifica ao longo do tempo de execução dos experimentos, com densidades de veículos que variam de 1 a 500. A velocidade máxima alcançada por eles nas vias urbanas é de 70 km/h . Os serviços de conectividade da rede móvel são fornecidos por uma antena celular do tipo *micro-cell*, que foi posicionada na parte central do cenário para que ela pudesse oferecer cobertura de comunicação em toda a região considerada pela simulação.

Tabela 5 – Parâmetros e valores usados no cenário de simulação da EUCLIDEAN

Parâmetro	Valor
Área do cenário	$\approx 4 \text{ km}^2$ ($1990 \text{ m} \times 2150 \text{ m}$)
Densidade de veículos no cenário	[1, 500]
Velocidade máxima dos veículos	70 km/h

Figura 15 – Cenário urbano: área da cidade de Bologna

Fonte: [Bieker et al. \(2015\)](#).

5.1.2 Métricas para a avaliação de desempenho

Conforme abordado em ([REBECCHI et al., 2015](#)), o efeito mais notável do descarregamento de dados em redes móveis deve ser a redução da carga de tráfego e do congestionamento imposto sobre suas infraestruturas. A fim de auxiliar nossas análises, bem como demonstrar o potencial da EUCLIDEAN para reduzir a transmissão de dados do VCS sobre as redes celulares, foram definidas as seguintes métricas de desempenho:

- **Total de Pacotes LTE Transmitidos (TPLT):** é medido pela soma de todos os pacotes de dados relacionados ao VCS que foram transmitidos pelos veículos usando a rede LTE (i.e., $\sum$ transmissões usando o *link* de *upload* da rede celular). A contabilização do TPLT ocorreu durante todo o processo de aquisição de dados, ou seja, durante todo o tempo de simulação;
- **Número de Amostras por Transmissão LTE (NATL):** essa métrica é calculada pela razão entre o número total de amostras³ de dados recebidas pelo servidor de monitoramento e o número de transmissões LTE usadas para reportar todas essas amostras. Isto é,

$$\frac{\sum \text{amostras_de_dados}}{TPLT} \quad (5.1)$$

- **Atraso Médio de Upload (AMU):** o AMU é medido computando-se o tempo médio transcorrido entre o momento em que os dados são obtidos dentro dos veículos, a partir da leitura dos seus sensores, e o instante de tempo em que eles são recebidos pela aplicação servidora. Ou seja,

$$\frac{\sum_{n=1}^N (\text{hora_recebimento_amostra}_n - \text{hora_coleta_amostra}_n)}{\sum \text{amostras_de_dados}} \quad (5.2)$$

³ Os dados coletados em um veículo v_i no instante de tempo t_j representa uma amostra de dados.

- **Número de CH Selecionados (NCHS):** essa métrica determina o número total de veículos que atuaram como CHs ao longo do tempo de simulação.

Os experimentos foram conduzidos considerando múltiplas execuções das simulações, com sementes⁴ únicas para cada repetição. Os valores plotados nos gráficos de resultados correspondem a valores médios das repetições, cujos intervalos de confiança foram calculados com o nível de significância de 0.05, ou seja, assumindo 95 % de nível de confiança.

5.1.3 Metodologia de execução das simulações

Para a realização dos experimentos, foi implementada uma aplicação servidora de monitoramento (VCS_AppServidora) que distribui tarefas de aquisição de dados para a obtenção de posições geográficas de GPS ($v_{i(x,y)}$) e de velocidade ($v_{i(velocidade)}$) dos veículos a cada 30 s. Uma versão cliente da mesma aplicação (VCS_AppCliente) também foi implementada e instalada nas OBUs dos veículos recrutados para o sensoriamento. Cada veículo foi equipado com receptor de GPS, uma interface de comunicação sem fio para transmissões V2I LTE⁵, uma interface de comunicação sem fio de curto alcance para transmissões V2V IEEE 802.11p e vários sensores.

Para realizar o sensoriamento remoto, a VCS_AppServidora primeiro configura as propriedades da tarefa de aquisição de dados (i.e., determina a frequência em que os dados devem ser enviados para a central de monitoramento, delimita a ROI e especifica o tipo de dados que serão obtidos e os veículos que participarão do VCS). Logo depois, a aplicação irá enviar essa tarefa para os veículos que se encontram na região geográfica demarcada. Assim que a tarefa for recebida pela VCS_AppCliente, ela obterá os dados dos sensores embarcados no veículo e, então, mediante condição predefinida nas propriedades dela, fará o *upload* deles para a VCS_AppServidora. Com a adoção da EUCLIDEAN, o processo de *upload* dos dados é realizado com o suporte dos CHs.

A porção da cidade de Bologna apresentada na Figura 15 foi considerada a ROI e todos os veículos trafegando nesse cenário foram recrutados para participarem das atividades de VCS. Para apoiar a formação dos clusters geográficos, todos os veículos realizam *broadcasts* periódicos (1 Hz⁶) de um pacote de controle, via serviço de *beaconing*, contendo suas IDs e suas coordenadas geográficas correntes. Diferentes densidades de veículos d_v (10, 50, 100, 300, 500)⁷

⁴ Os modelos implementados pelos algoritmos de simulação são geralmente inicializados com variáveis aleatórias geradas a partir de valores numéricos chamados de sementes (em inglês, *seeds*). Execuções repetidas de uma simulação utilizando a mesma semente produzirão sempre os mesmos resultados.

⁵ Neste caso, o termo V2I LTE representa uma transmissão infraestruturada usando a rede 4G/LTE. Como em nossos experimentos foram adotados modelos de rede da tecnologia celular 4G, optamos por empregar neste capítulo a terminologia V2I LTE ao invés da V2I ERB, de escopo mais genérico.

⁶ Outras frequências também poderiam ser usadas. A avaliação da melhor frequência está fora do escopo deste trabalho.

⁷ Essas variações tem como objetivo principal representar aquelas situações em que o trânsito é fluente, com um tráfego de veículos reduzido por km², assim como aquelas situações em que um congestionamento

presentes no cenário e três amplitudes de AAs a_{aa} (250m, 350m, 500m) foram considerados pelas simulações. Os rótulos “EUCLIDEAN-250”, “EUCLIDEAN-350” e “EUCLIDEAN-500” são usados nos gráficos para se referirem às amplitudes das AAs empregadas, ou seja, 250 m, 350 m e 500 m, respectivamente.

O desempenho da estratégia de MDO proposta foi avaliado sob várias perspectivas, sobretudo comparando a EUCLIDEAN com abordagens tradicionais de VCS que não empregam técnicas de MDO (ARANITI *et al.*, 2013; CALABUIG *et al.*, 2014), ou seja, onde cada veículo adota o uso exclusivo de transmissões V2I LTE para reportar seus dados do VCS ao centro de monitoramento. Esse modo de avaliação também foi usado por outros trabalhos relacionados que trataram do descarregamento de dados no contexto veicular, tais como (REBECCHI *et al.*, 2015) e (SALVO *et al.*, 2016).

5.2 Análise dos Resultados

5.2.1 Redução de tráfego sobre as redes móveis

Nossa primeira investigação está direcionada para compreender o potencial de redução no número de transmissões usando as redes móveis quando comunicações do tipo V2V são incorporadas ao processo de aquisição de dados via VCS. De acordo com os resultados relacionados no Quadro 4 e representados graficamente na Figura 16, podemos notar que a EUCLIDEAN proporciona uma diminuição substancial no TPLT, que é mais significativa nas situações com maiores quantidades de veículos envolvidos com as atividades de sensoriamento.

Figura 16 – TPLT *versus* Número de Veículos.

Fonte: Dados da pesquisa.

No cenário de maior densidade, com $d_v \rightarrow 500$, no melhor caso, a estratégia proposta utilizou apenas 6,47 % do total de transmissões LTE usadas pelo esquema V2I LTE Puro para o sensoriamento, com um tráfego elevado por km^2 . A intenção com essa dinâmica é avaliar a EUCLIDEAN em diferentes condições de fluxo de veículos, indo de leve a intenso.

Quadro 4 – Relação dos valores médios de TPLT - EUCLIDEAN.

