RAFAEL HENRIQUE DE OLIVEIRA

**Veículo-sensor: estado da arte e proposta de método orientativo para
especificação do sistema de posicionamento veicular**

**São Paulo
2017**

RAFAEL HENRIQUE DE OLIVEIRA

**Veículo-sensor: estado da arte e proposta de método orientativo para
especificação do sistema de posicionamento veicular**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

**São Paulo
2017**

RAFAEL HENRIQUE DE OLIVEIRA

**Veículo-sensor: estado da arte e proposta de método orientativo para
especificação do sistema de posicionamento veicular**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Flávio Guilherme Vaz
de Almeida Filho

**São Paulo
2017**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Oliveira, Rafael Henrique de

Veículo-sensor: estado da arte e proposta de método orientativo para especificação do sistema de posicionamento veicular / R. H. Oliveira -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

188 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Veículo-sensor 2.Posicionamento veicular 3.Sistemas Inteligentes de Transportes 4.Veículos especiais 5.Sensor (aplicações) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

AGRADECIMENTOS

Devo o primeiro agradecimento aos meus pais, Cícero e Lourdes, e à minha irmã, Daniele, por terem me permitido seguir os meus sonhos acadêmicos.

Agradeço, também de forma especial, ao professor Jorge Cintra, principal responsável por minha introdução à vida acadêmica.

Outro agradecimento especial é devido ao professor Flávio Vaz, cuja grande dedicação à atividade de orientação permitiu que eu não me desestabilizasse nos momentos mais difíceis desta pesquisa. E peço desculpas por minha forma peculiar de trabalhar.

Agradeço aos professores Leopoldo Yoshioka e Rogério Amarante pelas contribuições ao trabalho, tanto em forma quanto em conteúdo.

Ao colega Rodrigo Pissardini, pela enorme paciência comigo e pelas colaborações pretéritas, presentes e futuras.

Ao colega Erly Caldas, pelo auxílio no levantamento de dados complementares.

Aos colegas Arildo e Adalberto, pela ajuda quanto à infraestrutura do laboratório.

À Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), nas pessoas de André Takeshi e Ricardo Penteado, por ter possibilitado visita ao carro-controle. E ao professor Telmo Porto, pelo contato inicial com a Companhia e pela atenção dedicada mesmo antes de existir um projeto de pesquisa.

Aos amigos Thúlio e Eduardo, os poucos que me suportam fora do ambiente acadêmico.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de Mestrado.

E a todos os professores que passaram por minha vida, desde a pré-escola, por terem reconhecido meu potencial e apontado as oportunidades criadas pela educação.

Une certaine quantité de rêverie est bonne, comme un narcotique à dose discrète. Cela endort les fièvres, quelquefois dures, de l'intelligence en travail, et fait naître dans l'esprit une vapeur molle et fraîche qui corrige les contours trop âpres de la pensée pure, comble çà et là des lacunes et des intervalles, lie les ensembles et estompe les angles des idées. Mais trop de rêverie submerge et noie. Malheur au travailleur par l'esprit qui se laisse tomber tout entier de la pensée dans la rêverie ! Il croit qu'il remontera aisément, et il se dit qu'après tout c'est la même chose. Erreur !

La pensée est le labeur de l'intelligence, la rêverie en est la volupté. Remplacer la pensée par la rêverie, c'est confondre un poison avec une nourriture.

Victor Hugo, *Les Misérables* (1862)

RESUMO

Plataformas móveis, como *smartphones*, *tablets* e também veículos, têm cada vez mais possibilitado a coleta e análise de dados de seu entorno. Essa oportunidade de sensoriamento de diferentes fenômenos oferece maior cobertura espaço-temporal a menor custo em relação às técnicas tradicionais. O dinamismo dessa abordagem traz desafios relacionados ao posicionamento desses sensores e ao georreferenciamento das informações coletadas. Desta forma, a presente pesquisa tem como objetivo propor método orientativo de especificação de técnicas de posicionamento no contexto do uso do veículo enquanto sensor. Inicialmente, a partir de levantamento bibliográfico, caracteriza-se a evolução do conceito de veículo-sensor e seu emprego no sensoriamento da fluidez do tráfego, das condições do pavimento, de qualidade do ar, entre outras variáveis. Descreve-se o estado da arte nesse campo de pesquisa, identificando lacunas e pontos a serem mais bem estudados. Em um segundo momento, identificando o posicionamento como tópico pouco discutido nesse contexto, o trabalho dedica-se à definição de método orientativo de especificação de sistemas de posicionamento para veículos-sensores, tendo em conta os requisitos associados às diferentes variáveis a serem sensoriadas. Ao fim, apresenta-se estudo de campo referente ao uso de veículos na identificação de ocorrência de lombadas, empregando as ferramentas estabelecidas nessa dissertação e pormenorizando a discussão do sistema de posicionamento. Dessa forma, o trabalho contribui para a caracterização dos sistemas de sensoriamento baseados em veículos e a identificação do posicionamento como parâmetro fundamental para a qualidade desses sistemas.

Palavras-chave: Veículo-sensor. Posicionamento veicular. Sistemas Inteligentes de Transportes. Veículos especiais. Sensor (aplicações).

ABSTRACT

Mobile devices such as smartphones, tablets and also vehicles have increasingly enabled gathering and analysing data from its environment. This opportunity of sensing different phenomena offers greater spatiotemporal coverage at less cost when compared to the traditional techniques. The dynamics of this approach has challenges related to the positioning of this sensors and the georeferencing of sensed data. Thus, this research aims to propose an orientative method to specify the positioning system for use with vehicles working as mobile sensors. Firstly, by doing a literature review, the purpose is to characterize the evolution of the concept of vehicle as a mobile sensor and its use in sensing traffic conditions, road conditions, air quality and other variables. The state of the art in this research field is described and the gaps and open questions are identified. In a second moment, after identifying the positioning in this context as an understudied area, this research will work on discussing an orientative method to specify the positioning system considering specificities and requirements associated with the different sensed phenomena. At the end, this work describes an exploratory study using a vehicle to identify road bumps, applying the tools defined in the method and detailing the discussion about the positioning system. Therefore, this work contributes to the characterization of sensing systems based on vehicles and the identification of the vehicular positioning as a fundamental parameter for the quality of these systems.

Keywords: Vehicle as a sensor. Vehicular positioning. Intelligent Transportation Systems. Special Vehicles. Sensor (applications).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Carro-controle da CPTM, modelo EM100U, da fabricante <i>Plasser & Theurer</i>	29
Figura 2 - Unidade de controle do sistema de triangulação a <i>laser</i> , registrando a temperatura ambiente e a temperatura de operação em cada <i>laser</i>	30
Figura 3 - <i>Analyseur de profil en long</i> (APL).....	31
Figura 4 - Ilustração dos conceitos de veículo como sensor móvel (VaaMS) e de comunicação sem fio.....	35
Figura 5 - À esquerda, imagem adquirida por câmera “olho de peixe” instalada sobre veículo; à direita, imagem indicando a linha do horizonte artificial (em verde), satélites com visada direta (marcados em azul) e satélites sem visada direta (em vermelho)	58
Figura 6 - Arranjo da instalação dos acelerômetros no truque e na caixa de eixo	75
Figura 7 - <i>Tramway</i> com nó sensor instalado, assinalado em vermelho, à esquerda. Visão interna do nó sensor, à direita	93
Figura 8 - Ilustração do conceito de acurácia utilizando alvos. O valor real é representado pelo centro do alvo e os tiros são os valores de medição dos estimadores.....	115
Figura 9 - Rua do Matão, Cidade Universitária, em região densamente arborizada	139
Figura 10 - Avenida Professor Lineu Prestes, Cidade Universitária, em região com poucas obstruções ao sinal GNSS.....	139
Figura 11 - Comparação entre a quantidade de céu visível em trecho da Rua do Matão, à esquerda, e trecho da Avenida Professor Lineu Prestes, à direita. Fotografias obtidas por câmera com lente do tipo olho de peixe apontada para o zênite.....	140
Figura 12 - Itinerário da linha circular de ônibus 8022- Metrô Butantã-Cidade Universitária, em vermelho no mapa.....	141

Figura 13 - Orientação dos eixos cartesianos associados ao <i>smartphone</i> <i>Lenovo Vibe K5</i> . À esquerda, tem-se a visão em perspectiva do celular. À direita, tem-se o celular na posição de fixação na janela do ônibus	144
Figura 14 - Orientação de fixação do <i>smartphone</i> , à esquerda, e posição de fixação no ônibus, à direita e destacado em vermelho	145
Figura 15 - Gráfico da função representativa do perfil da lombada, em vermelho, e função representativa da aceleração vertical ao longo da travessia, em azul.....	148
Figura 16 - Lombada na Rua do Matão, à altura do Parque Esporte para Todos, Cidade Universitária	151
Figura 17 - Assinatura da lombada-exemplo em termos da velocidade e das acelerações vertical e lateral. O filtro média móvel para 40 amostras foi aplicado aos dados de aceleração	152
Figura 18 - Mapa de lombadas identificadas e não identificadas	154
Figura 19 - Lombada não identificada pelo método proposto, localizada na Avenida Professor Mello de Moraes, à altura do Instituto de Psicologia da USP	155
Figura 20 - Número de satélites visíveis ao longo da viagem realizada	159

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Frequência de ocorrência de artigos segundo categorização proposta pelo presente trabalho.....	104
Quadro 2 - Contagem de termos citados e técnicas empregadas no domínio do posicionamento.	105
Quadro 3 - Tipos de lombada de acordo com características da via.....	137
Quadro 4 - Especificações técnicas dos sensores existentes no <i>Lenovo Vibe K5</i> e usados no estudo de campo	143
Quadro 5 - Parâmetros finais dos filtros utilizados	153
Quadro 6 - Resultado da identificação de lombadas.....	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Discrepâncias no posicionamento das lombadas	156
Tabela 2 - Discrepância longitudinal no posicionamento das lombadas	157

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADAS	<i>Advanced Driver Assistance Systems</i>
AGPS	<i>Assisted Global Positioning System</i>
AGNSS	<i>Assisted Global Navigation Satellite System</i>
AMV	Aparelhos de Mudança de Via
APL	<i>Analyseur de profil em long</i>
ATC	<i>Automatic Train Control</i>
ATTS	<i>Advanced Transport Telematics Systems</i>
AVI	<i>Automatic Vehicle Identification</i>
AVL	<i>Automatic Vehicle Location</i>
CCW	<i>Cooperative Collision Warning</i>
CP	<i>Cooperative positioning</i>
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
CPVS	<i>Cyber-physical vehicle systems</i>
CR	<i>Cognitive radio</i>
CSS	<i>Context Sensitive Systems</i>
CSV	<i>Comma separated values</i>
CUASO	Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DGNSS	<i>Differential Global Navigation Satellite System</i>
DOP	<i>Dilution of precision</i>
ERB	Estação Rádio Base
ERTMS	<i>European Rail Traffic Management System</i>
FCD	<i>Floating car data</i>

GLONASS	<i>Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IC NoW	<i>Information-Centric networking on Wheel</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPS	<i>Indoor positioning system</i>
IRI	<i>International Roughness Index</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
IUP	<i>Intelligent urban positioning</i>
IVC	<i>Inter-Vehicle Communication</i>
JDL	<i>Joint Directors of Laboratories</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LOS	<i>Line of sight</i>
MANET	<i>Mobile ad hoc network</i>
MDE	<i>Modelo Digital de Elevação</i>
MLS	<i>Mobile Laser Scanning</i>
NLOS	<i>Non line of sight</i>
OD	<i>Origem/Destino</i>
PPP	<i>Posicionamento por Ponto Preciso</i>
QoS	<i>Quality-of-service</i>
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
RAIM	<i>Reiceiver Autonomous Integrity Monitoring</i>
RAMS	<i>Reliability, availability, maintainability and safety</i>

RFID	<i>Radio-frequency Identification</i>
RGS	<i>Route Guidance System</i>
RNP	<i>Required Navigation Performance</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>
SNCF	<i>Société Nationale des Chemin de Fer Français</i>
SVF	<i>Sky View Factor</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
UWB	<i>Ultrawide-band</i>
V2I	Comunicação entre veículo e infraestrutura (<i>vehicle-to-infrastructure</i>)
V2N	Comunicação entre veículo e rede de comunicação (<i>vehicle-to-network</i>)
V2P	Comunicação entre veículo e pedestre (<i>vehicle-to-pedestrian</i>)
V2V	Comunicação veículo a veículo (<i>vehicle-to-vehicle</i>)
V2X	Comunicação entre veículo e elemento genérico (<i>vehicle-to-everything</i>)
VaaMS	<i>Vehicle as a mobile sensor</i>
VANET	<i>Vehicular ad hoc network</i>
VASNET	<i>Vehicular Ad Hoc and Sensor Network</i>
VC	<i>Vehicular Cloud</i>
VITP	<i>Vehicular Information Transfer Protocol</i>
VLT	Veículo Leve sobre Trilhos
VSN	<i>Vehicular sensor network</i>
XFCD	<i>Extended floating car data</i>
WGS	World Geodetic System
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo geral	20
1.1.2	Objetivos específicos	21
1.2	JUSTIFICATIVA	22
1.3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
1.4	ESTRUTURA DO TEXTO	25
2	CARACTERIZAÇÃO DO VEÍCULO-SENSOR	27
2.1	CARRO-CONTROLE E VEÍCULO DE AVALIAÇÃO	27
2.2	TELEMETRIA	31
2.3	<i>PROBE VEHICLE</i> E <i>FLOATING CAR DATA</i>	32
2.4	VEÍCULO-SENSOR	34
2.4.1	Sensoriamento	36
2.4.2	Posicionamento	36
2.4.3	Comunicação	37
2.4.4	Tratamento dos dados	39
3	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	40
3.1	ARTIGOS PRINCIPAIS	41
3.1.1	Evolução do conceito de uso do veículo enquanto sensor	42
3.1.2	Veículo-sensor e posicionamento como parâmetro relevante	47
3.2	ARTIGOS CENTRADOS NO POSICIONAMENTO VEICULAR	51
3.2.1	Aspectos gerais de posicionamento veicular	51
3.2.2	Estudo do posicionamento por GNSS e propostas de melhorias	54
3.2.3	Estudo de alternativas ao posicionamento por satélites	64
3.3	ARTIGOS CENTRADOS NAS REDES VEICULARES E NA COMUNICAÇÃO VEICULAR	66
3.3.1	Redes veiculares <i>Ad-hoc</i> (VANET)	66
3.3.2	Redes de sensores veiculares (VSN)	69
3.3.3	Tecnologias de comunicação veicular sem fio	72
3.4	ARTIGOS CENTRADOS NOS SISTEMAS SENSORES E TRATAMENTO DOS DADOS SENSORIADOS	73