Densidade de veículos	TPLT V2I LTE Puro	TPLT EUCLIDEAN-250	TPLT EUCLIDEAN-350	TPLT EUCLIDEAN-500
10	104.3	67	55	47
50	512	139.7	116.3	96
100	1012.7	155	144	139
300	3013.6	312.3	275	260
500	4985.3	453	350	323

Fonte: Dados da pesquisa.

reportar todos os dados do VCS. Considerando um tamanho de cabeçalho de 8 bytes para o segmento UDP e de 40 bytes para o datagrama IPv6, essas reduções no número de transmissões LTE representaram uma diminuição considerável de tráfego (até 1.79 Mbits⁸) apenas com informações de controle das camadas superiores no cabeçalho dos pacotes. Esses benefícios da EUCLIDEAN para o MDO decorrem do fato de que uma única pilha de cabeçalhos é usada para reportar um conjunto de amostras de dados do sensoriamento veicular em contraponto com o modelo V2I LTE Puro, em que cada amostra de dados é enviada em um pacote LTE particular. A quantidade de tráfego de controle acima mencionada não é desprezível, principalmente se considerado que ela corresponde a quase quatro vezes o volume de tráfego dos próprios dados do VCS (da ordem de 478 Kbits⁹) obtidos durante todo o tempo de execução da simulação. Além disso, com a diminuição da demanda por transmissões LTE, as infraestruturas celulares também são preservadas ao tratar uma quantidade menor de sinalizações de configuração de canais para a troca de dados. É relevante mencionar aqui que os benefícios da EUCLIDEAN poderiam ser ainda maximizados se aplicada alguma técnica de agregação de dados antes de eles serem reportados ao centro de monitoramento. Essa tarefa poderia ser delegada aos CHs, de maneira que todas as amostras de dados pertencentes a um CG pudessem ser convertidas numa representação única de informação, de tamanho reduzido. Assim, o potencial de MDO da proposta seria ainda maior.

⁸ $4985.3 - 323 = 4662.3$ amostras de dados não enviadas individualmente ao servidor via LTE $\times$ (40 bytes do IPV6 + 8 bytes do UDP).

⁹ $4985.3 \times (4 \text{ bytes da latitude} + 4 \text{ bytes da longitude} + 4 \text{ bytes da velocidade de deslocamento})$.

5.2.2 Impacto da amplitude das AAs na criação dos CGs e no AMU

Nossa próxima investigação consistiu em entender como as variações no modo de alocação das AAs afetariam a formação dos CGs e o processo de *upload* dos dados do VCS. De acordo com os resultados revelados na Figura 17, como esperado, o número de CHs ativos durante o VCS está inversamente relacionado ao valor adotado para a a_{aa} . Quanto maior a amplitude das AAs, menor é a quantidade de CHs ativos reportando dados para o centro de monitoramento, o que impacta diretamente no TPLT resultante. Essa relação é reforçada pelos resultados apresentados na Figura 18, onde é possível notar que o NATL é ligeiramente menor quando $a_{aa} \rightarrow 250$. Uma vez que mais CGs são criados nesta configuração, a quantidade média de amostras de dados reportadas por cada um dos CHs é menor.

Figura 17 – NCHS *versus* Número de Veículos.

Figura 18 – NATL *versus* Número de Veículos.

Fonte: Dados da pesquisa.

Quanto ao AMU, verificou-se que essa métrica foi afetada principalmente pelo tempo que as amostras de dados dos MCs permaneceram armazenadas nos *buffers* dos CHs antes de serem reportadas ao centro de monitoramento. Quando os dados gerados pelos MCs chegam aos CHs logo após eles terem finalizado um ciclo de coleta de dados, ou seja, terem enviado as

informações armazenados em *buffer* para a VCS_AppServidora, essas amostras recém recebidas serão mantidas pelos CHs até que o próximo evento de *upload* dos dados seja acionado. Essa situação agregou um atraso considerável na coleta de dados quando a EUCLIDEAN foi empregada, já que nenhuma técnica de sincronização entre os veículos foi aplicada. É importante salientar, entretanto, que de acordo com a tolerância da aplicação, esses atrasos podem ser reduzidos por meio da implantação de mecanismos que periodicamente verificam as amostras mais antigas no *buffer*. Quando excedido um limite de tempo máximo estabelecido, os CHs podem antecipar o processo de *upload* dos dados mantidas em memória. Além disso, verificou-se que $a_{aa} \rightarrow 250$ proporcionou menores AMU. A presença de mais CHs nesse cenário diminuiu a quantidade de amostras mantidas em *buffer* por longos períodos, reduzindo assim, o tempo médio de entrega de todas as amostras de dados para a VCS_AppServidora.

Figura 19 – AMU versus Número de Veículos.

Fonte: Dados da pesquisa.

5.2.3 Distribuição espacial dos CHs

A Figura 20 revela como a EUCLIDEAN é aderente ao objetivo estabelecido de realizar uma distribuição espacial homogênea de CHs dentro da ROI. Conforme relatado anteriormente, distribuir CHs uniformemente na ROI é importante para garantir que todos os demais veículos participantes do VCS possam tirar proveito das comunicações V2V para reportarem seus dados sem que eles precisem acessar diretamente as redes móveis. Desta forma, uma dispersão espacial equilibrada dos CHs pode aumentar o potencial de preservação dos recursos de *uplink* das redes celulares. Cabe destacar que, uma vez que a EUCLIDEAN é baseada em comunicações V2V de único salto, este arranjo é importante também para evitar situações em que dados não podem ser trocados entre CMs e os seus CHs devido às distâncias muito elevadas entre eles. Conforme observado na Figura 20, os CHs selecionados estavam muito próximos dos seus pontos âncoras, i.e., dos centroides estabelecidos. Essa configuração reflete exatamente o esperado. A localização dos CHs plotados na Figura 20 foi obtida no momento em que eles reportaram as amostras de

5.3 Metodologia de Avaliação da EUCLIDEAN com o uso da I-BEACON

5.3.1 Configuração da Simulação

Para avaliar o desempenho da EUCLIDEAN com o uso da I-BEACON, de forma similar ao descrito na [Subseção 5.1.1](#), alguns experimentos de simulação foram conduzidos. As ferramentas OMNET++, SUMO e VEINS LTE foram integradas e reconfiguradas para a criação da infraestrutura tecnológica (i.e., das redes veiculares, do sistema de transporte urbano, das redes celulares e dos servidores de monitoramento) necessária para reproduzir um cenário que pudesse ser implantado uma aplicação de VCS. Os principais parâmetros de simulação, assim com os valores atribuídos a eles, estão discriminados na [Tabela 6](#).

Tabela 6 – Parâmetros e valores usados na simulação da EUCLIDEAN com a I-BEACON

Parâmetro	Valor
Formato do pacote V2V	WAVE short message
Frequência do <i>beaconing</i> V2V	1 Hz
Alcance da transmissão V2V	500 m
Tecnologia MAC, PHY para transmissões V2V	IEEE 802.11p
Frequência usada pelo 802.11p	5.9 GHz
Potência de transmissão do 802.11p	20 mW
Sensibilidade do 802.11p	-89 dBm
Taxa de bit do MAC 802.11p	18 Mbps
Modelo de propagação do rádio 802.11p	Simple path loss model
Intervalo de <i>upload</i> dos dados do VCS	10 s
Tempo de duração da simulação	300 s
Protocolo de transporte LTE	UDP
Tamanho da fila MAC do LTE	2 MB
Frequência usada pelo LTE	2.1 GHz

A porção da cidade de Bologna descrita em ([BIEKER et al., 2015](#)) foi, mais uma vez, considerada como a ROI. Durante o VCS um número máximo de 300 veículos participou das atividades de aquisição de dados e a velocidade máxima definida para as vias urbanas foi de 70 km/h. É importante destacar que, nos simuladores, os veículos possuem modelos de mobilidades bem definidos, de forma a respeitar tanto o comportamento de deslocamento dos demais veículos à sua frente, quanto das sinalizações de trânsito, obedecendo aos limites de velocidade estabelecidos para cada via do sistema de transporte. Um antena de celular do tipo micro-cell (eNodeB) foi implantada no cenário para que os CHs pudessem realizar o acesso às redes móveis e enviar os dados do VCS para o servidor de monitoramento.