3.4.1	Monitoramento da infraestrutura viária	73
3.4.2	Monitoramento das condições do tráfego	86
3.4.3	Monitoramento das condições ambientais	92
3.4.4	Monitoramento de elementos do entorno	93
4	CLASSIFICAÇÃO DO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	95
4.1	DEFINIÇÃO DAS CLASSES	95
4.1.1	Natureza das variáveis monitoradas	95
4.1.2	Subsistemas abordados pelo artigo	97
4.1.3	Modalidade do artigo	98
4.1.4	Modo de transporte	98
4.2	TERMOS CITADOS E TÉCNICAS EMPREGADAS	99
4.2.1	Comunicação	99
4.2.2	Posicionamento	100
4.2.3	Técnicas de sensoriamento	102
4.2.4	Variáveis sensoriadas	103
4.3	RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO E DA CONTAGEM DOS TERMOS E TECNOLOGIAS EMPREGADOS	104
4.3.1	Considerações finais da classificação	106
5	MÉTODO ORIENTATIVO DE ESPECIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE POSICIONAMENTO	107
5.1	DIRETRIZES PARA O MÉTODO ORIENTATIVO DE ESPECIFICAÇÃO ..	107
5.2	PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO POSICIONAMENTO	111
5.2.1	Acurácia	113
5.2.2	Disponibilidade	116
5.2.3	Taxa de atualização	117
5.2.4	Tempo para determinação da posição	118
5.3	REQUISITOS POSICIONAIS PARA SERVIÇOS DE SENSORIAMENTO BASEADOS EM VEÍCULOS	118
5.3.1	Finalidade do serviço	120
5.3.2	Variável a ser sensoriada	122
5.3.3	Cenário do serviço	126
5.3.4	Modo de transporte	127
5.4	CARACTERIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO QUANTO A DESEMPENHO	128

5.4.1	Técnicas baseadas em GNSS.....	128
5.4.2	Radiolocalização.....	131
5.4.3	Dispositivos de proximidade.....	133
6	ESTUDO DE CAMPO	134
6.1	TRABALHOS RELACIONADOS	134
6.2	DESCRIÇÃO DO SERVIÇO DE SENSORIAMENTO	136
6.2.1	Variável sensoriada	136
6.2.2	Natureza do serviço.....	137
6.2.3	Cenário	138
6.2.4	Modo de transporte	140
6.3	TÉCNICAS DE COLETA E TRANSMISSÃO DOS DADOS	141
6.3.1	Posicionamento	142
6.3.2	Sensoriamento.....	142
6.3.3	Comunicação	144
6.3.4	Descrição do arranjo experimental.....	144
6.4	TÉCNICAS DE TRATAMENTO DOS DADOS	145
6.4.1	Dados posicionais	145
6.4.2	Dados de aceleração e velocidade.....	146
6.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	153
6.5.1	Qualidade da identificação de lombadas	153
6.5.2	Qualidade do posicionamento.....	155
7	CONCLUSÕES.....	160
7.1	MAPEAMENTO DA LITERATURA.....	160
7.2	MÉTODO ORIENTATIVO DE ESPECIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE POSICIONAMENTO	161
7.3	ESTUDO DE CAMPO	161
	REFERÊNCIAS.....	163
	APÊNDICE A - QUADRO DA CLASSIFICAÇÃO DO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	178
	APÊNDICE B - LISTA DOS ARTIGOS DO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	180

1 Introdução

Com a redução dos custos de armazenamento e processamento computacionais e o desenvolvimento dos recursos de comunicação, o emprego de plataformas móveis para operações cada vez mais complexas, como a obtenção de variáveis do ambiente físico que os cerca, tem surgido como campo de pesquisa de destaque crescente (LEE et al., 2006a). Dessa forma, telefones móveis, *tablets* e, mais recentemente, veículos, possuindo elevado número de sensores embarcados para as mais diferentes funcionalidades, podem ser empregados no sensoriamento dos mais diversos fenômenos em ampla variedade de domínios. Integrados em redes de sensores móveis, esses dispositivos podem proporcionar um monitoramento que, comparado a redes estáticas ou levantamentos tradicionais, teria menor custo e maior cobertura espaço-temporal (LANE et al., 2010).

Neste contexto, e a partir do extenso levantamento bibliográfico realizado para a presente pesquisa, é possível perceber o veículo como uma significativa fonte de dados na busca de maior conhecimento de sua operação e do ambiente pelo qual trafega. Um veículo americano, como ilustração, possui um número médio de 70 sensores a bordo (*in-vehicle sensors*), com a função de monitorar o desempenho de componentes e sistemas, bem como proporcionar facilidades ao condutor (ABDELHAMID; HASSANEIN; TAKAHARA, 2014). Em veículos de passeio ou de carga, estes sensores monitoram tanto as condições internas quanto de seu entorno, contemplando variáveis como o volume de gasolina no tanque, a temperatura no baú refrigerado ou a distância em relação aos veículos e obstáculos vizinhos.

Além desse monitoramento, destaca-se também a criação de sistemas de veículos-sonda (*probe vehicle*), conceito já consolidado e concebido para coletar e compartilhar dados de progresso dos veículos pela malha viária através de uma infraestrutura de comunicação (USDOT, 2015). Parâmetros básicos como posição, velocidade e histórico de paradas são obtidos e tratados de forma a ser possível estimar as condições de tráfego e alimentar Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transportation Systems*, ITS) de informação ao usuário (WILLIAMS, 2008).

Contudo, pesquisas recentes têm buscado enxergar o carro como uma fonte relevante de outros tipos de dados, não necessariamente relacionados às suas funções ou às condições de fluidez das vias. Dessa forma, o monitoramento veicular é visto além da mera localização ou das condições de condicionamento da carga ou de conforto dos passageiros. Os sensores já existentes, além de atenderem às funções básicas do veículo, poderiam facilmente ser adaptados para levantamento de variáveis não relacionadas à sua operação. Por exemplo, a temperatura externa medida para o sistema de ar condicionado seria relevante não apenas para essa funcionalidade, mas se transmitida poderia compor um banco de dados de uma agência ambiental. De forma complementar, sensores relativamente simples poderiam ser adicionados sem impactar o funcionamento do veículo e permitindo o monitoramento do meio pelo qual ele trafega. O deslocamento dos veículos ao longo da malha viária, além de permitir estimar fluxos na rede, oferece também uma oportunidade de se monitorar as condições de rolamento. As respostas do carro às irregularidades do pavimento (acelerações) seriam identificáveis com o uso de um acelerômetro triaxial embarcado (ERIKSSON et al., 2008; MEDNIS; ELSTS; SELAVO, 2012). A partir desse ponto de vista, a presente pesquisa adota o termo veículo-sensor para descrever um veículo genérico em operação e empregado no levantamento de variáveis genéricas do meio pelo qual ele trafega.

Nessa abordagem móvel, outra função relevante, além do sensoriamento em si, é a transmissão dos dados coletados. A comunicação veicular sem fio destaca-se como assunto de interesse crescente em pesquisas (UEHARA; SUNAHARA; MURAI, 2005), seja realizada entre veículos (*vehicle-to-vehicle*, V2V), entre veículo e a via (*vehicle-to-infrastructure*, V2I) ou, de forma mais ampla, entre veículo e uma parte genérica (*vehicle-to-everything*, V2X). Fazendo uso dessa oportunidade de transmissão de dados, Lee et al. (2006a) introduzem o paradigma das redes de sensores veiculares, destacando o fato de que o conjunto dos veículos em circulação abrange uma maior porção da malha viária com uma maior frequência de obtenção dos dados. Como resultado, obtém-se uma ferramenta de monitoramento ubíquo de custo potencialmente menor em comparação às técnicas de levantamento tradicionais, como veículos especialmente equipados para obtenção de parâmetros da via ou sensores fixos de monitoramento das condições ambientais.

Como apresentado pelos trabalhos que consolidam os conceitos de redes de

sensores veiculares e veículos-sensores, diversas aplicações poderiam se beneficiar dessa nova fonte de dados. Operadores rodoviários podem utilizá-la no suporte e na criação de serviços ITS relacionados às informações meteorológicas ou às condições de rolamento, bem como na avaliação do desempenho dos pavimentos e no planejamento da manutenção da via. Além disso, as agências meteorológicas e os serviços públicos de gerenciamento de emergência e de monitoramento ambiental podem fazer uso dos dados (ABDELHAMID; HASSANEIN; TAKAHARA, 2014).

Contudo, a própria mobilidade, apresentada como uma vantagem por permitir a obtenção de dados em frequência espacial e temporal superior às redes de monitoramento estáticas, traz um novo desafio. Uma vez que esses sensores não têm uma posição fixa conhecida nem estão sujeitos a um cenário controlado, seu posicionamento surge como um parâmetro relevante para a qualidade da informação produzida a partir dessa fonte de dados (DURAZO-CARDENAS et al., 2014).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

A presente pesquisa tem como objetivo, a partir do levantamento do estado da arte no contexto dos veículos-sensores terrestres, a proposição de um método orientativo¹ de especificação das tecnologias de posicionamento a serem empregadas nesse contexto. Uma vez identificada a questão do posicionamento e dos requisitos posicionais associados às variáveis sensoriadas como pontos negligenciados nesse campo de pesquisa, pretende-se contribuir com a discussão de critérios que permitam a realização da atividade de especificação de um sistema de posicionamento para veículos sensores.

¹ Método orientativo, ou para orientação, seria aquele cuja motivação é oferecer orientação em forma de recomendações para condução de determinada atividade. Não tem como objetivo, portanto, o efetivo estabelecimento (prescrição) das técnicas a serem utilizadas (NERI, 2007; TRIGO, 2009; MOREIRA, 2012).

1.1.2 Objetivos específicos

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Conceituar os veículos-sensores e as redes de sensores veiculares, assim como caracterizá-los em termos de seus componentes ou subsistemas, a partir da vasta bibliografia levantada.
- b) Realizar levantamento do estado da arte no campo dos veículos-sensores, identificando a evolução desse conceito, as oportunidades em termos de ITS e monitoramento urbano e as lacunas e pontos a serem mais bem estudados nesse tópico.
- c) Classificar a literatura selecionada (item anterior) em termos que melhor contribuam para o mapeamento do estado da arte.
- d) Identificar os parâmetros de desempenho relevantes para a especificação de técnicas de posicionamento.
- e) Caracterizar as tecnologias de posicionamento aplicáveis a veículos-sensores segundo os parâmetros de desempenho selecionados e de acordo com sua natureza técnica e sua aplicabilidade a diferentes cenários e variáveis sensorizadas.
- f) Caracterizar os potenciais serviços de sensoriamento baseados em veículos também em termos de parâmetros de desempenho do sistema de posicionamento.
- g) Avaliar a viabilidade do veículo-sensor em serviço de sensoriamento associado à infraestrutura viária (identificação de lombadas) a partir de estudo de campo e empregando as ferramentas definidas no método orientativo.

1.2 JUSTIFICATIVA

O posicionamento do veículo-sensor, ainda que majoritariamente tratado como questão apenas marginal nos sistemas propostos na bibliografia, é parâmetro relevante para que os dados sensoriados transformem-se em informações úteis, situando-os no tempo e no espaço de forma adequada para a representação do fenômeno a ser monitorado. Identifica-se, dessa forma, importante lacuna no tratamento dessa questão nesse campo de pesquisa. Uma vez que um dos grandes desafios da geoinformação é a representação de fenômenos dinâmicos (CÂMARA et al., 2005), o georreferenciamento dos dados obtidos torna-se questão crítica quando considerada a mobilidade inerente a essa plataforma de sensoriamento. O presente trabalho busca preencher essa lacuna ao propor um método que oferece orientações na atividade de especificação de um sistema de posicionamento e estudar os critérios relevantes nessa escolha de acordo com os requisitos posicionais das variáveis a serem sensoriadas.

Além disso, outra contribuição relevante para o trabalho é procurar esclarecer o emprego de conceitos que não estão bem definidos na literatura. Por se tratar de campo de pesquisa extremamente dinâmico, verifica-se iniciativas que buscam criar novos termos para o uso do veículo enquanto sensor ou emprestam termos já consagrados em outras áreas, como o *probe vehicle*, para descrever essa modalidade de obtenção de dados.

1.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Em um primeiro momento, a presente dissertação utiliza a revisão bibliográfica sistemática na área dos veículos-sensores como método de verificação de tendências, identificação de lacunas nesse campo de pesquisa e identificação dos parâmetros relevantes nas questões do posicionamento dos veículos-sensores, atividades que contribuirão para a proposição de um método de especificação das tecnologias de posicionamento. Dessa forma, o levantamento do estado da arte não é apenas fim, mas também meio de construção de novos conhecimentos e da

consolidação de conceitos.

Encontra-se na literatura propostas que fornecem etapas para a execução dessa atividade (SEURING et al., 2005; CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011; SEURING; GOLD, 2012; LEIRAS et al., 2014). Baseando-se nelas, segue a sequência adotada no presente texto:

- a) Coleta do material. Compreende as atividades de definição e delimitação do material, podendo ser elencadas as seguintes etapas:
 - i. Seleção da base de dados de artigos científicos. No presente caso, foi usada a base de dados *Web of Science*, que indexa mais de 12.000 periódicos científicos e 148.000 anais de conferências (THOMSON REUTERS, 2016).
 - ii. Seleção das palavras-chave adequadas a serem usadas na busca. Foram utilizadas quatro expressões: "*vehic* AND sens** ", "*rail* AND sens**", "*probe vehicles*" e "*floating car*". Pretendeu-se, desta forma, obter uma amostra significativa da literatura associada ao uso de sensores embarcados em veículos.
 - iii. Definição do escopo temporal (período de cobertura). Adotou-se o ano de 2011 como limite temporal inicial nas buscas realizadas na base de dados. Contudo, trabalhos anteriores destacadamente relevantes foram incluídos.
 - iv. Definição de critérios associados às publicações: tipo de publicação (artigos, anais de conferências, capítulos de livros, etc.), fator de impacto da publicação (ou métricas semelhantes), número de citações. Deu-se preferência para trabalhos publicados em periódicos com fator de impacto acima da média de suas áreas científicas, isto é, presentes nos dois quartis superiores na classificação adotada pelo *Web of Science*.
- b) Análise descritiva. Avaliar e discutir os artigos quanto a seu objetivo de pesquisa, motivação, metodologia e resultados.
- c) Estabelecimento de categorias. Método para classificação da literatura

levantada em categorias que permitam identificação da contribuição de cada artigo para o estado da arte. O presente trabalho propõe uma alteração às metodologias encontradas, baseadas somente no estabelecimento de categorias ou classes. Pretende-se, em adição, realizar contagem de termos discutidos e tecnologias empregadas em cada artigo, facilitando a verificação de tendências de pesquisa e lacunas.

- d) Avaliação do material e resultados. Sintetização das informações encontradas em forma de tabela, quantificando frequências por categorias adotadas ou termos encontrados. O produto desse método é o quadro-síntese da categorização e das quantificações, podendo ser visualizado como o mapeamento do estado da arte nesse campo de pesquisa

Em um segundo momento, uma vez identificada lacuna na questão do posicionamento do veículo-sensor, realiza-se a proposição de método orientativo de especificação desse subsistema. Para tanto, se faz necessário realizar levantamento bibliográfico pontual e adicional (ou seja, em menor escala que o inicialmente realizado) em duas áreas específicas:

- a) Estudo dos requisitos posicionais quanto às características de cada serviço de sensoriamento proposto. Quando necessário, ou seja, quando a variável a ser sensorizada tiver sido tratada de forma apenas superficial na literatura previamente levantada, é realizada seleção pontual e complementar de artigos relevantes no detalhamento dessa variável.
- b) Estudo das características de cada técnica de posicionamento aplicável aos veículos-sensores. De forma semelhante ao item anterior, são selecionados artigos relevantes mais recentes que permitam o melhor detalhamento do desempenho das técnicas de posicionamento.

Por fim, apresenta-se estudo de campo de forma a complementar a discussão da relevância do posicionamento para a atividade de sensoriamento baseada em veículos. Como caso concreto, avalia-se a viabilidade da identificação das ondulações transversais (lombadas) do pavimento rodoviário a partir de aparelho celular fixado em veículo do transporte público. Além de analisar seu desempenho quanto à acurácia na identificação, usa-se o método orientativo proposto para

verificar a adequação da técnica de posicionamento empregada ao contexto e ao serviço considerados.

1.4 ESTRUTURA DO TEXTO

O presente texto é apresentado na seguinte estrutura:

- Capítulo 2 – Caracterização do veículo sensor. Apresentação do histórico de conceitos e termos empregados no contexto do uso de veículos na obtenção de variáveis de seu ambiente. Caracterização do veículo-sensor e descrição de seus subsistemas de sensoriamento, comunicação e posicionamento e tratamento dos dados.
- Capítulo 3 – Levantamento bibliográfico. Descrição dos 107 artigos levantados segundo a metodologia proposta, destacando suas contribuições para o estado da arte e para a construção do conceito do veículo usado como sensor.
- Capítulo 4 – Classificação. Descrição da categorização usada na descrição dos trabalhos levantados e explicação da contagem de termos e tecnologias empregados. Resultados quantitativos do quadro de mapeamento da literatura em veículos-sensores (Apêndice A).
- Capítulo 5 – Desenvolvimento do método orientativo a ser empregado na atividade de especificação das tecnologias de posicionamento em sistemas de veículos-sensores. Compreende a identificação de diretrizes para criação do método, a descrição dos parâmetros de desempenho do posicionamento a serem considerados, a caracterização dos possíveis serviços de sensoriamento baseados em veículos e a caracterização das técnicas de posicionamento aplicáveis a esses serviços.
- Capítulo 6 – Estudo de Campo. Apresentação do serviço proposto e das técnicas de posicionamento viáveis no contexto. Descrição de materiais e métodos empregados na coleta e análise dos dados. Análise dos resultados quanto à viabilidade do serviço e qualidade do posicionamento.

- Capítulo 7 – Conclusões. Apresentação, de forma sintetizada, dos resultados obtidos ao longo das etapas desenvolvidas pelo presente trabalho. Proposição de trabalhos futuros.

2 CARACTERIZAÇÃO DO VEÍCULO-SENSOR

O objetivo deste capítulo é caracterizar o veículo enquanto sensor móvel e evidenciar as funções existentes dentro de um sistema de sensoriamento baseado em veículos-sensores. Para tanto, descreve-se a evolução desse conceito e de ideias paralelas, evidenciando semelhanças e diferenças que permitam melhor esclarecer termos e expressões que serão empregados ao longo do presente trabalho.

2.1 CARRO-CONTROLE E VEÍCULO DE AVALIAÇÃO

O uso de veículos de serviço especialmente equipados para obtenção de variáveis do meio externo é corrente no levantamento das condições dos pavimentos ferroviário e rodoviário (BERNUCCI et al., 2006; PITA, 2006).

Em ferrovias, uma das principais referências históricas de aplicação desse conceito é o veículo de controle da via *Mauzin*, permitindo a auscultação do pavimento ferroviário e a identificação e quantificação de defeitos. O veículo foi desenvolvido na década de 1930 por André Mauzin, engenheiro chefe de manutenção da *Société Nationale des Chemin de Fer Français* (SNCF) e conhecido por ser um dos primeiros engenheiros ferroviários a introduzir a metodologia científica nesse domínio (TERRASSE, 2008). Desde então, os veículos de auscultação da rede ferroviária francesa, aparte seus melhoramentos tecnológicos, recebem o mesmo nome. A técnica empregada na primeira versão do carro obtém os dados do estado geométrico da via a partir de pequenas rodas em contato com o boleto dos trilhos e dissociadas das rodas principais do veículo. No passo seguinte, os deslocamentos das pequenas rodas, associados à geometria da via, transformam-se em sinais elétricos e são enviados à uma mesa registradora, onde é realizado o registro gráfico de cada parâmetro e das referências quilométricas e físicas do trajeto.

Os sensores de contato mecânico, como o descrito acima, possuem limitações de velocidade que inviabilizam seu uso em horário de operação sem afetar o tráfego.

Dessa forma, as tecnologias atuais empregam sensores sem contato mecânico, como sensores inerciais ou óticos embarcados no carro e sem contato com a via.

Em visita realizada à Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) em setembro de 2015, foi possível conhecer o carro-controlado empregado no monitoramento da qualidade do pavimento ferroviário da malha (Figura 1). A técnica utilizada no levantamento da geometria da via permanente e da catenária é a triangulação a *laser* (Figura 2), que consiste na varredura *laser* ao longo da seção transversal do trilho e no registro da luz refletida por câmeras posicionadas sobre cada trilho (PITA, 2006). Uma vez conhecidas as distâncias entre as câmeras e os emissores de luz, é possível estimar a geometria com precisão milimétrica (BVSYS, 2016). Essa técnica pode ser realizada a velocidades de até 100 km/h, superiores às desenvolvidas pelos trens em operação na malha metropolitana paulista. Além desse fato, a existência de equipamento embarcado de Controle Automático de Trem (*Automatic Train Control*, ATC), associado ao sistema de sinalização, viabiliza sua utilização em horário de operação.

Os parâmetros de via permanente obtidos pelo sistema de triangulação a *laser* são (FRA, 2006; CPTM, 2015):

- Bitola: distância entre as faces internas dos trilhos.
- Alinhamento longitudinal: variação na curvatura de cada trilho no plano horizontal.
- Nivelamento longitudinal: variação na curvatura de cada trilho na vertical.
- Nivelamento transversal: diferença de cotas entre os trilhos esquerdo e direito, podendo ser projetado (superelevação em curvas) ou não (desnivelamento).
- Torção: variação na superelevação entre pontos a uma distância fixa (10 metros para a CPTM), podendo ser projetada (curvas de transição entre trecho em tangente e curva circular) ou não (defeito de torção).
- Empeno: maior diferença de superelevação em um determinado trecho (de 20 metros para a CPTM).

- Desgaste do boleto dos trilhos.
- Geometria da rede aérea de alimentação (catenária). Levantamento deve ser realizado somente durante a noite devido à interferência da radiação solar no desempenho da triangulação a *laser*.

Figura 1 - Carro-controle da CPTM, modelo EM100U, da fabricante *Plasser & Theurer*

Fonte: próprio autor (2015)

Para identificação de defeitos internos aos trilhos (trincas ou bolhas), o carro-controle utiliza sondagem ultrassônica com velocidade máxima de operação de 15 km/h, inviabilizando o uso dessa função em horários de operação comercial e em operação simultânea ao levantamento da geometria da via por triangulação *laser*.

Como limitação do sistema adotado pela CPTM, ressalta-se que, apesar de existir receptor para posicionamento por satélite no veículo, o georreferenciamento dos dados se dá apenas a partir da hodometria e da identificação de pontos físicos notáveis (marcos) ao longo do trajeto. Como produto final, é gerado de forma automática um relatório com medições brutas, exceções em relação aos parâmetros de referência e velocidade do carro-controle, todos os dados referenciados à quilometragem da via.

Figura 2 - Unidade de controle do sistema de triangulação a *laser*, registrando a temperatura ambiente e a temperatura de operação em cada *laser*

Fonte: próprio autor (2015)

No domínio rodoviário, também é difundido o uso de veículos no levantamento de alguns parâmetros de irregularidades do pavimento, sejam em avaliação direta dos desvios da superfície, com ou sem contato e medindo as alturas do pavimento, sejam em avaliação indireta, por meio da medição de respostas do veículo ao pavimento (BERNUCCI et al., 2006; SAYERS; KARAMIHAS, 1998). Como exemplo dos medidores diretos, têm-se equipamentos portáteis e rebocáveis como o *Analyseur de profil en long* (APL) francês, apresentado na Figura 3. É constituído por braço rígido conectado a rodas em contato direto com o pavimento e pêndulo inercial como referência horizontal, operando a uma velocidade máxima de 70 km/h. O uso de ondas ultrassônicas ou de triangulação *laser* na obtenção das irregularidades constituem exemplos de medidores diretos sem contato. Os medidores indiretos, por sua vez, contemplam as iniciativas que embarcam sensores inerciais em veículos de teste e buscam definir a relação entre sua resposta às irregularidades e o indicador usualmente empregado na quantificação desse parâmetro, o *International Roughness Index* (IRI).

Figura 3 - *Analyseur de profil en long* (APL)

Fonte: VECTRA (2014)

2.2 TELEMETRIA

Em sentido amplo, telemetria é o processo altamente automatizado de comunicação que permite a realização de medidas e a coleta de dados em localizações remotas e a transmissão desses dados para fins de monitoramento. Como aplicações usuais, destacam-se estações meteorológicas remotas, pontos de medição da qualidade da água, monitoramento de satélites, foguetes e mísseis, monitoramento do desempenho de veículos, assim como qualquer outra atividade que dependa do acompanhamento remoto do estado ou da posição de objetos ou indivíduos (ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, 1999).

No domínio dos transportes, o sistema de telemetria permite acesso remoto a informações relacionadas à operação e ao desempenho de um ou mais veículos. Os

dados de telemetria são aqueles relacionados à segurança do veículo, posição, regime de condução do veículo, consumo de combustível, monitoramento de componentes veiculares, entre outros dados relacionados à operação do veículo. O sistema de telemetria veicular compreende sensores, monitores, controladores e demais eletrônicos embarcados, viabilizando a coleta de dados do funcionamento do veículo e a comunicação entre veículos e entre o veículo e a infraestrutura viária (KAPOLKA et al., 2003).

A maior motivação do uso em maior escala de sistemas de telemetria veiculares, de acordo com Gauthier (2014), seria sua aplicação por operadores logísticos no monitoramento do estilo de condução, objetivando economia de combustível e conservação dos demais componentes, e no planejamento de rotas. Contudo, diversas aplicações adicionais podem usufruir dos dados de telemetria, tais como sistemas de medição de tráfego, medição de emissão de gases e prevenção de acidentes (MANZIE; KIM; SHARMA, 2012).

2.3 PROBE VEHICLE E FLOATING CAR DATA

O já consolidado termo *probe vehicle*, ou veículo-sonda, refere-se usualmente ao monitoramento da fluidez do tráfego empregando tecnologias de comunicação veicular na coleta de dados como tempos de viagem e velocidades instantâneas. Como serviços beneficiados por essa fonte móvel de dados, citam-se aplicações ITS de monitoramento do tráfego, detecção de incidentes e indicação de rotas (USDOT, 2015).

Aerde; Mackinnon e Hellinga (1991) se valem do desenvolvimento das ferramentas de comunicação bidirecional entre veículos e centros de controle de tráfego para discutir o uso de *probe data* na geração das demandas de origem e destino (OD) em tempo real. Os autores avaliam como a taxa de utilização dos sistemas de guia de rota (*Route Guidance System*, RGS), nos quais o usuário entraria com seu destino a fim de ser orientado, afetaria a montagem dessa matriz OD e a qualidade das estimativas de tráfego.

Poucos anos mais tarde, Turner e Holdener (1995) conceituam *probe vehicle* como o veículo em comunicação contínua com uma central, responsável pelo registro da trajetória e da velocidade ao longo da viagem desenvolvida. Os veículos-sonda precisam ser instrumentados com equipamentos que permitam sua identificação, posicionamento e reportagem desses dados à central. Como exemplos desses equipamentos, os autores citam:

- Identificação Automática de Veículo - *Automatic Vehicle Identification* (AVI): utilização de *tags* (etiquetas) eletrônicas fixadas no veículo e sua identificação no momento da passagem por leitores localizados na infraestrutura viária. Uma vez que o registro da passagem também inclui o momento dessa ocorrência, o tempo de viagem de um veículo entre *tags* sucessivas pode ser trivialmente obtido. Além disso, a depender da distribuição e da frequência espacial dos identificadores instalados, também seria possível recuperar o trajeto efetivamente percorrido.
- Localização Automática de Veículo - *Automatic Vehicle Location* (AVL): o equipamento de bordo é responsável pelo posicionamento, usualmente por satélite, e pela transmissão automática desse dado a uma central de monitoramento, por rede celular ou comunicação por satélite. Como posto por Monico (2007), o termo genérico para os sistemas de posicionamento global por satélites artificiais é *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e o sistema usualmente empregado em AVL é o americano *Global Positioning System* (GPS).

Williams (2008) oferece uma definição mais ampla de *probe vehicle*, descrevendo-o como veículo equipado para coleta e transmissão de dados referentes ao tráfego, à via e ao ambiente. Contudo, a partir do levantamento, percebe-se o emprego desse termo estritamente em aplicações relacionadas ao tráfego ou na descrição de veículos especialmente instrumentados para uma atividade de monitoramento. Por exemplo, Thornton; Redmill e Coifman (2014) descrevem *probe vehicle* equipado com escâner *Light Detection and Ranging* (LIDAR) e dedicado exclusivamente à identificação de vagas de estacionamento. Mori et al. (2010) utilizam esse termo para descrever composições ferroviárias especialmente equipadas com microfones na identificação da condição de rolamento dos trilhos. Como principal vantagem em

ambos os casos, tem-se o aumento de eficiência do monitoramento e a não interferência na operação viária.