5.3.2 Métricas para avaliação de desempenho

Para apoiar nossas análises e demonstrar o potencial da EUCLIDEAN com o uso da I-BEACON para o provimento de MDO em aplicações de VCS, foram consideradas as seguintes métricas de desempenho:

- **Total de Pacotes LTE Transmitidos (TPLT):** é medido pela soma de todos os pacotes de dados relacionados ao VCS que foram transmitidos pelos veículos usando a rede LTE (i.e., $\sum$ transmissões usando o *link* de *upload* da rede celular). A contabilização do TPLT ocorreu durante todo o processo de aquisição de dados, ou seja, durante todo o tempo de simulação;
- **Atraso Médio de Upload (AMU):** o AMU é medido computando-se o tempo médio transcorrido entre o momento em que os dados são obtidos dentro dos veículos, a partir da leitura dos seus sensores, e o instante de tempo em que eles são recebidos pela aplicação servidora. Ou seja,

$$\frac{\sum_{n=1}^N (hora_recebimento_amostra_n - hora_coleta_amostra_n)}{\sum amostras_de_dados} \quad (5.3)$$

- **Taxa de Amostra de Dados Duplicadas (TADD):** essa métrica determina a porcentagem de amostras de dados duplicadas que foram recebidas pela VCS_AppServidora. Ou seja,

$$\frac{amostras_de_dados_duplicadas}{\sum amostras_de_dados} \quad (5.4)$$

- **Número de Amostras por Transmissão LTE (NATL):** essa métrica é calculada pela razão entre o número total de amostras de dados recebidas pelo servidor de monitoramento e o número de transmissões LTE usadas para reportar todas essas amostras. Isto é,

$$\frac{\sum amostras_de_dados}{TPLT} \quad (5.5)$$

As simulações da EUCLIDEAN usando a I-BEACON foram desenvolvidas considerando múltiplas execuções dos experimentos, com valores de sementes únicos para cada execução. Os resultados plotados nos gráficos representam os valores médios obtidos a partir das repetições. Os intervalos de confiança foram calculados com o nível de significância de 0,05, ou seja, assumindo 95 % de nível de confiança. Os intervalos de confiança não foram plotados nos gráficos por motivos de legibilidade.

5.3.3 Metodologia de execução dos experimentos

Para a realização dos experimentos, foi implementado uma instância de uma aplicação servidora de monitoramento, chamada de VCS_AppServidora, que envia tarefas de aquisição

de dados para a obtenção (i) das coordenadas geográficas de GPS, (ii) velocidade e (iii) direção corrente de cada veículo v_i a cada 10 s. Uma porção de $\approx 4 \text{ km}^2$ da cidade de Bologna foi considerada a ROI e todos os veículos trafegando nesse cenário foram recrutados para participarem das atividades de VCS. Para apoiar a formação dos clusters geográficos, bem como a coleta de dados *in loco*, todos os veículos realizam *broadcasts* periódicos (1 Hz) de um pacote de controle (usando a estrutura apresentada na Figura 13), via o serviço de *beaconing*, contendo suas IDs, a lista de vizinhos de salto único e os seus próprios dados do VCS. Diferentes densidades de veículos (10, 50, 100, 300) e quatro amplitudes de AAs (125m, 250m, 350m, 500m) foram consideradas pelas simulações. Os rótulos “EUCLIDEAN&I-BEACON-125”, “EUCLIDEAN&I-BEACON-250”, “EUCLIDEAN&I-BEACON-350”, e “EUCLIDEAN&I-BEACON-500” são usados nos gráficos para se referirem às amplitudes das AAs de 125 m, 250 m, 350 m e 500 m, respectivamente. O desempenho da estratégia de descarregamento de dados proposta foi avaliada sob várias perspectivas, sobretudo comparando a versão modificada da EUCLIDEAN, que faz uso da I-BEACON, (i) com a abordagem tradicional em que cada veículo adota exclusivamente transmissões V2I LTE para reportar seus dados do VCS ao centro de monitoramento; e (ii) com a abordagem do estado da arte apresentada em (SALVO *et al.*, 2016) e detalhada na Subsubseção 3.5.1.1. Esta última foi nomeada neste documento de *Baseline*.

5.4 Análise dos Resultados

5.4.1 Redução de tráfego sobre as redes celulares

Neste experimento, foi avaliado o impacto das variações na amplitude das AAs a_{aa} e na densidade de veículos d_v envolvidos com o VCS no TPLT, considerando que a I-BEACON pode exercer influência sobre os resultados discutidos na Subseção 5.2.1. A primeira relação perceptível através da Figura 21, cujos dados estão detalhados no Quadro 5, é que quanto maior a a_{aa} , menor o número de CHs selecionados para relatar dados do VCS para a VCS_AppServidora, de maneira similar ao observado anteriormente. Isso ocorre porque nestas condições, o número de CGs definidos para cobrir a ROI será menor, já que eles possuem um escopo geográfico maior, e, por consequência, o número de CHs ativos dentro dela acompanhará essa configuração. Todavia, as características de aquisição de dados incorporadas nesta nova versão da EUCLIDEAN afetaram diretamente o potencial de MDO oferecido pela abordagem.

Ao se empregar a I-BEACON, a capacidade de descarregamento de dados da EUCLIDEAN foi aumentada. No melhor dos casos, quando $a_{aa} = 500$ e $d_v = 300$, todos os dados *in loco* puderam ser reportados ao centro de monitoramento usando apenas 1,8% do total de transmissões LTE gastas pelo esquema V2I LTE Puro. A redução de tráfego móvel proporcionada por nossa abordagem quando $a_{aa} = 500\text{m}$ superou a gerada pela solução *Baseline* em todas as densidades de veículos avaliadas. No melhor caso, a EUCLIDEAN realizou a aquisição de todos os dados usando aproximadamente um terço das transmissões efetivadas pela solução *Baseline*.

Se retomada a discussão delineada na [Subseção 5.2.1](#), que trata sobre o tráfego correspondente aos cabeçalhos dos pacotes quando somente transmissões V2I LTE Puro são adotadas, é possível perceber que ao se empregar a I-BEACON, os ganhos são ainda maiores nesse aspecto.

Figura 21 – TPLT *versus* Número de Veículos.

Fonte: Dados da pesquisa.

Quadro 5 – Relação dos valores médios de TPLT - EUCLIDEAN & I-BEACON.

Densidade de veículos	TPLT V2I LTE Puro	TPLT EUCLIDEAN & I-BEACON-125	TPLT EUCLIDEAN & I-BEACON-250	TPLT EUCLIDEAN & I-BEACON-350	TPLT EUCLIDEAN & I-BEACON-500	Baseline
10	290.8	250.2	200.14	170.57	130.86	130.8
50	1490.67	720.6	340.14	260.86	120.43	230.40
100	2990.20	930.2	380.17	360.50	120.83	310.25
300	8890.20	1170.2	450	300	160.50	460.60

Fonte: Dados da pesquisa.

Os benefícios da I-BEACON para o provimento de MDO são impactados principalmente pela a_{aa} definida, mas eles também são fortemente potencializados pela capacidade inserida na EUCLIDEAN de operar com aquisição de dados *in loco* usando transmissões de múltiplos saltos. Essa característica permite que uma quantidade ainda menor de CHs seja necessária para que os veículos MCs possam enviar seus dados do VCS ao centro de monitoramento.

5.4.2 Impacto do uso da I-BEACON na aquisição dos dados do VCS

Uma vez que o modelo de transmissão V2V de múltiplos saltos foi incorporado à EUCLIDEAN com o uso da I-BEACON, um atraso adicional na entrega fim a fim dos dados do sensoriamento veicular é esperado. Os resultados da simulação plotados na Figura 22 mostram como a a_{aa} e a d_v afetam o AMU. A partir das observações, é possível identificar que quanto maior a a_{aa} ($a_{aa} \rightarrow 500$) e a d_v ($d_v \rightarrow 300$), maior tende a ser o AMU. Em geral, valores maiores de a_{aa} tendem a aumentar a probabilidade de uso das transmissões de múltiplos saltos no processo de aquisição de dados. Esses resultados acompanham relatos da literatura que indicam que os modelos de transmissão de múltiplos saltos são propensos a apresentarem atrasos maiores quando comparados aos modelos de transmissão de um único salto.

Figura 22 – AMU versus Número de Veículos.

Fonte: Dados da pesquisa.

Considerando a formação de CGs com $a_{aa} = 125m$, o protocolo criado fornece atrasos menores do que a solução *Baseline* em situações de tráfego mais intenso, ou seja, quando a $d_v = 300$. É relevante mencionar aqui que, usando $a_{aa} = 125m$, a aquisição *in loco* de dados realizada pelos CHs é executada majoritariamente por meio de transmissões de salto único, já que todos os MCs se encontram ao alcance direto dos seus respectivos CHs. Por outro lado, se adotada a $a_{aa} = 500m$, é possível observar um pequeno atraso adicional em comparação com os apresentados pela solução *Baseline* ($\approx 1s$, no pior caso) e com o V2I LTE Puro ($\approx 2s$, no pior caso). Todavia, essa diferença deixa de ser expressiva, e se mostra até positiva, se considerarmos que as trocas de dados entre os CHs e MCs na solução *Baseline* são realizadas exclusivamente por comunicações V2V de único salto. É importante notar que o modelo de aquisição dos dados intra-cluster implementado pela I-BEACON trouxe melhorias consideráveis em relação aos AMUs resultantes quando comparados com aqueles tratados na Subseção 5.2.2. Esses ganhos são decorrentes do fato de que a cada novo *beacon* emitido pelos MCs, os CHs tomam ciência das amostras de dados mais recentes de seus vizinhos, fazendo com que as entradas correspondentes a eles sejam atualizadas nos seus respectivos *buffers*. Desta forma, quando o CHs realizarem o

upload das amostras de dados para o servidor de monitoramento, eles enviarão as versões mais recentes das mesmas.

Comparando os resultados da simulação apresentados na [Figura 21](#) e na [Figura 22](#), é possível constatar que a amplitude das AAs é um parâmetro chave na proposta apresentada e que o valor definido a ela impacta diretamente na quantidade de transmissões resultantes sobre as rede celulares e no atraso médio de *upload* dos dados do sensoriamento. Alguns tipos de aplicações têm requisitos rigorosos em relação ao atraso fim a fim tolerado, como, por exemplo, aplicações que envolvem a preservação da vida de motoristas e passageiros. Essas aplicações são extremamente sensíveis a atrasos e exigem que eles sejam os menores possíveis, da ordem de milissegundos, para não comprometer sua eficácia. Outros tipos, porém, podem suportar latências fim a fim de algumas dezenas de segundos sem que isso afete sua efetividade e consistência. Aplicações de busca de vagas de estacionamento em vias públicas, de monitoramento de tráfego, de direção cooperativa e de medições de poluição urbana são alguns exemplos tolerantes a atrasos. A EUCLIDEAN com o uso da I-BEACON foi projetada para servir melhor a essa segunda categoria de aplicações.

5.4.3 Taxa de amostra de dados duplicados recebidos pela aplicação servidora

A estratégia de clusterização adotada e a introdução do modelo de aquisição de dados *in loco* por meio de transmissões V2V de múltiplos saltos podem gerar uma situação indesejada no contexto de sensoriamento veicular: a circulação e o *upload* de dados duplicados. Durante o processo de coleta de dados *in loco*, os veículos MCs podem deixar a sua formação original $\mathcal{CG}_i$ e migrar para uma formação $\mathcal{CG}_j$ a qualquer momento. Quando um veículo $v_i \in \mathcal{CG}_i$ que está localizado a dois saltos de distância de seu respectivo CH se move para a formação $\mathcal{CG}_j$, no pior dos casos, essa mudança só será percebido 2 segundos depois¹¹. Se o CH que pertence ao $\mathcal{CG}_j$ detecta que v_i agora é um novo nó de seu cluster, mas o CH de $\mathcal{CG}_i$ ainda não está ciente de que v_i deixou sua formação, ambos os CHs reportarão os mesmos dados do veículo v_i . Em outras palavras, a VCS_AppServidora receberá dados duplicados de v_i . De acordo com os resultados apresentados na [Figura 23](#), é possível observar que a EUCLIDEAN com uso da I-BEACON gera um número muito reduzido de dados duplicados. Em algumas ocasiões, o TADD é igual ou muito próxima de zero ($a_{aa} = 350$ e $a_{aa} = 500$). Por outro lado, os dados duplicados na solução *Baseline* podem corresponder a um volume de até 44% de todo o tráfego de dados do VCS gerado durante o sensoriamento. Isso é ainda mais evidente em cenários onde $d_v \rightarrow 300$. Esse resultado apresentado é altamente negativo sob a ótica do MDO, já que recursos da rede são consumidos desnecessariamente com dados inúteis.

¹¹ A frequência de transmissão dos *beacons* V2V adotada é de 1Hz. Assim, as alterações podem levar 1 segundo para chegar a um veículo intermediário e mais 1 segundo para alcançar o CH, que está localizado a dois saltos de distância dele.

Figura 23 – TADD versus Número de Veículos.

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados plotados na [Figura 23](#) demonstram como as técnicas de clusterização tradicionalmente desenvolvidas para WSN operam com certas restrições em cenários de redes veiculares. A ineficiência dessas abordagens em alguns aspectos decorre do fato de que a mobilidade característica dos veículos faz com que as formações em cluster fiquem inconsistentes muito rapidamente. A consequência dessa condição para a troca de dados entre os MCs e os CHs é a ocorrência de um número insatisfatório (i) de dados redundantes circulando pela rede ou mesmo (ii) de informações perdidas. Os resultados e as observações apresentados(as) nesta Subseção mostram como a proposta descrita neste documento é aderente à dinâmica da mobilidade veicular.

5.4.4 Caracterização das transmissões de dados do VCS

Neste experimento, a análise foi concentrada em avaliar como a amplitude das AAs e a densidade de veículos afetaram as transmissões de dados do VCS encapsulados em pacotes LTE. Embora os CHs sejam responsáveis por coletar os dados locais de seus agrupamentos e encapsulá-los dentro de um único pacote LTE, foi observado que em alguns pacotes recebidos pela VCS_AppServidora haviam uma única amostra de dados. Essa situação é resultado das circunstâncias em que somente um veículo foi localizado dentro de regiões estabelecidas por AAs ou em que alguns MCs encontravam-se em completo isolamento (ver [Figura 14b](#)). Por serem únicos em suas AAs ou por se encontrarem isolados, os veículos se autoneomaram CHs e reportaram somente os seus dados para o centro de monitoramento.

Por outro lado, na maioria dos pacotes LTE enviados para a VCS_AppServidora haviam duas ou mais amostras de dados encapsuladas como carga útil. Os resultados da simulação apresentados na [Figura 24](#) mostram, como esperado, uma tendência ascendente de encontrar um número maior de amostras de dados por pacote LTE quando a a_{aa} é maior, i.e., em condições em que $a_{aa} \rightarrow 500$ m. No melhor dos casos, é possível notar que com o uso da I-BEACON a

Figura 24 – Distribuição do número de amostras de dados por pacote LTE recebido pela VCS_
AppServidora.

Fonte: Dados da pesquisa.

quantidade de pacotes LTE com várias amostras de dados é superior aos resultados apresentados pela solução *Baseline*. Essa distribuição indica o quanto a I-BEACON foi fiel ao propósito de maximizar o MDO no que se refere a tirar proveito de uma transmissão sobre a rede móvel para reportar o máximo de amostras possíveis. Ademais, essa configuração, em que os CHs detêm um conjunto médio alto de amostras, se apresenta como um terreno fértil para a aplicação de técnicas de agregação de dados, já que o potencial para a redução do tráfego é maior nestas condições.

Figura 25 – Distribuição da forma como as amostras de dados dos MC foram obtidas pelos CHs: (i) V2V de único salto e (ii) V2V de múltiplos saltos.

Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 25 mostra como as amostras de dados encapsuladas nos pacotes LTE foram coletadas dos veículos MCs pelo seus respectivos CHs: (i) se elas foram obtidas através de transmissões V2V de salto único ou (ii) através de comunicações V2V de múltiplos saltos. Podemos verificar que em condições onde $a_{aa} = 500\text{m}$, cerca de 40% das amostras de dados foram obtidas usando transmissões V2V de múltiplos saltos. Essa característica decorre do fato de que com essa amplitude, os CHs não conseguem atingir todos os veículos seus CGs diretamente, dado o alcance máximo de transmissão da interface de comunicação IEEE 802.11p (definido para 500m nos experimentos). Assim, as amostras de dados dos MCs alcançam os seus CHs por meio de outros MCs intermediários, chamados na I-BEACON de retransmissores V2V.

CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta as principais conclusões delineadas a partir dos resultados experimentais obtidos ao longo da pesquisa. Ele está estruturado da seguinte maneira: a [Seção 6.1](#) trata das considerações finais do trabalho; a [Seção 6.2](#) discorre sobre as principais contribuições da pesquisa; a [Seção 6.3](#) apresenta as publicações gerada; e, por fim, a [Seção 6.4](#) discute algumas possibilidades de trabalhos futuros.

6.1 Considerações finais

Os avanços das tecnologias de computação e de comunicação e a incorporação delas nos automóveis estão viabilizando uma nova geração de veículos conectados. A expectativa é que, com tais características, num futuro próximo esses veículos sejam capazes de trocar dados uns com os outros, e com a Internet, a fim de promoverem um trânsito mais seguro e agradável para os motoristas, passageiros e até mesmo para os pedestres.

Além de um número cada vez maior de sensores, esses veículos modernos estão sendo projetados com capacidades computacionais melhoradas e com diferentes interfaces de comunicação sem fio. Eles estão deixando de ser um simples meio de transporte para pessoas e objetos, e se transformando em poderosas plataformas de dados. Essa propriedade tem aberto novas perspectivas para a criação de aplicações de ITS e fomentado uma grande área de pesquisas na academia e na indústria. Foi nesse terreno fértil que emergiu o VCS, um paradigma inovador para a realização de sensoriamento veicular remoto. A grande vantagem desse modelo é que ele se utiliza das tecnologias já embarcadas nos veículos para a obtenção de dados. Sua principal desvantagem, todavia, reside no fato de que ele é capaz de gerar uma sobrecarga considerável para as infraestruturas das redes móveis.