Adicionalmente, o termo *floating car data* (FCD), ou dados de veículos em movimento, é encontrado em referências como sinônimo de *probe data* (BAZZI; ZANELLA, 2015), destacando-se seu emprego majoritário no contexto do monitoramento das condições de fluidez de tráfego e referindo-se a dados provenientes do sistema de rastreamento dos veículos (MESSELODI et al., 2009). Ampliando esse conceito, Huber; Lädke e Ogger (1999) definem *extended floating car data* (XFCD, dados estendidos de veículos em movimento) como não apenas como o conjunto de dados de posições e deslocamentos, mas também incluindo dados ambientais que possam interferir nas condições de tráfego. Desta forma, o interesse dos autores recai apenas no aumento da eficiência do tráfego, definindo um campo de aplicação menos amplo do que aquele emergente do conceito de veículo enquanto sensor genérico.

2.4 VEÍCULO-SENSOR

Lee et al. (2006a) teriam sido os primeiros autores a introduzir o conceito de *vehicular sensor networks* (VSN, redes de sensores veiculares), valendo-se de iniciativas precedentes que já aplicavam esse conceito, mas não definiam um termo genérico para o uso de redes veiculares na obtenção de dados. As VSN surgiriam como uma especialização das tradicionais redes de sensores sem fio (*wireless sensor network*), tendo como principais diferenças a existência de nós móveis, maior capacidade computacional e de armazenamento e geração de maior volume de dados. Além disso, as VSN compartilham a mesma ideia das *vehicular ad hoc networks* (VANET, redes veiculares *ad hoc*²) ao se utilizarem da comunicação veículo-veículo e veículo-infraestrutura. Dentro desse conceito, ainda que o veículo não seja em si um sensor, o acoplamento de um conjunto de sensores confere-lhe a

² Rede composta unicamente de nós que se comunicam mutuamente de forma direta. Tipicamente criada de maneira espontânea, não requer infraestrutura formal e é limitada em tempo e espaço (WILLIAMS, 2008; IEEE, 2009).

capacidade de identificar as condições do meio externo, atributo que o torna um sistema sensor.

Também partindo de trabalhos precursores com conceitos convergentes, Abdelhamid; Hassanein e Takahara (2014) introduzem o termo *vehicle as a mobile sensor* (VaaMS), em tentativa de consolidar uma expressão única para o uso de veículos na obtenção de dados. Como vantagens dos sistemas de sensoriamento baseados em veículos, os autores destacam a maior cobertura espaço-temporal e a possibilidade de retransmissão de dados para um terceiro não necessariamente relacionado com o monitoramento do veículo em si ou com a operação viária. A Figura 4 ilustra as possibilidades de comunicação e de fluxo de dados em uma rede de sensores veiculares.

Figura 4 - Ilustração dos conceitos de veículo como sensor móvel (VaaMS) e de comunicação sem fio

Fonte: adaptado de Abdelhamid; Hassanein e Takahara (2014)

Pode-se considerar que o conceito de veículo como sensor móvel (VaaMS) e da formação de redes de sensores veiculares (VSN) surge como uma evolução de *probe vehicle* na qual é dada maior ênfase à utilização de veículos comuns em uma atividade de monitoramento ubíqua. Na prática, constitui-se em termo que emerge paralelamente ao conceito de monitoramento nas cidades inteligentes (*smart cities*) e uso dos diversos dispositivos existentes no ambiente urbano nesta atividade, como câmeras de monitoramento, redes de sensoriamento do ar e da água, sensores veiculares, entre outros (AHMAD et al., 2015; RADAK et al., 2016). Outro conceito

associado refere-se à interconexão e comunicação, por meio da *internet*, entre diferentes dispositivos, a chamada *Internet das Coisas* (*Internet of Things, IoT*), criando oportunidade de monitoramento pervasivo e constituindo-se fonte de volumosos dados.

A partir da discussão conceitual do veículo-sensor, é possível distinguir quatro principais funções na obtenção de dados, de forma similar aos sistemas tradicionais de rastreamento de veículos (RODRIGUES; CUGNASCA; FILHO, 2009): sensoriamento, posicionamento, comunicação e gerenciamento dos dados. Os itens a seguir descreverão as características desses subsistemas associados a um sistema de sensoriamento baseado em veículos.

2.4.1 Sensoriamento

O subsistema de sensoriamento compreende o conjunto de sensores empregados na aquisição de dados da variável que se deseja monitorar, relacionada ao estado do veículo ou às condições do ambiente externo. Como já destacado, pode ser tanto um conjunto de sensores previamente instalados no veículo ou componentes adicionais embarcados unicamente para o monitoramento desejado.

2.4.2 Posicionamento

O sistema de posicionamento é responsável pelo georreferenciamento dos dados provenientes do sistema de sensoriamento. Além de situar os dados coletados no espaço, também tem como função situá-los no tempo. A fim de esclarecer questões recorrentes no estudo das informações espaciais, os próximos parágrafos se ocuparão de realizar a definição mais precisa possível de diferentes termos empregados nesse domínio e em áreas correlatas.

A atividade de posicionamento refere-se à atribuição de coordenadas (dados posicionais) ao objeto monitorado em relação a um sistema de referência bem definido, ou seja, com origem e orientação dos eixos definidas (MONICO, 2007). O

posicionamento pode ser absoluto, diretamente em relação ao sistema de coordenadas, ou relativo, em relação a uma posição prévia (HOFMANN-WELLENHOF; LEGAT; WIESER, 2003).

O termo localização, diferentemente, refere-se à descrição do objeto monitorado em termos de suas relações topológicas com os elementos de seu entorno (HOFMANN-WELLENHOF; LEGAT; WIESER, 2003). Uma vez que a topologia é a matemática e a ciência dos relacionamentos geométricos, os relacionamentos topológicos seriam propriedades meramente qualitativas (não métricas) de objetos geográficos, tais como pertinência e adjacência (LONGLEY et al., 2013). Desta forma, a localização oferece como produto a situação do objeto em relação a uma referência simbólica (pertinência ou adjacência a edifício x, avenida y, município z, etc.).

Considerando suas aplicações em transportes, os sistemas de posicionamento e localização podem ser empregados na atividade de rastreamento de veículos, isto é, o acompanhamento do estado do veículo ao longo de seu deslocamento para fins de gerenciamento (RODRIGUES; CUGNASCA; FILHO, 2009). O conceito de navegação, por sua vez, combina o conceito de posicionamento ao de guiagem, que é determinação das manobras a serem desenvolvidas nas etapas seguintes do deslocamento de um veículo. Em outras palavras, significa definir o vetor de estado do veículo (posição, velocidade e atitude) e a trajetória a ser seguida para chegada a um destino definido (BLITZKOW, 2004).

Do ponto de vista do veículo-sensor, no qual a atividade de monitoramento de um fenômeno pode ser comparada à atividade de mapeamento de sua ocorrência no espaço, o conceito de posicionamento apresenta-se mais adequado por ser aquele mais geral e por estar efetivamente associado à uma atividade de georreferenciamento de dados espaciais.

2.4.3 Comunicação

O subsistema de comunicação é responsável pela transferência dos dados coletados para uma parte genérica (V2X), podendo ser realizada para outros veículos (V2V), para a infraestrutura de transporte (V2I), para pedestres (V2P,

vehicle-to-pedestrian) ou para a rede de comunicação existente (V2N, *vehicle-to-network*), como apontado por Sun et al. (2016).

Nos Serviços Inteligentes de Transporte, é necessário fazer a distinção entre serviços a bordo, inteiramente desenvolvidos no interior de um veículo e que independem da transferência de dados, e serviços externos, que dependem da transmissão de dados a veículos vizinhos, ao gestor da infraestrutura viária ou a um órgão terceiro interessado (WILLIAMS, 2008). O conceito de veículo-sensor adotado pela presente dissertação adequa-se à segunda definição, sendo possível discernir a necessidade do sistema de comunicação para viabilizar seu funcionamento.

Compreender os requisitos de desempenho em comunicação para cada serviço ITS considerado é questão fundamental para a especificação das tecnologias a serem adotadas. A literatura relacionada à comunicação veicular e à sua utilização pelos diversos serviços de transporte é ampla e área de pesquisa de destacado interesse, uma vez que se trata de base para a introdução de serviços autônomos e, em horizonte posterior, dos veículos autônomos (NHTSA, 2013).

Como principais parâmetros de desempenho dos serviços de comunicação, pode-se citar (DAR et al., 2010) :

- a) Modo de comunicação: se o serviço exige comunicação V2V, V2I e/ou outros, modos que podem ser diretos (sem parte intermediadora) ou indiretos.
- b) Direcionalidade: transferência de dados unidirecional ou bidirecional.
- c) Largura de banda operacional: intervalo de frequências no qual o canal de comunicação opera.
- d) Latência: o intervalo de tempo (atraso) entre o instante de envio dos dados e aquele de recepção em seu destino (IEEE, 2004).
- e) Taxa de transferência de dados: a taxa com a qual um canal de comunicação transporta, medida em bits por segundo (b/s) (IEEE, 2004)
- f) Alcance: máxima distância entre duas unidades de comunicação que pode ser suportada por um meio de comunicação.

- g) Modo de transmissão: se os dados são transmitidos a um único destino particular (*unicast*), a múltiplos destinos (*broadcast*) ou transmitida apenas a destinos de uma região específica (*geocast*). É possível haver pequenas variações desses modos.
- h) Confiabilidade da mensagem: garantia de que os dados cheguem ao destino com taxa de erro suficientemente baixa para dada aplicação.
- i) Prioridade da mensagem: medida de sensibilidade da aplicação ao atraso, que define sua preferência na transferência dos dados em relação às demais aplicações.

2.4.4 Tratamento dos dados

O subsistema de tratamento ou gerenciamento dos dados é o responsável pela transformação dos dados coletados em informações úteis, gerando produtos cartográficos, relatórios e índices que sintetizam o monitoramento realizado. A depender da natureza da aplicação (tempo real ou não, complexidade do processamento, tomada de decisão autônoma ou não, etc.), esta atividade pode ser realizada, de forma parcial ou completa, tanto no veículo quanto em um centro de processamento de dados.

3 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Este capítulo apresentará o levantamento bibliográfico realizado, descrevendo os procedimentos adotados para melhor mapeamento do estado da arte em veículos sensores e se propondo a apresentar cada artigo a partir de suas principais contribuições para essa área de pesquisa. A partir do escopo estabelecido pela presente pesquisa, realizou-se levantamento de artigos na área de sensores veiculares e de redes de sensores veiculares, seguindo procedimentos estabelecidos no item referente aos materiais e métodos. As expressões de busca adotadas, associadas a sensores veiculares ("*vehic** AND *sens**"), ao sensoriamento no ambiente ferroviário ("*rail** AND *sens**"), aos *probe vehicles* e aos dados de *floating cars*, pretenderam abranger as diferentes definições encontradas na literatura para o uso do veículo enquanto um sensor. Ainda não se verifica a existência de um termo único, em contraste à consolidação dos termos *probe vehicle* e *floating car* no domínio da obtenção de dados de fluidez do tráfego. Esse fato reflete o não amadurecimento dessa área de pesquisa e evidencia a necessidade de iniciativas que busquem definir melhor os conceitos empregados nesse contexto.

Para o levantamento inicial de artigos, limitou-se a busca aos trabalhos publicados a partir de 2011 e publicados em periódicos relevantes na área segundo as métricas disponibilizadas pelos sistemas de busca. Posteriormente, a partir da análise das referências bibliográficas citadas por esses, foram analisados trabalhos anteriores relevantes para a pesquisa, independentemente da data de publicação. Como critério complementar para seleção de artigos, o trabalho considerou a relevância de cada sistema sensor proposto ou implantado de fato, caracterizada pelo ineditismo de métodos propostos ou pela abordagem de questões relevantes e pouco estudadas na área. Dessa forma, pretende-se coletar uma amostra representativa do estado da arte no campo dos veículos-sensores.

Realizou-se um agrupamento dos trabalhos levantado de acordo com sua relevância para o escopo da dissertação ou seu tema central. Ressalta-se que, apesar da divisão realizada, todos os artigos tratam, mesmo que lateralmente, do uso de sensores veiculares e das atividades de sensoriamento baseadas em veículos. Além disso, o fato de um artigo ser atribuído a um determinado grupo não significa que o

mesmo está restrito a esse tema, mas indica que esse é seu assunto central. Os grupos são:

- Artigos principais: são os trabalhos que tratam do conceito do veículo-sensor ou realizam discussão relevante nos campos de posicionamento, comunicação e sensoriamento nesse contexto. Esses artigos fornecem categorizações e modelos que servirão de base para a presente dissertação.
- Artigos na área de redes veiculares e redes de sensores sem fio: trabalhos cujo cerne está na comunicação entre veículos e sua aplicação no sensoriamento do ambiente de circulação.
- Artigos na área do posicionamento veicular: novas propostas de técnicas de posicionamento, buscando superar as limitações dos sistemas usuais, e discussão de questões relevantes nesse tema no contexto dos veículos-sensores.
- Artigos centrados nas técnicas de sensoriamento: discussão dos sensores embarcados e do tratamento dos dados coletados.

A seguir, serão apresentados os artigos levantados segundo esse agrupamento. Escolheu-se apresentar o material bibliográfico de forma individualizada, apresentando cada artigo levantado, por melhor representar a forma como a presente pesquisa se desenvolveu na caracterização do estado da arte e na identificação de lacuna e pontos a serem estudados.

3.1 ARTIGOS PRINCIPAIS

Neste item, serão apresentados os artigos que contribuem para o desenvolvimento do conceito do veículo-sensor e/ou realizam relevantes apontamentos referentes ao posicionamento nesse contexto.

3.1.1 Evolução do conceito de uso do veículo enquanto sensor

O conceito de redes de sensores veiculares (VSN), baseado no uso do veículo na obtenção de variáveis externas, surge como uma especialização das redes de sensores sem fio (WSN) e das VANETS. Lee et al. (2006a) introduzem esse novo paradigma e destacam-no como ferramenta valiosa de obtenção de dados no ambiente urbano. Segundo os autores, em uma VSN, cada veículo seria responsável por sensoriar um ou mais fenômenos, transmitir mensagens a outros veículos ou *infostations* (estações de informação), que recebem os dados e estão localizadas na infraestrutura urbana, e processar os dados sensoriados. Como vantagens a outros sistemas de sensoriamento, citam-se: a) veículos não têm limitações de energia para este fim; b) veículos podem ser facilmente equipados com capacidade de processamento adequada para grande gama de aplicações; c) unidades de armazenamento de dados também podem ser facilmente instaladas. O artigo dedica-se, por fim, a iniciar discussão de arquiteturas de transmissão e armazenamento de dados, questão crítica tendo em conta a necessidade de uma indexação dos dados eficiente para uma rede que gera grande montante de dados e cujos nós são móveis.