Este documento de tese descreveu e analisou o uso de comunicação V2V IEEE 802.11p para promover o descarregamento de dados do VCS em redes celulares. Deste modo, a abor-

dagem apresentada se enquadra no descarregamento de dados do tipo D2D *out-of-band*. Diferentemente da maioria das propostas presentes na literatura, discutidas em detalhes no [Capítulo 4](#), a estratégia que foi desenvolvida neste doutorado opera nos canais de *uplink* das RANs, não requer a implantação de equipamentos RSUs/APs Wi-Fi e nem mudanças na infraestrutura das redes móveis. Ela também inova na maneira como os veículos se organizam em clusters para realizarem a coleta de dados *in loco* e para reportá-los ao centro de monitoramento, com grande aderência aos padrões de mobilidade veicular e com alto potencial de preservação dos recursos das redes celulares.

No modelo proposto, os veículos são primeiramente organizados em agrupamentos geográficos (CGs) ao longo de toda a ROI. Na sequência, para cada um dos agrupamentos definidos, foi selecionado um veículo para atuar como representante (CH) dele. Quando as atividades de monitoramento são iniciadas, os dados do VCS de cada agrupamento são enviados aos CHs correspondentes, por meio de transmissões V2V, e estes se encarregam de reportá-los ao centro de monitoramento usando V2I ERB. Nesse esquema, somente um número reduzido de veículos, dentre todos os presentes na ROI, pode fazer uso das comunicações V2I ERB. Como consequência, a sobrecarga de tráfego é transferida da infraestrutura da rede móvel para a rede local *ad hoc* inter-veicular de curto alcance.

A proposta foi avaliada por meio de experimentos conduzidos em ferramentas de simulação consideradas do estado da arte. Os resultados obtidos validam a hipótese formulada através de comparações entre a estratégia elaborada e outras abordagens presentes na literatura. Do ponto de vista de descarregamento de dados, a solução discutida nesta tese apresentou uma redução significativa no número de transmissões usando as redes móveis, que no melhor caso foi de $\sim 98,2\%$ quando comparada com a abordagem V2I LTE Puro, tradicionalmente empregada pelos trabalhos relacionados. Ao ser confrontada com a estratégia apresenta em ([SALVO et al., 2016](#)), a EUCLIDEAN foi capaz de promover uma redução de até 66% no número de transmissões através das redes celulares.

Adicionalmente, a partir dos resultados obtidos foi possível constatar um baixo atraso médio agregado na entrega das informações ao centro de monitoramento quando a EUCLIDEAN foi incorporada no processo de aquisição de dados via VCS. Nos piores casos, os tempos transcorridos entre a coleta *in loco* dos dados e o recebimento dos mesmos pelas aplicações servidoras ficaram em patamares entre 700 ms e 2 s. Considerando que a proposta foi desenvolvida para servir, principalmente, a uma classe de aplicações não tão sensíveis a atrasos dessas magnitudes (e.g., de busca de vagas de estacionamento em vias públicas, de monitoramento de tráfego, de direção cooperativa e de medições de poluição urbana), os valores obtidos se mostraram promissores.

De forma derradeira, mas não menos inportante, os resultados experimentais obtidos demonstraram que a solução discutida nesta tese apresentou uma redução da taxa de dados de VCS duplicados para patamares igual ou próximos a zero (0.0%, 0.6%, 0.2%, 1.2%) em relação

ao volume total de dados adquiridos. Conforme retratado na [Subseção 5.4.4](#), as taxas de dados redundantes encontradas na implementação da abordagem descrita em (SALVO *et al.*, 2016) foi de até 44 % nos cenários com alta densidade veicular.

Uma vez que a era da IoT e das cidades inteligentes está apenas começando, soluções para o descarregamento de dados, como a tratada nesta pesquisa, são consideradas imprescindíveis para continuar mantendo a rede de acesso à Internet operacional e capaz de suportar uma demanda de comunicação móvel cada vez maior por parte de suas aplicações.

6.2 Contribuições

A inclusão dos veículos como dispositivos de borda da Internet resultará num aumento da demanda de recursos da rede de acesso móvel sem precedentes. Com o número de aplicações que estão sendo projetadas para os veículos do futuro, a necessidade que eles terão de trocar dados em rede será cada vez maior. Veículos atuarão como fonte de dados, mas também serão consumidores em potencial deles.

As principais contribuições desta pesquisa de doutorado são:

- Construção de uma abordagem, nomeada EUCLIDEAN, para apoiar o descarregamento de dados do VCS em redes celulares. As maiores vantagens da proposta desenvolvida são: (i) ela não requer a implantação e/ou alterações nas infraestruturas das redes móveis; (ii) ela dispensa a necessidade de implantação e uso de RSUs e/ou APs Wi-Fi; e (iii) ela pode ser empregada para operacionalizar diversos tipos de aplicações de sensoriamento veicular, tornando-a bastante abrangente e flexível;
- Disponibilização de um modelo de clusterização geográfica de veículos baseada no conceito lógico de Áreas de Atração e no uso de *beacons*. O método de clusterização apresentado se mostrou eficaz para apoiar a implantação do MDO no contexto de VCS, uma vez que ele opera em conformidade com os padrões de mobilidade veicular. Os resultados experimentais mostraram que esse modelo é capaz de viabilizar uma redução significativa do número de transmissões V2I ERB e com um baixo atraso agregado fim a fim na aquisição dos dados. A abordagem desenvolvida ainda ofereceu uma taxa bastante reduzida de dados duplicados trafegando pela rede;
- A EUCLIDEAN se apresenta também como uma plataforma de camada de rede¹ capaz de permitir a integração e o estudo de técnicas de agregação/fusão de dados *in loco* para aplicações de VCS. Por ser implementada em nível de camada de rede, a incorporação de tais técnicas no nível de camada de aplicação, por exemplo, antes de os dados serem

¹ Nos modelos de referência de arquitetura de redes de computadores ISO/OSI e TCP/IP, a camada de rede tem como uma de suas principais funções tratar questões relacionadas ao roteamento dos dados.

transmitidos ao centro de monitoramento, poderia proporcionar resultados ainda mais expressivos para o MDO; e

- Um estudo exploratório mostrando que as comunicações V2V podem contribuir para a implementação de mecanismos de MDO do tipo D2D *out-of-band* no contexto veicular.

6.3 Publicações Geradas

As principais produções científicas geradas a partir da condução do projeto de doutoramento e que estão diretamente relacionadas ao tema de pesquisa abordado são apresentadas a seguir:

- Publicada:
 - NUNES, D. F.; MOREIRA, E. S.; KIMURA, B. Y.; SASTRY, N.; MAHMOODI, T. Attraction-area based geo-clustering for lte vehicular crowdsensing data offloading. In: Proceedings of the 20th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (ACM MSWiM '17). New York, NY, USA. 2017. p. 323–327. ISBN 978-1-4503-5162-1.
- Submetidas:
 - NUNES, D. F.; MOREIRA, E. S.; KIMURA, B. Y. A V2V-based Protocol for Vehicular CrowdSensing Data Offloading in Cellular Networks. In: Journal of Network and Computer Applications. Submetida em 2018.
 - NUNES, D. F.; MOREIRA, E. S. Mobile Data Offloading for Vehicular CrowdSensing Applications: a Survey on in-band and out-of-band Techniques. In: Ad Hoc Networks. Submetida em 2019.

6.4 Trabalhos Futuros

As discussões apresentadas no [Capítulo 4](#) e [Capítulo 5](#) mostram que apesar dos resultados promissores da proposta apresentada, este trabalho evidencia algumas trilhas que ainda precisam ser pavimentadas com novos estudos e pesquisa. A incorporação de métodos de agregação e/ou fusão de dados do VCS, por exemplo, para reduzir a quantidade de informações trafegando no *backaul* das redes móveis, é uma delas.

O processo de distribuição das Áreas de Atração na EUCLIDEAN também poderá ser estendido para tornar a solução mais adaptativa e flexível. Uma das possibilidades é fazer com que ele seja mais sensível ao traçado das ruas e/ou ao fluxo dos veículos. Em situações com altas densidades, as Áreas de Atração poderiam ser criadas com amplitudes menores,

enquanto que em situações com baixa densidades, suas amplitudes poderiam ser elevadas. Essa observação é pertinente se considerarmos que elas impactarão na geração dos agrupamentos geográficos veiculares. Com agrupamentos de tamanhos diferentes, os veículos poderiam, por exemplo, operar com *beacons* adaptativos (AWANG *et al.*, 2017), diminuindo ou aumentando a potência de emissão dos mesmos, de forma a reduzir problemas de interferência e de perdas de dados no nível de comunicação local.

Questões de segurança e privacidade são muito importantes em Sistemas de Informação e Comunicação. Embora não tenha sido escopo de nossa pesquisa, alguns trabalhos (WOLF, 2009; GAO; XIN, 2018; AGARWAL, 2018) reforçam a necessidade de se implementar técnicas para garantir que os dados transmitidos entre os veículos ou entre os veículos e a Internet sejam confidenciais e não sofram alterações, comprometendo a integridade das informações. Outro ponto relevante relacionado a este contexto é a autenticação do remetente, ou seja, a garantia de que os dados vieram de uma fonte esperada e reconhecida. Esse é um terreno fértil para o desenvolvimento de novos trabalhos a fim de auxiliar o modelo proposto nesta tese, principalmente se considerarmos que os CHs são pontos de vulnerabilidade, tornando os dados mais sensíveis a ataques.

A EUCLIDEAN considera que todos os veículos recrutados para as atividades de sensoriamento estejam aptos a se tornarem CHs, ou seja, a doarem recursos de sua conectividade com as redes móveis para escoarem os dados de seus agrupamentos. Isso significa que a proposta está limitada pelo quão altruístas são esses veículos. Neste sentido, mecanismos de incentivos que promovam a colaboração dos nós para atuarem como CHs são relevantes para garantir a correta operacionalização do sistema de VCS e garantir eficiência do MDO.

A criação de mecanismos multiparamétricos para a seleção de CHs também seria outro tópico relevante a ser aprimorado a partir do trabalho realizado. Alguns fatores, tais como o tipo do veículo (e.g., passeio, utilitário, taxi e ônibus), a sua trajetória, a qualidade do sinal da rede celular recebida (e.g., Indicador de Qualidade do Canal (em inglês, *Channel Quality Indicator*) (CQI) da rede celular) e a franquia de dados móveis remanescente poderiam ser avaliados em conjunto com o posicionamento geográfico do veículo.

Por último, mas não menos importante, cabe mencionar que essa pesquisa visou o desenvolvimento de um mecanismo de MDO no *uplink* das redes móveis. Entretanto, em função de uma gama de aplicações inovadoras que estão sendo projetadas para o contexto dos ITSs, os veículos conectados serão consumidores em potencial de dados relacionados ao VCS e que estão armazenados na nuvem. Desta forma, estudos relacionados ao provimento de MDO nos canais de *downlink* das redes celulares também são muito relevantes para esse contexto em particular.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, P. Technical review on different applications, challenges and security in vanet. **Journal of Multimedia Technology & Recent Advancements**, v. 4, n. 3, p. 21–30, 2018. Citado na página 111.

AL-SULTAN, S.; AL-DOORI, M. M.; AL-BAYATTI, A. H.; ZEDAN, H. A comprehensive survey on vehicular ad hoc network. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 37, p. 380 – 392, 2014. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S108480451300074X>>. Citado nas páginas 30, 42, 43, 44 e 49.

ALAWI, M.; ALSAQOUR, R.; SUNDARARAJAN, E.; ISMAIL, M. Prediction model for offloading in vehicular wi-fi network. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, INSIGHT - Indonesian Society for Knowledge and Human Development, v. 6, n. 6, p. 944–951, 2016. ISSN 2088-5334. Citado nas páginas 71, 72 e 74.

ANCONA, S.; STANICA, R.; FIORE, M. Performance boundaries of massive floating car data offloading. In: **2014 11th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 89–96. Citado nas páginas 69, 73 e 74.

ANDREEV, S.; PYATTAEV, A.; JOHNSON, K.; GALININA, O.; KOUCHERYAVY, Y. Cellular traffic offloading onto network-assisted device-to-device connections. **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 4, p. 20–31, April 2014. ISSN 0163-6804. Citado na página 62.

ARANITI, G.; CAMPOLO, C.; CONDOLUCI, M.; IERA, A.; MOLINARO, A. Lte for vehicular networking: a survey. **IEEE Communications Magazine**, v. 51, n. 5, p. 148–157, May 2013. ISSN 0163-6804. Citado na página 93.

ARKIAN, H. R.; ATANI, R. E.; KAMALI, S. Cluster-based traffic information generalization in vehicular ad-hoc networks. In: **Telecommunications (IST), 2014 7th International Symposium on**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1195–1200. Citado na página 33.

ASADI, A.; WANG, Q.; MANCUSO, V. A survey on device-to-device communication in cellular networks. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 16, n. 4, p. 1801–1819, Fourthquarter 2014. Citado nas páginas 59, 60, 62 e 63.

AWANG, A.; HUSAIN, K.; KAMEL, N.; AÏSSA, S. Routing in vehicular ad-hoc networks: A survey on single- and cross-layer design techniques, and perspectives. **IEEE Access**, v. 5, p. 9497–9517, 2017. Citado nas páginas 44 e 111.

BAILEY, J.; BUDGEN, D.; TURNER, M.; KITCHENHAM, B.; BRERETON, P.; LINKMAN, S. Evidence relating to object-oriented software design: A survey. In: **First International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM 2007)**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 482–484. ISSN 1949-3770. Citado na página 65.

BASAGNI, S.; CONTI, M.; GIORDANO, S.; STOJMENOVIC, I. **Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions**. 2nd. ed. Wiley-IEEE Press, 2013. ISBN 9781118087282, 9781118511305. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/9781118511305>>. Citado nas páginas 40, 41, 42, 43 e 44.

BAZZI, A.; MASINI, B. M.; PASOLINI, G. V2v and v2r for cellular resources saving in vehicular applications. In: **2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 3199–3203. ISSN 1525-3511. Citado na página 32.

BAZZI, A.; MASINI, B. M.; ZANELLA, A.; PASOLINI, G. Ieee 802.11p for cellular offloading in vehicular sensor networks. **Comput. Commun.**, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 60, n. C, p. 97–108, abr. 2015. ISSN 0140-3664. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2015.01.012>>. Citado nas páginas 70 e 74.

BAZZI, A.; ZANELLA, A. Position based routing in crowd sensing vehicular networks. **Ad Hoc Networks**, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 36, n. P2, p. 409–424, jan. 2016. ISSN 1570-8705. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2015.06.005>>. Citado nas páginas 52 e 54.

BENAMAR, N.; SINGH, K. D.; BENAMAR, M.; OUADGHIRI, D. E.; BONNIN, J.-M. Routing protocols in vehicular delay tolerant networks: A comprehensive survey. **Computer Communications**, v. 48, p. 141 – 158, 2014. ISSN 0140-3664. Opportunistic networks. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366414001212>>. Citado nas páginas 31, 42, 44 e 49.

BIEKER, L.; KRAJZEWICZ, D.; MORRA, A.; MICHELACCI, C.; CARTOLANO, F. Traffic simulation for all: A real world traffic scenario from the city of bologna. In: _____. **Modeling Mobility with Open Data: 2nd SUMO Conference 2014 Berlin, Germany, May 15-16, 2014**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 47–60. ISBN 978-3-319-15024-6. Citado nas páginas 90, 91 e 98.

BRAVO-TORRES, J. F.; SAIÁNS-VÁZQUEZ, J. V.; LÓPEZ-NORES, M.; BLANCO-FERNÁNDEZ, Y.; PAZOS-ARIAS, J. J. Mobile data offloading in urban vanets on top of a virtualization layer. In: **2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 291–296. ISSN 2376-6492. Citado nas páginas 69 e 74.

BRIANTE, O.; CAMPOLO, C.; IERA, A.; MOLINARO, A.; PARATORE, S. Y.; RUGGERI, G. Supporting augmented floating car data through smartphone-based crowd-sensing. **Vehicular Communications**, v. 1, n. 4, p. 181 – 196, 2014. ISSN 2214-2096. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214209614000412>>. Citado nas páginas 71 e 74.

BURLEIGH, S.; HOOKE, A.; TORGERSO, L.; FALL, K.; CERF, V.; DURST, B.; SCOTT, K.; WEISS, H. Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary internet. **IEEE Communications Magazine**, v. 41, n. 6, p. 128–136, June 2003. ISSN 0163-6804. Citado nas páginas 38 e 39.

CALABUIG, J.; MONSERRAT, J. F.; GOZALVEZ, D.; KLEMP, O. Safety on the roads: Lte alternatives for sending its messages. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, v. 9, n. 4, p. 61–70, Dec 2014. ISSN 1556-6072. Citado na página 93.

CAMPBELL, A. T.; EISENMAN, S. B.; LANE, N. D.; MILUZZO, E.; PETERSON, R. A.; LU, H.; ZHENG, X.; MUSOLESI, M.; FODOR, K.; AHN, G. S. The rise of people-centric sensing. **IEEE Internet Computing**, v. 12, n. 4, p. 12–21, July 2008. ISSN 1089-7801. Citado na página 50.