Em trabalho posterior, o mesmo grupo de pesquisa Lee et al. (2006b) discutem a questão do veículo-sensor inteiramente a partir de viés da arquitetura de comunicação necessária para difundir os dados sensoriados. Para aplicações não-críticas de monitoramento urbano e considerando o mesmo cenário apresentado no primeiro trabalho, os autores especificam um sistema de difusão de dados chamado *MobEyes*. Esse sistema busca se aproveitar da mobilidade e da capacidade de processamento instalada nos veículos para pré-processar, sumarizar e difundir, de forma oportunística, conjuntos de dados sensoriados. Este último passo é relevante quando se considera que o veículo pode coletar diferentes dados para diferentes aplicações e transmiti-los apenas para os agentes interessados nos mesmos. Como exemplo, o artigo cita sistema de verificação de numeração das placas dos veículos vizinhos, no qual o veículo-sensor coleta os dados, mas os envia apenas para nós da rede referentes à autoridade policial. Paralelamente, no monitoramento ambiental, o veículo realizaria o sumário dos dados referentes apenas a essa

aplicação e a transmissão oportunística apenas a nós coletores interessados. Como motivação, têm-se aplicações baseadas em vídeo, nas quais apenas a informação já tratada (por exemplo, identificação da placa de veículo) é transmitida. Como resultados de testes considerando centenas de nós veiculares e protocolos de rádio comunicação veicular, verificou-se a escalabilidade desse protocolo a milhares de nós com custos limitados e latência tolerável. Por não se tratar de ponto central do trabalho desses autores, a discussão acerca da visão computacional e de aplicações baseadas em vídeo será realizada na descrição de artigos cujo foco esteja nesse tema, em seções seguintes.

Com motivação similar, buscando lidar com grandes volumes de dados, Hull et al. (2006) propõem um sistema de coleta, processamento, distribuição e visualização de dados provenientes de sensores embarcados em unidades móveis. Chamado de *CarTel*, considera pré-processamento local de dados e envio dos mesmos a partir de conectividade oportunística ou uso de *data muling*, isto é, uso dos veículos como portadores físicos dos dados. Dado o fato de a conectividade ser intermitente, resultando em rede com maior latência, o sistema destina-se a aplicação em redes tolerantes a atraso. Além disso, providencia uma interface de programação simples, orientada por requisições (*queries*) e aplicável para dados em grandes quantidades e heterogêneos. O *CarTel* foi implementado em seis veículos trafegando por ambiente urbano ao longo de um ano, para três aplicações distintas: cálculo de tempos de viagem, análise de sinais públicos de *Wi-Fi* e diagnósticos automotivos. Como resultado, verificou-se a viabilidade do sistema no tratamento de grandes quantidades de dados, restando questões a serem resolvidas na garantia de privacidade, no uso do sistema em tarefas de predição e em redes com números maiores de nós.

Ressalta-se que Hull et al. (2006) não definem um termo específico para o uso de veículos enquanto sensores, apenas citam a possibilidade do uso de sensores móveis em diversos dispositivos, como *tablets* e celulares, e seu uso em veículos como uma possibilidade. Apesar disso, uma contribuição relevante desse trabalho para a construção do conceito de veículo-sensor é a listagem (não-exaustiva) das diversas oportunidades de sensoriamento baseadas em veículo:

- Monitoramento ambiental, a partir do uso de sensores de poluição.

- Monitoramento do pavimento, embarcando sensores (por exemplo, de vibração ou de imagem) em veículos para monitoramento das condições das vias, identificando buracos ou presença de água ou gelo na pista.
- Diagnósticos automotivos, obtendo informação que possam prevenir ocorrências e monitorar a qualidade da condução.
- Imageamento (*geo-imaging*), capturando imagens e vídeos para as mais diferentes funções, como definição de rotas definida a partir de pontos de referência.
- Veículo como “mula” de dados - *Data muling*: os carros podem ser utilizados como meio de transporte físico de dados de redes remotas de sensoriamento, coletando os dados na passagem pelos nós sensores e descarregando-os em um ponto de acesso.

Também destacando os desafios de conectividade e transferência de dados para sensores móveis, Piran; Murthy e Rama (2011) cunham o termo *Vehicular Ad Hoc and Sensor Network* (VASNET) como uma especialização das *Mobile ad hoc networks* (MANET) e VANET. Como aplicação, os autores propõem utilização do conceito na quantificação de fluxos de tráfego em rodovias, em sistemas de prevenção e notificação de acidentes e de fiscalização viária. Nessa modalidade de rede, existiriam dois tipos de nós: embarcados em veículos (móveis), utilizados no sensoriamento das velocidades desenvolvidas, e nós instalados ao longo da infraestrutura viária (estacionários), que recebem os dados sensorizados e transmitem-nos a uma central. Esses nós se conectariam por comunicação sem fio de curto e médio alcance.

Abdelhamid; Hassanein e Takahara (2014), já citados no presente trabalho, introduzem o termo *Vehicle as a Mobile Sensor* (VaaMS, Veículo como um Sensor Móvel) para descrever sistemas sensores móveis baseados em veículos. Os autores se propuseram a mostrar como os inúmeros sensores existentes nos veículos, ou adicionados, e o desenvolvimento das interfaces de comunicação V2X transformam o veículo em uma relevante fonte de dados não apenas de sua operação, mas também do ambiente ao seu redor. A mobilidade desses sensores, que percorrem toda a infraestrutura viária, resulta em maior área de cobertura e maior frequência de

obtenção dos dados, com relativo baixo custo. Destaca-se também o fato de o sensoriamento urbano, de forma genérica, ter ganhado maior interesse com a emergência dos conceitos de compartilhamento e acesso global de informações.

Nesse cenário, esses autores afirmam que aplicações podem ser propostas para gerar informações úteis para o próprio condutor, para veículos próximos ou podem prover dados a serem reportados a uma terceira parte como, por exemplo, uma agência de monitoramento ambiental. Desta forma, os sensoriamentos das condições climáticas, da infraestrutura viária ou do tráfego são citados como potenciais aplicações, com processamento local ou centralizado e publicação das informações por diversos meios, como painéis de mensagem variável, sistemas de rádio da via ou aplicações baseadas em *internet*.

Outra contribuição do artigo de Abdelhamid; Hassanein e Takahara (2014) é a proposição de uma categorização dos sensores embarcados, instalados de fábrica, e discute a representatividade dos mesmos em termos de possíveis serviços ITS. Para ilustrar a relevância desse trabalho, os autores afirmam que um carro norte-americano médio possui aproximadamente 70 sensores instalados como suporte à sua operação. Os sensores podem ser classificados quanto ao domínio das aplicações às quais se destinam:

- Sensores de segurança: inclui sensores de distância como *Radio Detection and Ranging* (RADAR), LIDAR, sensores ultrassônicos e capacitivos, além de câmeras, velocímetros, sensores de orientação e aceleração (sensores inerciais) e sistema de posicionamento e navegação. Essa categoria suporta Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor (*Advanced Driver Assistance Systems*, ADAS), como o de prevenção de colisão, assistentes de direção, mudança de faixa e estacionamento, etc.
- Sensores de diagnóstico: destinados à detecção de mau funcionamento de elementos do carro, podendo estar localizados no trem de força (ex., monitoramento do nível e da qualidade do combustível), no chassi (ex., sensor de medição da pressão do pneu) e na cabine (ex., sensor usado no diagnóstico do mau funcionamento dos *airbags*).

- Sensores de conveniência: sensoriamento do conforto (temperatura interna, umidade e regulação do ar condicionado) e das condições de dirigibilidade (sensor de chuva, de névoa, etc).
- Sensores de monitoramento do ambiente: grande parte dos sensores citados nos itens anteriores pode ser empregada em serviços ITS no alerta das condições de rolamento, de tráfego e climáticas. Como exemplo, cita-se o sensor de temperatura externa do sistema de ar condicionado e o sensor de distância para detecção das condições de tráfego. Além disso, sensores podem ser instalados especificamente para esse monitoramento, como câmeras e microfones instalados para detecção das condições do pavimento.

Por fim, Ilarri et al. (2015) realizam trabalho extenso de revisão bibliográfica no campo dos Sistemas de Recomendação Sensíveis ao Contexto (*Context-Sensitive Systems*, CAS) em cenários móveis. Esses sistemas levam em conta diversos fatores do contexto, incluindo o estado do usuário, sua localização e as características do ambiente, para gerar sugestões, de diferentes tipos, que possam ser úteis ao usuário. Como exemplos de CSS, têm-se os Serviços Baseados em Localização (*Location Based Services*, LBS), que consideram a localização do usuário para oferta de serviço personalizado.

Como contribuição ao trabalho, o artigo dedica um tópico à discussão dos CSS no contexto da detecção de eventos em transportes, levantando conjunto de artigos que contribui para o esclarecimento dos diversos termos utilizados nesse campo de estudos. Os autores identificam três grandes categorias de uso do veículo na obtenção de dados, ainda que eles prefiram não utilizar um termo para definir esse conceito e se limitem a relatar diferentes “usos de sensores a bordo”. O primeiro desses usos compreende o monitoramento do tráfego, contexto no qual o termo *probe vehicle* (veículo-sonda) e *floating car* são usualmente empregados. Em uma segunda categoria, tem-se o uso do veículo em atividades de “vigilância e monitoramento cooperativos”, nas quais diferentes tipos de sensores embarcados são empregados para monitorar o ambiente externo. Por fim, a terceira modalidade seria a detecção de eventos de interesse do condutor ou por sua segurança, tendo como exemplos os sistemas de auxílio à direção, de prevenção de colisões e de

detecção de pista escorregadia. Além dessas considerações, Ilarri et al. (2015) também elencam questões a serem discutidas, em pesquisas futuras, nesse campo de pesquisa:

- Aumento da quantidade de dados sensorizados disponibilizados. Crescimento na obtenção de dados por redes de sensores, identificadas como componentes-chave das cidades inteligentes (*smart cities*). O volume e a heterogeneidade dos dados surgem como desafios.
- Privacidade e segurança. Usuários poder ser refratários à ideia de disponibilizar dados vinculados à localização, sendo necessário permitir a definição de diferentes níveis de privacidade para os dados obtidos, a depender da aplicação. Além disso, o espaço de armazenamento de dados deve ser protegido de forma a não permitir acesso de indivíduos ou entidades alheios a um dado sistema de monitoramento.

3.1.2 Veículo-sensor e posicionamento como parâmetro relevante

Shladover e Tan (2006) realizam trabalho de análise da precisão requerida no posicionamento veicular para Sistemas Cooperativos de Alerta de Colisões (*Cooperative Collision Warning, CCW*), caracterizados pelo envio de alertas por meio da comunicação veicular. Os autores identificaram como lacuna, naquele momento, o estudo do efeito da precisão posicional na consistência desse alerta. Como consistência, entende-se a propriedade de responder consistentemente a cenários similares, permitindo distinção clara entre cenários de perigo e não perigo. Outro problema encontrado na literatura foi a falta de estudos acerca dos critérios e níveis de desempenho a serem utilizados, além da consistência, para melhor avaliar a qualidade desses sistemas de alerta. Como contribuição, os autores realizaram estudo das probabilidades de envio bem-sucedido de alarmes em função da acurácia posicional individual dos veículos. Para tanto, levou-se em conta a necessidade de identificação correta de faixas de rolamento e interseções e do cálculo da distância para veículos próximos. Os resultados mostraram que seria necessário um desvio-padrão em posição de 0,5 m para atender aos requisitos das

aplicações de prevenção de colisões, precisão a partir do qual a probabilidade de sucesso seria aproximadamente igual a 1.

Do trabalho de Shladover e Tan (2006), a questão mais interessante é a discussão dos requisitos posicionais em função da aplicação. Contudo, os autores limitaram-se a avaliar a precisão do posicionamento sem levantar outros critérios que também influenciariam o sucesso do sistema de alerta de colisões, como a disponibilidade. No caso do veículo-sensor, essa mesma discussão seria válida tendo em conta a natureza da variável a ser monitorada, sendo necessário discutir, para cada uma delas, quais seriam os critérios e níveis de desempenho adequados.

Na continuidade do trabalho de definição de VASNET, apresentado no item anterior, Piran et al. (2011) discutem a localização dos nós sensores enquanto um tópico até então pouco explorado no campo das VASNET. De fato, dos trabalhos levantados na presente pesquisa, este é o primeiro que traz a questão do posicionamento como relevante no contexto das redes de sensores veiculares e similares. No caso das VASNET, o posicionamento se faz necessário tanto para o georreferenciamento dos eventos em si quanto para os algoritmos de disseminação de dados baseados em localização. Esses autores partem dos problemas de falta de disponibilidade relacionados ao posicionamento por GPS e de como esse fato inviabilizaria aplicações de segurança ou de fiscalização. A alternativa proposta seria o posicionamento baseado em radiolocalização, por trilateração, a partir dos nós fixos dispostos ao longo das rodovias. Utilizando programa de simulação para avaliar a viabilidade desse sistema de posicionamento, os autores verificaram que um resultado para a posição do veículo pode ser obtido em até 93% do tempo, dependendo de parâmetros como a densidade de nós fixos ao longo da via, o alcance da comunicação sem fio e o bom funcionamento dos nós fixos. Contudo, como relevante limitação desse trabalho, os autores não discutem qual seria a acurácia da posição calculada, limitando-se a dizer apenas que as coordenadas dos veículos seriam obtidas, quando possível, de forma “exata de acordo com as fórmulas de trilateração”.

Durazo-Cardenas et al. (2014) também trazem o posicionamento como parâmetro relevante no cenário dos veículos-sensores. Desta vez, a análise se dá no contexto dos chamados “sistemas autoconscientes de manutenção ferroviária”,

caracterizados pelo uso de sensores embarcados nos veículos como forma de obter os dados necessários para avaliação das condições da via e automatização dos sistemas de alerta e solicitação de manutenção e renovação. Na "ferrovia do futuro", esses sistemas devem trazer informações acuradas e em tempo oportuno, minimizando os tempos de interrupção de trechos e de presença de operários na via para realização de trabalhos. Para tanto, a localização precisa e em tempo real dos trens-sensores seria um importante parâmetro da qualidade desse sistema de monitoramento.