CHENG, N.; LU, N.; ZHANG, N.; SHEN, X. S.; MARK, J. W. Opportunistic wifi offloading in vehicular environment: A queueing analysis. In: **2014 IEEE Global Communications Conference**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 211–216. ISSN 1930-529X. Citado na página 71.

CISCO. **Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021**. 2018. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>>. Acesso em: 15/06/2018. Citado na página 58.

DUTTA, P.; AOKI, P. M.; KUMAR, N.; MAINWARING, A.; MYERS, C.; WILLETT, W.; WOODRUFF, A. Common sense: Participatory urban sensing using a network of handheld air quality monitors. In: **Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems**. New York, NY, USA: ACM, 2009. (SenSys '09), p. 349–350. ISBN 978-1-60558-519-2. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1644038.1644095>>. Citado na página 51.

ESTRIN, D.; CHANDY, K. M.; YOUNG, R. M.; SMARR, L.; ODLYZKO, A.; CLARK, D.; REDING, V.; ISHIDA, T.; SHARMA, S.; CERF, V. G.; HÖLZLE, U.; BARROSO, L. A.; MULLIGAN, G.; HOOKE, A.; ELLIOTT, C. Participatory sensing: applications and architecture [internet predictions]. **IEEE Internet Computing**, v. 14, n. 1, p. 12–42, Jan 2010. ISSN 1089-7801. Citado na página 50.

EZIRIM, K.; JAIN, S. Taxi-cab cloud architecture to offload data traffic from cellular networks. In: **2015 IEEE 16th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. Citado na página 72.

FALL, K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. In: **Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications**. New York, NY, USA: ACM, 2003. (SIGCOMM '03), p. 27–34. ISBN 1-58113-735-4. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/863955.863960>>. Citado nas páginas 37, 38 e 39.

FENG, D.; LU, L.; YUAN-WU, Y.; LI, G. Y.; LI, S.; FENG, G. Device-to-device communications in cellular networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 4, p. 49–55, April 2014. ISSN 0163-6804. Citado nas páginas 59 e 61.

FENG, J.; FENG, Z. A vehicle-assisted offloading scheme for hotspot base stations on metropolitan streets. In: **2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. ISSN 2166-9589. Citado nas páginas 69 e 74.

FUXJAGER, P.; GOJMERAC, I.; FISCHER, H. R.; REICHL, P. Measurement-based small-cell coverage analysis for urban macro-offload scenarios. In: **2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–5. ISSN 1550-2252. Citado na página 62.

- GANTI, R. K.; YE, F.; LEI, H. Mobile crowdsensing: current state and future challenges. **IEEE Communications Magazine**, v. 49, n. 11, p. 32–39, November 2011. ISSN 0163-6804. Citado nas páginas 31, 50, 53 e 54.
- GAO, T.; XIN, X. Location privacy protection scheme based on random encryption period in vanets. In: SPRINGER. **International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing**. [S.l.], 2018. p. 366–374. Citado na página 111.
- GORRIERI, A.; MARTALÒ, M.; BUSANELLI, S.; FERRARI, G. Clustering and sensing with decentralized detection in vehicular ad hoc networks. **Ad Hoc Networks**, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 36, n. P2, p. 450–464, jan. 2016. ISSN 1570-8705. Vehicular Networking for Mobile Crowd Sensing. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2015.05.019>>. Citado nas páginas 30 e 51.
- HAGENAUER, F.; DRESSLER, F.; SOMMER, C. Poster: A simulator for heterogeneous vehicular networks. In: **2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 185–186. ISSN 2157-9857. Citado na página 89.
- HEINRICHS, H. Sharing economy: A potential new pathway to sustainability. **Ecological Perspectives for Science and Society**, v. 4, n. 22, p. 228–231, 2013. Citado na página 57.
- HIGUCHI, T.; YAMAGUCHI, H.; HIGASHINO, T.; TAKAI, M. A neighbor collaboration mechanism for mobile crowd sensing in opportunistic networks. In: **2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 42–47. ISSN 1550-3607. Citado na página 52.
- HOEBEKE, J.; MOERMAN, I.; DHOEDT, B.; DEMEESTER, P. An overview of mobile ad hoc networks: applications and challenges. **JOURNAL OF THE COMMUNICATIONS NETWORK**, v. 3, n. 3, p. 60–66, 2004. ISSN 1477-4739. Citado na página 41.
- HULL, B.; BYCHKOVSKY, V.; ZHANG, Y.; CHEN, K.; GORACZKO, M.; MIU, A.; SHIH, E.; BALAKRISHNAN, H.; MADDEN, S. Cartel: A distributed mobile sensor computing system. In: **Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems**. New York, NY, USA: ACM, 2006. (SenSys '06), p. 125–138. ISBN 1-59593-343-3. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1182807.1182821>>. Citado na página 51.
- IEEE. **Search Tips**. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/Xplorehelp/#/searching-ieee-xplore/search-tips>>. Acesso em: 15/06/2018. Citado na página 66.
- INTEL. **Noções básicas sobre IEEE * 802.11 associação e autenticação**. 2018. Disponível em: <<https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/support/articles/000006508/network-and-i-o/wireless-networking.html>>. Acesso em: 5/07/2018. Citado na página 33.
- ITU, I. R. **The Internet of Things**. [S.l.], 2005. Disponível em: <<https://www.itu.int/net/ws/tun/newsroom/stats/The-Internet-of-Things-2005.pdf>>. Acesso em: 03 de junho de 2018. Citado na página 29.
- KANG, S.; MUTKA, M. W. A mobile peer-to-peer approach for multimedia content sharing using 3g/wlan dual mode channels. **Wireless Communications and Mobile Computing**, v. 5, n. 6, p. 633–645, 2005. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcm.332>>. Citado na página 62.

KAPADIA, A.; KOTZ, D.; TRIANDOPOULOS, N. Opportunistic sensing: Security challenges for the new paradigm. In: **2009 First International Communication Systems and Networks and Workshops**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–10. ISSN 2155-2487. Citado na página 50.

KITCHENHAM, B.; BRERETON, O. P.; BUDGEN, D.; TURNER, M.; BAILEY, J.; LINK-MAN, S. Systematic literature reviews in software engineering – a systematic literature review. **Information and Software Technology**, v. 51, n. 1, p. 7 – 15, 2009. ISSN 0950-5849. Special Section - Most Cited Articles in 2002 and Regular Research Papers. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950584908001390>>. Citado na página 65.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. **Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering**. 2007. Disponível em: <https://www.elsevier.com/__data/promis_misc525444systematicreviewsguide.pdf>. Acesso em: 01 de junho de 2018. Citado nas páginas 65, 121 e 122.

KRAJZEWICZ, D.; ERDMANN, J.; BEHRISCH, M.; BIEKER, L. Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. **International Journal On Advances in Systems and Measurements**, v. 5, n. 3&4, p. 128–138, December 2012. Disponível em: <<http://elib.dlr.de/80483/>>. Citado na página 89.

KYRIAZOPOULOU, C. Smart city technologies and architectures: A literature review. In: **2015 International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–12. Citado na página 52.

LEE, K.; LEE, J.; YI, Y.; RHEE, I.; CHONG, S. Mobile data offloading: How much can wifi deliver? **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 21, n. 2, p. 536–550, April 2013. ISSN 1063-6692. Citado na página 62.

LEE, M.; SONG, J.; JEONG, J.; KWON, T. Dove: Data offloading through spatio-temporal rendezvous in vehicular networks. In: **2015 24th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–8. ISSN 1095-2055. Citado na página 70.

LI, Y.; SU, G.; HUI, P.; JIN, D.; SU, L.; ZENG, L. Multiple mobile data offloading through delay tolerant networks. In: **Proceedings of the 6th ACM Workshop on Challenged Networks**. New York, NY, USA: ACM, 2011. (CHANTS '11), p. 43–48. ISBN 978-1-4503-0870-0. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2030652.2030665>>. Citado na página 63.

LIU, J.; KATO, N.; MA, J.; KADOWAKI, N. Device-to-device communication in lte-advanced networks: A survey. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 1923–1940, Fourthquarter 2015. ISSN 1553-877X. Citado nas páginas 63 e 64.

LUO, Y.; ZHANG, W.; HU, Y. A new cluster based routing protocol for vanet. In: **2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing**. [S.l.: s.n.], 2010. v. 1, p. 176–180. Citado na página 82.

MA, H.; ZHAO, D.; YUAN, P. Opportunities in mobile crowd sensing. **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 8, p. 29–35, Aug 2014. ISSN 0163-6804. Citado nas páginas 29, 31, 53 e 54.

MASINI, B. M. Vehicular networking for mobile crowd sensing. **Ad Hoc Netw.**, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 36, n. P2, p. 407–408,

jan. 2016. ISSN 1570-8705. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2015.10.002>>. Citado nas páginas 52 e 54.

MOHAN, P.; PADMANABHAN, V. N.; RAMJEE, R. Nericell: Rich monitoring of road and traffic conditions using mobile smartphones. In: **Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems**. New York, NY, USA: ACM, 2008. (SenSys '08), p. 323–336. ISBN 978-1-59593-990-6. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1460412.1460444>>. Citado na página 51.

MOTA, V. F. S.; MOURA, H.; MACEDO, D. F.; GHAMRI-DOUDANE, Y. Analisando a capacidade de descarregamento de redes móveis por meio de redes oportunísticas. In: **"XXXIV Simpósio Brasileiro de Rede de Computadores"**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–14. Citado na página 61.

NUNES, D. F.; MOREIRA, E. S.; KIMURA, B. Y.; SASTRY, N.; MAHMOODI, T. Attraction-area based geo-clustering for lte vehicular crowdsensing data offloading. In: **Proceedings of the 20th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems**. New York, NY, USA: ACM, 2017. (MSWiM '17), p. 323–327. ISBN 978-1-4503-5162-1. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/3127540.3127576>>. Citado nas páginas 78 e 89.

REBECCHI, F.; AMORIM, M. D. de; CONAN, V.; PASSARELLA, A.; BRUNO, R.; CONTI, M. Data offloading techniques in cellular networks: A survey. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 17, n. 2, p. 580–603, Secondquarter 2015. ISSN 1553-877X. Citado nas páginas 33, 54, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 91 e 93.

REDDY, S.; PARKER, A.; HYMAN, J.; BURKE, J.; ESTRIN, D.; HANSEN, M. Image browsing, processing, and clustering for participatory sensing: Lessons from a dietsense prototype. In: **Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors**. New York, NY, USA: ACM, 2007. (EmNets '07), p. 13–17. ISBN 978-1-59593-694-3. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1278972.1278975>>. Citado na página 51.

SALVO, P.; TURCANU, I.; CUOMO, F.; BAIOCCHI, A.; RUBIN, I. Lte floating car data application off-loading via vanet driven clustering formation. In: **2016 12th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–8. Citado nas páginas 33, 69, 73, 74, 93, 100, 108 e 109.

SHAREF, B. T.; ALSAQOUR, R. A.; ISMAIL, M. Vehicular communication ad hoc routing protocols: A survey. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 40, p. 363 – 396, 2014. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804513001963>>. Citado nas páginas 30, 42, 43, 44, 45, 46, 47 e 48.

STANICA, R.; FIORE, M.; MALANDRINO, F. Offloading floating car data. In: **2013 IEEE 14th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–9. Citado nas páginas 32 e 69.

STIEMERLING, M.; KIESEL, S. Cooperative p2p video streaming for mobile peers. In: **2010 Proceedings of 19th International Conference on Computer Communications and Networks**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–7. ISSN 1095-2055. Citado na página 62.

SU, K.; LI, J.; FU, H. Smart city and the applications. In: **2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1028–1031. Citado na página 52.

TAVENARD, R.; AMBEKAR, O.; PAUWELS, E. J.; WAAIJERS, M. Opportunistic sensing and learning in sensor networks. In: **2007 International Workshop on Content-Based Multimedia Indexing**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 46–52. ISSN 1949-3983. Citado na página 50.

TIMPNER, J.; WOLF, L. Query-response geocast for vehicular crowd sensing. **Ad Hoc Networks**, v. 36, p. 435 – 449, 2016. ISSN 1570-8705. Vehicular Networking for Mobile Crowd Sensing. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870515001286>. Citado nas páginas 30, 51 e 75.

VIGNERI, L.; SPYROPOULOS, T.; BARAKAT, C. Storage on wheels: Offloading popular contents through a vehicular cloud. In: **2016 IEEE 17th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–9. Citado na página 70.

WANG, N.; WU, J. Opportunistic wifi offloading in a vehicular environment: Waiting or downloading now? In: **IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–9. Citado nas páginas 70 e 74.

WANNSTROM, J. **LTE-Advanced**. [S.l.], 2013. Disponível em: <http://www.3gpp.org/technologies/97-lte-advanced>. Acesso em: 23 de maio de 2018. Citado na página 61.

WEYRICH, M.; SCHMIDT, J. P.; EBERT, C. Machine-to-machine communication. **IEEE Software**, v. 31, n. 4, p. 19–23, July 2014. ISSN 0740-7459. Citado na página 52.

WOLF, M. Vehicular security mechanisms. In: _____. **Security Engineering for Vehicular IT Systems: Improving the Trustworthiness and Dependability of Automotive IT Applications**. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009. p. 121–165. ISBN 978-3-8348-9581-3. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9581-3_8. Citado na página 111.

XIA, F.; YANG, L. T.; WANG, L.; VINEL, A. Internet of things. **Int. J. Commun. Syst.**, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, UK, v. 25, n. 9, p. 1101–1102, set. 2012. ISSN 1074-5351. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/dac.2417>. Citado na página 29.

ZHIOUA, G. e. m.; LABIOD, H.; TABBANE, N.; TABBANE, S. Vanet inherent capacity for offloading wireless cellular infrastructure: An analytical study. In: **2014 6th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. ISSN 2157-4952. Citado nas páginas 70 e 74.

ZHU, X.; LI, Y.; JIN, D.; LU, J. Contact-aware optimal resource allocation for mobile data offloading in opportunistic vehicular networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 66, n. 8, p. 7384–7399, Aug 2017. ISSN 0018-9545. Citado nas páginas 70 e 72.

GLOSSÁRIO

Amostra de Dados: Trata-se de um conjunto de dados que são coletados periodicamente pelas aplicações de VCS. Uma amostra de dados é caracterizada pelo dados propriamente dito, obtidos a partir dos sensores dos veículos, e uma marcação de tempo (*timestamp*) que relaciona o momento em que esses dados foram coletados..

Comutação-por-mensagem: é um modelo de comunicação adotado pelas DTNs em que nenhum circuito é previamente estabelecido entre a origem e o destino antes da troca dados. Isso significa que recursos da rede não são antecipadamente alocados para suportar uma determinada transmissão. Quando uma mensagem precisa ser enviada, ela é armazenada e encaminhada nó a nó, desde a origem até alcançar o seu destino..

Comutação-por-pacotes: é um modelo de comunicação adotado pela Internet em que, assim como na Comutação por mensagem, nenhum circuito é estabelecido com antecedência entre a origem e o destino antes do início das transmissões. Isso significa que recursos da rede não são pré-alocados para suportar o envio dos dados. Quando um pacote precisa ser enviado, ele é armazenado e encaminhado nó a nó, desde a origem até o seu destino. Neste modelo, os recursos da rede são reservados por demanda..

Estudo Primário: De acordo com [Kitchenham e Charters \(2007\)](#), um estudo primário consiste num estudo empírico que investiga uma questão de pesquisa específica..

Estudo Secundário: Trata-se de estudo que busca revisar todos os estudos primários relacionados a uma questão de pesquisa específica. O estudo secundário tem como objetivo sintetizar as evidências disponíveis na literatura que estão relacionadas a uma questão de pesquisa específica ([KITCHENHAM; CHARTERS, 2007](#))..

Mapeamento Sistemático: é um estudo secundário que usa uma metodologia bem definida para identificar, analisar e interpretar todas as evidências disponíveis na literatura que estão relacionadas a uma questão de pesquisa específica, a um tópico ou a um fenômeno de interesse. Sua abordagem deve ser de carácter imparcial e reproduzível. As razões mais comuns que levam à condução de um mapeamento sistemático são: (i) para sumarizar as evidências empíricas existentes sobre um determinado tópico; (ii) para identificar lacunas (em inglês, *gaps*) na pesquisa atual, a fim de sugerir novas investigações mais aprofundada; e (iii) para proporcionar uma compreensão mais ampla a respeito de um campo de

estudo, a fim de posicionar adequadamente novas atividades de pesquisa ([KITCHENHAM; CHARTERS, 2007](#))..

Tarefa de coleta de dados: No contexto de VCS, uma tarefa de coleta de dados consiste numa solicitação/requisição que a aplicação servidora, hospedada na nuvem, envia para as aplicações clientes, instaladas nos veículos, com a finalidade de obter dados. Uma tarefa de dados possui vários parâmetros, tais como frequência de leitura dos dados dos sensores dos veículos, frequência de *upload* desses dados, tipos de dados que serão obtidos e quantidade e localização dos veículos que participarão do sensoriamento..