Considerando esse objetivo, Durazo-Cardenas et al. (2014) se dedicam a trabalho extenso de revisão e classificação das tecnologias de posicionamento utilizadas no domínio ferroviário. Os autores verificam que, ainda que a localização de trens esteja majoritariamente baseada nas tradicionais tecnologias de sinalização, caracterizadas por dispositivos instalados na via, há um grande campo de pesquisa no uso das demais tecnologias de posicionamento no monitoramento das composições. Segundo esses autores, a revisão bibliográfica evidencia que a provável tecnologia base para o posicionamento da "ferrovia do futuro" seria o GNSS, uma solução de baixo custo a ser acoplada a outras técnicas complementares, como correspondência ao mapa³ e navegação estimada⁴. Verificou-se a tendência de se integrar diferentes técnicas de localização para um a solução única e o uso dos filtros de Kalman⁵ como o algoritmo empregado na fusão dos sensores de posição. Além disso, buscam-se alternativas que independam do

³ *Map matching*, técnica de determinação da posição a partir da integração entre os dados de posicionamento e o mapa digital do sistema viário. Em outras palavras, busca aplicar as restrições físicas associadas à malha viária para a correção de uma solução de posição inicial (QUDDUS; OCHIENG; NOLAND, 2007b; GROVES, 2008).

⁴ *Dead reckoning* ou *deduced reckoning*, técnica de posicionamento na qual se estima a posição de um veículo com base no cálculo dos deslocamentos linear e angular realizados a partir do último ponto de coordenadas conhecidas. A estimativa dos deslocamentos é realizada por sensores de movimento ou hodometria visual. Trata-se de uma técnica de posicionamento relativa e, portanto, auxiliar, necessitando de outra tecnologia para a fixação de coordenadas iniciais (QUDDUS; OCHIENG; NOLAND, 2007b; GROVES, 2008; BALLARDINI et al., 2015).

⁵ Filtro de Kalman é um "método ótimo de estimar o vetor estado de um sistema dinâmico a partir de observações" (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015). Para tanto, o algoritmo usa conhecimento prévio das propriedades determinísticas e estocásticas dos parâmetros do sistema considerado e das observações. Complementariamente, realiza medida da correlação entre os erros na estimativa dos diferentes parâmetros (GROVES, 2008). Por ser recursivo, o estado estimado pode ser atualizado assim que novas observações são realizadas. Além disso, é um método ótimo no sentido em que, se todo o ruído tiver distribuição normal, o método minimiza o erro médio quadrático (KLEEMAN, 1996).

GPS norte-americano, sendo desenvolvidos diversos programas de pesquisa em localização ferroviária no âmbito do Galileo, programa europeu de posicionamento por satélite e ainda não plenamente operacional (EUROPEAN COMMISSION, 2016).

Como contribuição ao estado da arte, Durazo-Cardenas et al. (2014) discutem modelos de integração de dados, tanto de posicionamento quanto de sensoriamento de variáveis da via, como forma de automatizar processos de decisão e o planejamento das atividades de manutenção. Utilizando o modelo de fusão de dados da *Joint Directors of Laboratories* (JDL), das Forças Armadas Americanas, os autores consideram o problema central a partir da seguinte hierarquia:

- Fontes de dados: posição e condições da via.
- Nível 0 de processamento: localização do estado da via de forma pouco refinada.
- Nível 1, refinamento dos objetos: localização e identificação dos objetos.
- Nível 2, avaliação da situação: identificação e análise de defeitos, avaliação de consequências para operação.
- Nível 3, avaliação dos riscos: necessidade de intervenção imediata ou não, compromissos.
- Nível 4, processo de refinamento das estimativas (defeito e posição) e das avaliações conforme inspeções subsequentes.

Como é possível perceber pelos níveis de processamento de fusão de dados, o posicionamento preciso surge como condição básica para automatização do sistema. Contudo, os autores citam que as proposições encontradas na literatura têm falhado em mitigar a incerteza de forma satisfatória para os requisitos da "ferrovia do futuro" e para o monitoramento das condições da via permanente ferroviária, fator crítico na garantia da segurança ferroviária. As duas questões mais críticas seriam a disponibilidade da solução de posição por todo o ambiente ferroviário e acurácia que permita a distinção entre vias paralelas com elevado grau de confiabilidade (RSSB, 2014).

Por fim, Voland e Asche (2017), pesquisadores em Geografia, diferenciam-se ao apresentar a questão dos sistemas XFCD em abordagem transdisciplinar e por frisar o caráter espaço-temporal dos dados coletados por veículos. Os autores afirmam que o potencial geoespacial dos dados coletados de veículos, com destaque para os associados ao tráfego e a aplicações ambientais, ainda não tem sido completamente explorado. Dessa forma, o trabalho discute as questões associadas à visualização cartográfica como forma de se extrair informações do montante de dados oriundos de veículos, transformando-os em informações aptas à percepção, exploração e análise dos tomadores de decisão. Utilizando as palavras dos autores, busca-se preencher lacuna na literatura ao contemplar, em vez da comunicação máquina-máquina, a comunicação máquina-humano no contexto dos sistemas FCD. De forma concreta, o artigo apresenta e discute ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica *online* (*WebSIG*), isto é, ferramentas de armazenamento, processamento e visualização *online* de dados geográficos que permitam atender ao objetivo definido para aplicações ambientais e de tráfego. Como pontos a serem aprofundados na continuidade da pesquisa, os autores citam a automatização das atividades de processamento e visualização.

3.2 ARTIGOS CENTRADOS NO POSICIONAMENTO VEICULAR

Neste item, serão apresentados os artigos que discutem as técnicas de posicionamento veicular empregadas em diversos contextos, incluindo o cenário de utilização do veículo enquanto sensor.

3.2.1 Aspectos gerais de posicionamento veicular

Ochieng e Sauer (2002) realizam relevante trabalho na descrição do desempenho do Sistema Global de Posicionamento (GPS) para diferentes níveis de serviço na área de transportes. Os autores se propõem a descrever as principais características e os requerimentos posicionais para cada aplicação, chamadas naquele contexto de *Advanced Transport Telematics Systems* (ATTS). Os autores se valem das métricas

de desempenho usuais na análise de sistemas de navegação aeroviários para propor parâmetros de descrição dos requerimentos: acurácia, integridade (medida de confiabilidade) e disponibilidade. Para cada grupo de serviço, são estabelecidos níveis a serem atingidos em cada parâmetro de qualidade. Por fim, estudando as características do posicionamento GPS por ponto simples e do posicionamento diferencial (DGPS, posicionamento em relação a estação de coordenada conhecida), os autores verificam a adequação dessa tecnologia a cada grupo de serviço de transporte. Ressalta-se que, naquele contexto, o único serviço citado que se aproxima do conceito do veículo-sensor é o de "coleta de dados para planejamento". De tal modo, o trabalho fornece orientações iniciais na construção de método de especificação para serviços de sensoriamento, ressaltando que a presente dissertação busca analisar quais outros parâmetros seriam relevantes para esse novo grupo de serviços e para as diversas tecnologias de posicionamento existentes.

O trabalho de revisão bibliográfica de Skog e Handel (2009) no campo do posicionamento veicular aplicado a rastreamento e navegação fornece ferramentas de discussão dos requisitos a serem considerados na especificação das tecnologias empregadas. Com foco em aplicações veiculares críticas em termos de segurança, estuda-se o desempenho dos diferentes filtros empregados na integração do posicionamento por satélite com dados de diversos sensores, tendo como objetivo incrementar a qualidade do sistema de posicionamento. Outra grande contribuição dos autores para o presente trabalho, contudo, é a discussão de possíveis medidas de desempenho (figuras de mérito) que descrevam o sistema de posicionamento. São citadas quatro medidas como aquelas mais representativas tendo em vista o escopo do trabalho de Skog e Handel (2009): acurácia, integridade (medida de confiabilidade), disponibilidade e continuidade do serviço. Como conclusão, destaca-se a necessidade de desenvolvimento de sistemas que atendam aos requisitos para aplicações críticas (altas acurácia e integridade, além de completas continuidade e disponibilidade do serviço), mas possuam custo e complexidade toleráveis.

Groves (2013) discute a crescente demanda por maior acurácia e confiabilidade as atividades de navegação e posicionamento de veículos, assim como a necessidade de especificar sistemas aptos a atender a diferentes níveis de exigência quanto à qualidade posicional. O autor aponta que os sistemas multissensores são

correntemente apresentados na literatura como paradigma para o futuro dessas atividades. Contudo, o consequente aumento de sua complexidade gera dificuldades quanto à integração entre tecnologias de diferentes naturezas e à incorporação de novas tecnologias. Como solução, Groves (2013) propõe uma lógica modular para um sistema de posicionamento ou navegação, na qual cada componente deve ser projetado para atender aos requisitos e ao contexto de um amplo espectro de diferentes aplicações. Ademais, o sistema deve ser projetado como a integração de múltiplos subsistemas, reduzindo o grau de conhecimento necessário do sistema como um todo para a realização de alterações ou adições, bem como eliminando a dependência de soluções proprietárias. Como consequência, novos métodos e tecnologias poderiam ser adicionadas sem a necessidade de se reprojetar o sistema.

Adicionalmente, não sendo o objetivo principal de seu artigo, é necessário destacar que Groves (2013) é superficial na descrição dos diferentes requisitos posicionais, limitando-se a apresentar questões genéricas e qualitativas associadas a quatro grandes grupos de usuários: consumidores finais, profissionais, pesquisadores e militares. A seguir, são apresentados os principais pontos discutidos pelo autor para cada grupo de usuários:

- a) Consumidores finais: a minimização do custo é apontada como requisito-chave, limitando tamanho, peso e consumo de energia do sistema. Ainda que secundário, o desempenho do sistema deve ser suficiente para torná-lo atrativo ao usuário.
- b) Profissionais: minimização de custo é importante apenas na atividade de rastreamento de frotas. Em atividades de navegação aérea e marítima, a confiabilidade é o parâmetro mais crítico. Para atividades de mapeamento, a acurácia torna-se mais importante.
- c) Pesquisadores: acurácia e taxa de atualização seriam os requisitos mais importantes, uma vez que os experimentos podem ser modelados de forma a suplantarem as limitações das técnicas de posicionamento quanto à confiabilidade. Além disso, o sistema deve ser adaptável a novas tecnologias e aplicações, possibilitando a fácil remoção ou adição de componentes de *hardware* e *software*.

- d) Militares: a disponibilidade é o requisito-chave, uma vez que é necessário se ter uma solução de posição a todo o momento independentemente do contexto e de possíveis ações hostis, como o *jamming*⁶.

3.2.2 Estudo do posicionamento por GNSS e propostas de melhorias

Acharya; Sadhu e Ghoshal (2011) apresentam um sistema de posicionamento e detecção de partição de composições ferroviários baseado na fusão do GNSS com dados dos sensores inerciais e empregando *map matching* (correspondência com mapa). O sistema estaria composto por dois módulos de posicionamento, cada um destes instalado em um dos carros extremos da composição. Além do posicionamento redundante, esse arranjo permitiria, mediante verificação dos deslocamentos longitudinais entre os dois módulos, a identificação de uma partição accidental do trem. O módulo considera filtro de Kalman na fusão dos dados provenientes do GPS, hodômetro e acelerômetro. Os resultados de simulações mostraram a inadequação da técnica no atendimento aos critérios de segurança na detecção de partições accidentais.

Lee et al. (2012), integrantes do mesmo grupo de pesquisa que cunhou o termo VSN, apresentam um sistema de posicionamento por GNSS auxiliado por *tags* de *Radio-frequency Identification* (RFID) dispostas ao longo da infraestrutura rodoviária. Nesse sistema, o veículo equipado com o leitor RFID corrige suas coordenadas GNSS ao passar próximo de uma etiqueta, cujas coordenadas são conhecidas de forma acurada. Por fim, em conceito similar ao posicionamento diferencial GPS (DGPS), esse mesmo veículo transmite aos vizinhos, não necessariamente equipados com o leitor RFID, a correção a ser aplicada sobre as coordenadas GNSS. O trabalho limitou-se a experimentos que demonstraram a viabilidade do sistema, sem uma avaliação quantitativa do ganho em acurácia em relação ao uso

⁶ *Jamming* é a ação deliberada de interferir na recepção de sinais de rádio (comunicação ou posicionamento) ou obstruí-la (*jam*, em inglês) por meio da transmissão de sinais de rádio em faixa de frequência próxima daquela do sistema alvo. Os aparelhos empregados nessa modalidade de ataque são chamados de *jammers* ou bloqueadores de sinal (ROUNDS, 2004; IET, 2016).

isolado de GNSS de navegação. Ainda assim, a partir das características do sistema (espaçamento entre *tags* e taxa de penetração dos leitores RFID) e da faixa de velocidade observada em rodovias (entre 70 e 110 km/h), os autores esperavam como resultado erros de até 3 metros, o que permitiria, na maior parte do tempo, a correta identificação da faixa.

Por sua vez, Wang; Ni e Li (2014) descrevem uso das *tags* RFID passivas como suplementar ao posicionamento por satélites e aplicado no contexto dos veículos conectados. Os autores apontam como lacuna nas pesquisas a discussão da variação dos requisitos posicionais de acordo com a natureza da aplicação. Assim, a contribuição desse trabalho se daria para aplicações relacionadas à segurança na mudança de faixa, requerendo exatidão de 1 a 2 metros e atualização da posição em alta frequência. O sistema proposto registraria a coordenada quando da passagem por uma etiqueta e, até a passagem pela etiqueta seguinte, estimaria a posição do veículo por integração cinemática. Além disso, a etiqueta armazenaria informações de orientação, como distância para próxima intersecção, número da faixa ocupada e sentido de deslocamento. Testes em apenas uma faixa e um veículo demonstraram a viabilidade do sistema e a obtenção de erros aproximadamente nulos. Contudo, os autores destacam a necessidade de testes em cenários mais realísticos antes de aplicação em larga escala.

Song et al. (2016) propõem uma estratégia de fusão baseada em aprendizagem supervisionada a ser aplicada sobre o posicionamento por RFID e demais sensores embarcados. Como motivação, cita-se a aplicação desse sistema de posicionamento em ambientes de completa indisponibilidade de GNSS, como túneis. Em vez de considerar o registro da coordenada no momento de passagem pela etiqueta, os autores modelam a distância do leitor RFID embarcado para as *tags* fixadas na via. Como demais sensores embarcados, têm-se o tacômetro, bússola eletrônica (magnetômetro), sensor de ângulo de viragem e os sensores inerciais de navegação (acelerômetro e giroscópio). Os testes revelaram que a estratégia proposta resultava em posicionamento de acurácia similar à obtida por GNSS. Além disso, o uso de fusão baseada em aprendizagem supervisionada resultou em maior acurácia em comparação com estratégias de fusão baseadas em filtros probabilísticos (como o filtro de Kalman).

Beugin e Marais (2012) contribuem para a discussão do emprego do GNSS para localização ferroviária ao avaliar, por meio de simulações, a confiabilidade dessa técnica de posicionamento nesse modal. A motivação para o estudo reside na possibilidade de se empregar sistemas de sinalização ferroviários que não dependam, como os sistemas usuais, de elementos instalados na infraestrutura. Como vantagens em relação às técnicas baseadas em instalações na via, ter-se-ia menores custos de implantação e manutenção, além de facilitar a interoperabilidade entre sistemas de diferentes países no contexto do Sistema Europeu de Gestão do Tráfego Ferroviário (*European Rail Traffic Management System*, ERTMS).

A análise segue técnicas padronizadas por autoridades ferroviárias a serem aplicadas no estudo de viabilidade de dispositivos e serviços para operações ferroviárias críticas. Esses padrões baseiam-se na chamada análise RAMS (acrônimo para *reliability, availability, maintainability and safety*), na qual esses quatro parâmetros (confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança) caracterizam a qualidade do serviço executado. A contribuição do trabalho desses autores está na criação de um procedimento baseado em simulações para análise desses parâmetros de qualidade em cenários comuns às ferrovias (arborizado, em corte, túnel e meio urbano) e considerando posicionamento por GNSS. Os resultados mostram a impossibilidade de uso de técnicas inteiramente baseadas em satélite em aplicações seguras, exigindo sistemas redundantes ou sistemas de detecção de falhas.

Como forma de aumentar a robustez do posicionamento por GNSS em ambientes urbanos, Bourdeau; Sahmoudi e Tourneret (2012) propõem sua integração com Modelo Digital de Elevação (MDE) do ambiente circundante, isto é, o modelo tridimensional (3D) dos elementos de seu entorno. Ao contrário de outras técnicas que buscam remover satélites sem visada direta (*non line of sight*, NLOS), o método discutido permitiria o uso construtivo destes ao usar o modelo do entorno na estimativa do caminho efetivamente percorrido pelos sinais GNSS do satélite à antena receptora, mensurando distâncias adicionais decorrentes de reflexões em obstáculos. Esse uso construtivo de todos os satélites cujos sinais são recebidos possibilitaria melhor posicionamento, uma vez que em cânions urbanos o número de

satélites com visada direta (*line of sight*, LOS) é baixo e a diluição de precisão (*dilution of precision*⁷) desses satélites é insatisfatória. Os resultados de simulações mostraram aumento na acurácia posicional de aproximadamente 30%. Contudo, a necessidade de se possuir o mapeamento tridimensional prévio no computador embarcado restringiria a cobertura do sistema.

Groves et al. (2012) também sugerem o emprego de mapeamento tridimensional ao introduzirem o conceito de posicionamento urbano inteligente (conceito de *intelligent urban positioning*, IUP), que integra esse dado com o posicionamento por GNSS e técnicas de identificação dos satélites NLOS para sua exclusão no cálculo das coordenadas do veículo, técnica também conhecida como *shadow matching*. Para os testes conduzidos sob esse conceito e em situação estática, para pontos fixos pré-definidos no ambiente urbano, a técnica resultou em erros sempre inferiores a 2 m, enquanto que o posicionamento GNSS simples resultou em erros da ordem de 20 m para os mesmos pontos. Cita-se, como trabalho futuro, a necessidade de se estudar a necessidade de processamento de grande volume de dados em tempo real e o desempenho do método em deslocamento.

Marais et al. (2014), tendo como escopo os meios de transporte guiados, discutem sistema baseado na captura de imagens do entorno do veículo como apoio ao posicionamento por GNSS em situações de sombra (obstáculos ao sinal como árvores, edifícios, etc.). Seria possível empregar técnicas de classificação de imagens e identificar, em tempo quase real, os obstáculos ao redor do veículo. Após isso, são determinados os satélites sem visada direta para exclusão dos mesmos no cálculo do posicionamento, pois o sinal que está chegando é indireto e, portanto, sujeito ao erro de multi-caminhamento. Na Figura 5, é possível observar exemplos de imagens usadas para esse fim, captadas utilizando-se câmera do tipo olho-de-peixe apontada para o zênite e abrangendo todo o entorno (360°). Conhecendo-se o azimute e a elevação dos satélites observados naquele momento, é possível fazer

⁷ Quantificação do efeito da geometria dos sinais que chegam à antena no cálculo da solução de posição (GROVES, 2008). Assumindo certo número de satélites, um poliedro é formado pelas linhas que unem o ponto de observação aos satélites observados. Quanto maior o volume do poliedro, melhor é a geometria dos satélites. Como o valor DOP é igual ao inverso do volume desse poliedro, uma boa geometria resulta em valores DOP baixos (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2007).

uma sobreposição desses dados com a imagem de modo a ser possível identificar os satélites com ou sem visada direta.

Figura 5 – À esquerda, imagem adquirida por câmera “olho de peixe” instalada sobre veículo; à direita, imagem indicando a linha do horizonte artificial (em verde), satélites com visada direta (marcados em azul) e satélites sem visada direta (em vermelho)

Fonte: adaptado de Marais et al (2014)

Contudo, os primeiros testes realizados por Marais et al. (2014) não indicaram melhora do posicionamento com a exclusão dos satélites GNSS sem visada direta do cálculo das coordenadas, uma vez que a geometria dos satélites torna-se inadequada. Como sequência das pesquisas, os dois trabalhos propõem a utilização desse imageamento estereoscópico na modelagem 3D do entorno em tempo quase real, o que possibilitaria tratar os satélites sem visada direta de forma distinta e utilizá-los no cálculo das coordenadas. Além disso, outra forma de auxílio ao posicionamento por GNSS seria o uso dos modelos 3D na técnica de *feature matching*, sendo necessário conhecer e discutir a acurácia posicional do modelo preexistente.

Reconhecendo as limitações do posicionamento por satélite, Alam e Dempster (2013) promovem discussão conceitual do Posicionamento Cooperativo (*Cooperative positioning*, CP) baseado na comunicação veicular como forma de posicionar veículos com acurácia e disponibilidade adequados para serviços críticos. Os sistemas de CP consideram o compartilhamento de dados posicionais e cálculos de distâncias relativas entre diferentes entidades, resultando em melhora da qualidade de suas soluções de posição. Os autores afirmam que as propostas convencionais de CP verificadas na literatura, baseadas no GPS, têm viabilidade

questionável por partirem de posicionamento por satélite e não oferecerem disponibilidade exigida para aplicações seguras. Os sistemas modernos de CP, por sua vez, estariam aptos a realizar posicionamento com indisponibilidade parcial ou total de GNSS, a partir do cálculo das distâncias entre os veículos a cooperar. Em cenários sem cobertura de satélites, a revisão bibliográfica revela a viabilidade de abordagens de posicionamento *indoor* (*indoor positioning systems*, IPS) empregando o tempo de propagação de sinais de banda ultralarga (*ultrawide-band*, UWB) no cálculo das distâncias relativas. Como solução a ser concretizada em pesquisas futuras, são citados os sistemas modernos de CP que integrariam outras fontes de dados posicionais além dos satélites: rede celular, *Wi-Fi*, posicionamento baseado em imagens, entre outros.

Cornick et al. (2015) apresentam outra tentativa de incremento na acurácia do posicionamento por GNSS a partir da identificação de elementos no entorno do veículo, neste caso do terreno sob o veículo. Empregando tecnologia de *Radio Detection and Ranging* (RADAR), que se utiliza da emissão, reflexão e recepção de ondas eletromagnéticas para o cálculo de distância do veículo para certo número de pontos, é possível levantar feições do ambiente pelo qual o veículo trafega. A partir desse levantamento e da comparação com dados georreferenciados preexistentes, seria possível melhorar a solução oferecida pelo GNSS e obter maior acurácia. Como vantagem em relação à associação de feições visual, ter-se-ia o fato de que sujeiras e iluminação não interfeririam no levantamento. Os resultados mostraram que o arranjo experimental proposto é capaz de obter acurácia horizontal de 7,3 cm em velocidade compatível com as rodovias estadunidenses. Como problemas relacionados à técnica, a serem discutidos em trabalhos futuros, citam-se as limitações de processamento e armazenamento de dados e o custo elevado, comparável àquele dos sistemas LIDAR, além da possibilidade de alteração das feições subterrâneas, ocorrência sazonal e associada à presença de água.

Buscando acurácia posicional ao nível das faixas de rolamento, Gu; Hsu e Kamijo (2015) propõem sistema que integra diversos sensores passivos (isto é, sem transmissores de sinais) para auto-localização (*self-localization*), termo empregado na robótica para descrever a capacidade de uma entidade se localizar, isto é, sem necessidade de comunicação a entidade externa (OLSON, 2000). Dessa forma, a principal motivação dos autores reside nos veículos autônomos e aplicações

correlatas. O sistema fusiona, por filtro probabilístico, dados provenientes de três módulos:

- 3D-GNSS: empregado para posicionamento global do veículo, integrando o posicionamento prévio por GNSS com modelo 3D empregado na redução dos efeitos do multi-caminho e dos sinais sem visada direta. A metodologia proposta é similar à empregada por Bourdeau; Sahmoudi e Tournernet (2012).
- Unidade de Medida Inercial (*Inertial Measurement Unit*, IMU): destinado a medir os deslocamentos lineares e angulares do veículo.
- Câmera comum: para detecção da sinalização horizontal e, por consequência, das faixas de rolamento.

O desvio-padrão em posição resultante dos experimentos foi de 0,76 m, quinze vezes menor que aquele associado ao posicionamento GNSS absoluto simples. Contudo, a taxa de reconhecimento de faixa de rolamento (93%) foi considerada insatisfatória para aplicações críticas, sendo este um ponto a ser abordado em próximos trabalhos. Adicionalmente, precisa-se estudar o comportamento desse sistema de posicionamento em cenários mais restritivos ao GNSS, como túneis e trechos viários sob pontes e viadutos.

De La Escalera et al. (2016), por sua vez, utilizam câmeras de vídeo para odometria estereovisual a ser aplicada na navegação autônoma. A odometria visual comum estima a distância percorrida pela câmera a partir do deslocamento aparente de pontos ou feições de interesse entre cenas sucessivas. No método que emprega a estereovisão, o modelo de deslocamento adotado é tridimensional e estima-se o deslocamento do veículo a partir dos deslocamentos aparentes dos pontos 3D levantados. O algoritmo proposto apresenta como contribuição uma nova abordagem na seleção dos pontos ou feições de interesse, restringindo-os apenas a elementos pertencentes ao pavimento. Isso se justifica por estes serem os únicos certamente estáticos no ambiente urbano, eliminando problemas relacionados ao uso de pontos pertencentes a objetos móveis ou de pontos não detectáveis nas cenas sucessivas. Testes conduzidos em seis trajetórias diferentes, com distâncias de até 1,2 km e velocidade linear de até 60 km/h, mostraram que o algoritmo

proporciona acurácia superior à dos demais métodos de hometria estereovisual, estimando deslocamentos lineares com erros de no máximo 1,3%. Como ponto a ser discutido, cita-se a limitação computacional do emprego do algoritmo no tratamento de nuvens de pontos 3D em tempo real. O emprego de simplificações, de forma a aumentar eficiência computacional, acabou por gerar resultados três vezes menos acurados.

No domínio ferroviário, Lauer e Stein (2015) discutem a viabilidade de sistemas de posicionamento integralmente embarcados, isto é, sem dependência de dispositivos instalados na infraestrutura, a serem aplicados nos sistemas de proteção de trens, críticos em segurança. Os autores pontuam relevantes características do sistema sobre trilhos e suas implicações sobre o sistema de posicionamento para aplicações críticas. As grandes distâncias de frenagem das composições ferroviárias inviabilizam sistemas de proteção baseados na detecção de obstáculos, comumente usados para veículos autônomos sobre rodas. Por conseguinte, os sistemas de proteção exigem sistemas que permitam a efetiva localização do veículo na malha viária. A partir da revisão bibliográfica, esses autores verificam que as propostas de sistemas de posicionamento integralmente a bordo consistem majoritariamente na integração do GNSS com o mapa da via e outros sensores, tanto de movimento quanto de identificação de elementos do entorno. Como contribuição ao estado da arte, esse artigo propõe novo algoritmo na integração das coordenadas GNSS com os dados de velocidade, provenientes de sensor de corrente parasita, e com as propriedades geométricas e topológicas das vias. Para atingir os requisitos de segurança, esse algoritmo considera a modelagem das incertezas associadas a cada sensor de posição, a definição de diferentes níveis de confiabilidade e o estabelecimento de balizas virtuais. A partir de testes, o posicionamento longitudinal na via mostrou-se bem-sucedido em termos de precisão, com desvio-padrão inferior a 3 m em 97% dos casos. Entretanto, a identificação da via correta em trechos de vias próximas e paralelas mostrou-se deficiente; o sistema não determinava a via incorreta, mas em 6% dos casos havia indefinição entre duas opções, uma delas a correta.

Marinov; Hensel e Straus (2015), destacam a limitação dos sistemas GNSS e de hometria visual em ambientes adversos e frequentemente presentes nas ferrovias. Dessa forma, apresenta-se nesse artigo um sistema de posicionamento

que utiliza apenas um conjunto de sensores de corrente parasita⁸ na determinação de velocidades e, por conseguinte, de deslocamentos. Engelberg e Mesch (2000) descrevem esse conjunto medidor de velocidade como composto por dois sensores de corrente parasita dispostos longitudinalmente com espaçamento conhecido e por um correlacionador. Os dois sensores transformam as irregularidades no trilho em sinais idênticos, mas defasados por um intervalo proporcional à velocidade do veículo se a velocidade for constante entre as duas passagens. Assim, o correlacionador extrai o intervalo de defasagem dos dois sinais. A abordagem apresentada por Marinov; Hensel e Straus (2015) se diferencia das anteriormente apresentadas na literatura por modificar os parâmetros do correlacionador e considerar a possibilidade de velocidade não constante entre as passagens dos sensores sobre uma mesma irregularidade. Identificou-se a viabilidade da nova técnica a partir de testes e comparações com o uso de GPS integrado ao Sistema de Navegação Inercial (*Inertial Navigation System*, INS) e o uso tradicional dos sensores de corrente parasita. Verificou-se, para o sistema proposto, maior acurácia e confiabilidade nas medidas de velocidade e posição relativa a outras composições em relação ao uso simples do GNSS.

Li et al. (2013) apontam a inadequação dos algoritmos usuais de correspondência com mapa (*map matching*) no atendimento dos requisitos de integridade de aplicações veiculares críticas e propõem novos algoritmos para o *map matching* em si e para o monitoramento da integridade dos resultados obtidos. No método proposto, os dados brutos provenientes do GNSS, dos sensores de deslocamento de baixo custo e do Modelo Digital de Elevação (MDE) são integrados por filtro de Kalman para fixação de posição. Para realização do *map matching*, emprega-se algoritmo topológico que adota pesos diferentes para trechos viários candidatos de acordo com sua conectividade com os *links* (arcos representando vias) precedentes.

⁸ Corrente que circula em um material metálico (um trilho, por exemplo) como resultado de forças eletromotrizes induzidas pela variação do campo magnético (IEEE, 2000). O dispositivo sensor de corrente parasita possui uma bobina ativa, que gera um campo magnético variável, e uma bobina detectora da corrente parasita induzida pelo campo variável. São normalmente empregados na identificação de anomalias na resistência magnética do material, associadas a inomogeneidades como defeitos e fixações de trilho (ENGELBERG; MESCH, 2000).

Para monitorar a integridade dos resultados, os autores consideram técnica derivada do tradicional *Receiver Autonomous Integrity Monitoring* (RAIM), usada na verificação da integridade do posicionamento por satélite se valendo de medidas de pseudodistância GNSS redundantes e identificação de medidas discrepantes. No novo algoritmo RAIM, os autores introduzem a detecção tanto de falhas associadas aos sensores de posição (GNSS, sensores de movimento e MDE) quanto de erros na identificação do arco (*link*) por parte do algoritmo de *map matching*. Testes realizados em Londres (região densamente urbanizada) e Nottingham (área suburbana) mostram a viabilidade do método desenvolvido para monitoramento da integridade, com taxas de falsos alarmes e de falhas na detecção de erros que atendem requisitos exigentes. Contudo, os próprios autores citam a falta de parâmetros de integridade amplamente aceitos para aplicações ITS críticas, dificultando a comparação entre diferentes técnicas e o estabelecimento de metas.

Zeng et al. (2015) discutem problemas associados ao *map matching* aplicado no processamento dos dados provenientes de *probe vehicles* e que empregam GPS como base para sistema de posicionamento. Apontando a ineficiência e a imprecisão desse emprego dos mapas em redes viárias complexas, os autores apresentam como contribuição um novo algoritmo de *map matching* que emprega medidas de curvatura das trajetórias registradas, variável geométrica que seria negligenciada em grande parte dos algoritmos precedentes. Desta forma, a associação não se daria empregando análises a cada ponto de registro, mas transformando a curvatura da trajetória na feição a ser associada ao mapa. Os testes realizados em diferentes cenários viários e diferentes taxas de amostragem mostraram que o método proporciona taxa de detecção correta da via ocupada até quatro vezes maior que métodos usuais. Apesar do melhor desempenho, a técnica traz pouco trabalho computacional adicional, consumindo apenas 2,4% a mais de tempo em relação às técnicas usuais.

Tendo como contexto os sistemas avançados de auxílio à direção, Gruyer; Belaroussi e Revilloud (2016) apresentam alternativa para o posicionamento lateral acurado. O artigo propõe a fusão dos dados GNSS com os dados provenientes dos sensores de movimento (INS e hodômetro), da detecção da sinalização horizontal e do mapa acurado da sinalização, realizando *map matching*. Para a atividade de detecção das marcações em pista, utiliza-se duas câmeras, cada uma acoplada a

um dos lados do veículo. Testes realizados em pista de teste mostraram que a técnica pode resultar em acurácia subcentimétrica.

3.2.3 Estudo de alternativas ao posicionamento por satélites

Alguns trabalhos apresentam alternativas de posicionamento que não utilizam os GNSS. Lee e Tsang (2008) propõem a utilização de etiquetas ativas de *Radio-frequency Identification* (RFID) fixadas em dormentes de vias férreas, realizando a identificação e o posicionamento de composições. Em oposição às *tags* (etiquetas) passivas de RFID, largamente empregadas no monitoramento de carga, as *tags* ativas têm como característica portar uma fonte de energia que garante maior alcance de comunicação e menor tempo de resposta, requisitos exigidos para o sistema proposto. Seriam instalados leitores RFID ao longo da via e a identificação de cada veículo seria transmitida pela *tag* ativa de RFID fixadas sob o primeiro carro. Uma vez que as coordenadas dos dispositivos são conhecidas, o posicionamento do veículo seria conhecido de forma acurada no momento de passagem desse pelos leitores RFID. Os autores discutem a viabilidade desse sistema apenas para detecção de chegadas e partidas em estações ou pátios, com resultados positivos de testes realizados em Veículos Leves sobre Trilhos (VLT) de Hong Kong,

Em outro trabalho empregando RFID, Luftu et al. (2013) utilizam *tags* passivas dispostas ao longo da via para construir um sistema de posicionamento aplicado ao controle de tráfego de *tramways*, ao sistema de informação a passageiros e ao planejamento da manutenção. Como motivação, buscava-se substituto ao GNSS que proporcionasse maior disponibilidade e acurácia em pontos de mudança de via. Em testes realizados em linhas de *tramway* da região metropolitana de Istambul, os autores discutiram sobre a posição ótima das etiquetas e o ângulo ótimo da antena RFID disposta sob o veículo, demonstrando a viabilidade desse sistema. Como ponto não abordado adequadamente, os autores não especificaram o espaçamento adotado entre etiquetas, apenas afirmando que essa variável condicionava a acurácia do sistema e que o número de *tags* se dava de acordo com as demandas operacionais.

Por sua vez, Chen e Shih (2015) propõem posicionamento veicular ao nível da faixa de rolamento empregando somente comunicação entre veículos (V2V) e câmeras embarcadas. Por meio do processamento das imagens registradas de forma contínua, a primeira etapa consiste na identificação da sinalização horizontal e, por consequência, da delimitação das faixas. Além disso, a análise das imagens permite a identificação da placa dos veículos (à frente e atrás) que trafegam pela mesma faixa. A segunda etapa consiste na comunicação entre veículos que trafegam na mesma faixa, operação que busca minimizar o impacto de possíveis erros na identificação das faixas por imagem. As simulações evidenciaram que o sucesso do sistema proposto depende sobremaneira do número de *frames* registrados por segundo e da resolução da imagem. Contudo, não foram realizados testes em diferentes cenários quanto à iluminação.

Hung; King e Chen (2015) discutem conceitualmente sistemas de posicionamento destinados a uma aplicação específica: sistemas de mapeamento de vias férreas subterrâneas por *laser scan*. Uma vez que os sistemas móveis de *laser scanning* (*Mobile Laser Scanning*, MLS) utilizam Sistemas Inerciais de Navegação (*Inertial Navigation Systems*, INS) e GNSS para georreferenciamento, seu uso em ambientes que impossibilitam posicionamento por satélite surge como desafio. Os autores indicam como possível solução a integração entre diferentes técnicas: odometria visual, uso de dispositivos de proximidade instalados na via, navegação estimada a partir de diferentes sensores de movimento e técnica de localização e mapeamento simultâneos (*Simultaneous Localization and Mapping*, SLAM) usando o próprio *laser scan*. O algoritmo SLAM realizaria a associação a feições previamente mapeadas e georreferenciadas concomitantemente ao mapeamento por MLS. Como possíveis aplicações derivadas desse sistema de mapeamento, os autores citam sistemas de monitoramento da infraestrutura em tempo real, de detecção de desastres e de controle automático de trem. Contudo, não era proposta do trabalho especificar um sistema e testá-lo segundo os requisitos desses serviços, mas apenas realizar discussões associadas a problemas e oportunidades derivadas do uso do MLS.

3.3 ARTIGOS CENTRADOS NAS REDES VEICULARES E NA COMUNICAÇÃO VEICULAR

Neste item, serão apresentados os artigos que discutem a comunicação veicular e o estabelecimento de redes veiculares como ferramentas de sistemas que utilizem os veículos na geração de dados.

3.3.1 Redes veiculares *Ad-hoc* (VANET)

Dikaiakos et al. (2005) partem das diversas oportunidades de aplicações veiculares decorrentes das VANET para propor novo protocolo de transferência de informações entre veículos. Chamado de *Vehicular Information Transfer Protocol* (VITP), esse protocolo define a sintaxe e a semântica de mensagens trocadas entre veículos, de forma a facilitar requisições (*queries*) e respostas (*replies*) baseadas em tempo e localização. Além disso, o protocolo tem especial atenção à otimização do desempenho e à proteção da privacidade dos condutores. O VITP independe dos protocolos de transmissão e roteamento empregados. Os resultados da simulação conduzida confirmaram a viabilidade do protocolo em VANET, apesar do crescimento substancial das taxas de insucesso conforme o aumento da distância de requisição surgir como fator limitante para o emprego dessa técnica em redes de baixa densidade.

A partir da análise estatística de diversos conjuntos de dados coletados de VANET, Bai e Krishnamachari (2009) discutem as variações espaço-temporais do tráfego em rodovias e suas implicações nas redes veiculares. Por meio de análise matemática e simulação, foi possível verificar como as variações de tráfego de curta e de longa escala espaço-temporal impactam o desempenho da disseminação da informação ao longo da VANET. Desta forma, a especificação de protocolos e de uma arquitetura para VANET deveria ter como objetivo a robustez sob um amplo espectro de cenários de tráfego.

Bai e Krishnamachari (2010) dão continuidade a seu trabalho e discutem, em artigo

posterior, estruturas de rede adequadas para a natureza dinâmica dos veículos, o grande volume gerado de dados e a grande diversidade de aplicações possíveis em VANET. Os autores desenvolvem arcabouço conceitual (*framework*) nomeado *Information-Centric Networking on Wheel* (IC NoW), que permite o desenvolvimento de uma arquitetura de rede genérica que suporta as diferentes dimensões das diversas e possíveis aplicações VANET ricas em informação.

Yan et al. (2013) dedicam artigo a assunto normalmente marginal nas discussões associadas às VANET: os desafios de segurança na computação veicular na nuvem. As nuvens veiculares (*Vehicular Cloud*, VC) seriam similares às VANET, incorporando modelo da computação em nuvem como o oferecimento de três níveis de serviço: aplicações, plataformas e infraestrutura. Como oportunidade, os autores citam o uso das VC em serviços que concordam com o conceito do veículo-sensor, como gerenciamento do tráfego, alertas de incidentes, informações de condições da pista e gerenciamento inteligente de vagas de estacionamento. Nesse contexto, os autores discorrem sobre os desafios associados à manutenção da confidencialidade, da integridade e a disponibilidade do sistema, apontando alguns requisitos para a arquitetura do sistema de segurança associado à VC.

Soleymani et al. (2015) realizam trabalho de extensa revisão bibliográfica sobre a análise da confiabilidade de dados recebidos em VANET, questão relevante para atividades de sensoriamento críticas, das quais depende o funcionamento seguro da rede de transportes. Como resultado, os autores analisam os artigos selecionados segundo seis fatores relevantes na análise de modelos de confiança no contexto móvel, isto é, modelos que busquem garantir a confiabilidade na interação entre agentes de uma rede veicular:

- Complexidade: tempo consumido nos processos deve ser reduzido devido à alta mobilidade no ambiente da VANET, exigindo modelos de confiança simples e rápidos.
- Dinâmica: modelos de confiança devem considerar a alteração frequente na topologia da rede e diferentes padrões de mobilidade, devendo, portanto, depender da infraestrutura viária em menor grau.
- Escalabilidade: habilidade do sistema de admitir adição de veículos à rede

sem sofrer perda demasiada em seu desempenho.

- Descentralização: modelo de confiança deve estar baseado na comunicação veicular descentralizada.
- Nível de segurança: o sucesso dos métodos propostos para criptografia e autenticação é requisito.
- Privacidade: necessita-se de proteção às informações de identidade e localização das entidades que compõem a VANET.

Também destacando as VANET como ferramenta útil na coleta, processamento e compartilhamento de dados, Silva et al. (2015) propõem nova ferramenta de replicação de conteúdo em uma região de interesse. Como diferencial para técnicas precedentes, o método proposto se baseia nos pontos de origem e destino para decidir qual veículo seria mais eficiente ao replicar informações de interesse de uma determinada área. Em simulações utilizando duas horas de dados reais de rastreamento veicular de uma grande cidade alemã, os autores mostraram que a estratégia aumenta a disponibilidade de conteúdo e reduz o custo computacional de seu compartilhamento em redes distribuídas.

Cunha et al. (2016) apresentam revisão de literatura acerca dos desafios da transmissão de dados através de VANET. Para cada camada da arquitetura de rede, são apresentadas as principais características, vantagens e desvantagens dos protocolos aplicados no ambiente veicular e discutidas sua adequabilidade para as diferentes aplicações. Para as aplicações relacionadas ao sensoriamento urbano em VSN, os autores destacam a mobilidade dos nós, a necessidade de lidar com grande montante de dados gerados e a segurança na troca de dados como os principais desafios na especificação do sistema. Além disso, cita-se como principais desafios gerais e pontos a serem estudados nos próximos anos:

- Alta heterogeneidade da rede veicular: coexistência de diferentes tecnologias.
- Gerência e armazenamento dos dados: tratamento de massiva quantidade de dados.

- Sistemas de localização: no contexto de aplicações críticas em segurança, ressalta-se a busca de alternativas mais confiáveis e precisas que o posicionamento por satélite.
- Segurança e privacidade: criticidade da questão, considerando a alta mobilidade dos nós, as frequentes mudanças da topologia, o tamanho da rede e a grande variedade de serviços, com diferentes requisitos, que são oferecidos.
- Tolerância à interrupção na comunicação: adaptabilidade a problemas de comunicação temporários, fazendo uso de soluções que prevejam armazenamento temporário dos dados no nó.
- Densidade variável da rede: adaptação do comportamento da rede para garantia de bom funcionamento tanto em regiões de grande densidade veicular quanto em cenários cuja presença de veículos é esparsa.
- Cooperação com outras redes: interação da VANET com elementos externos pode contribuir para providenciar informações a respeito do tráfego ou do clima.

3.3.2 Redes de sensores veiculares (VSN)

Palazzi; Pezzoni e Ruiz (2012), tendo em conta o uso de veículos como fontes de dados em VSN e o uso de sistemas de comunicação interveicular (*Inter-Vehicle Communication*, IVC), apresentam uma proposta de coleta de dados a partir de limites espaciais e temporais. O novo protocolo administra o intervalo de validade da requisição dos dados para reduzir o consumo de banda de comunicação, decidindo se um conjunto de dados deve prosseguir na rede imediatamente ou se deve ser carregado na memória do veículo em que se encontra e agregado a outros dados existentes.

Destacando a emergência do sensoriamento colaborativo baseado em redes veiculares (*crowd sensing vehicular network*), Bazzi e Zanella (2015) propõem dois

novos protocolos para disseminação dos dados sensoriados, ambos baseados na posição dos nós veiculares. Os protocolos sugeridos assumem que os dados não podem ser modificados ou agregados, o processamento e armazenamento de longo prazo serão realizados apenas na central de dados e cada pacote de dados deve ser entregue à central. As simulações mostraram que, no contexto das redes veiculares de sensoriamento, esses novos protocolos são mais eficientes em relação aos usuais

Tendo como contexto o uso dos veículos como plataformas de sensoriamento e o uso das VSN, Gorrieri et al. (2014) discutem esquemas de coleta de dados descentralizados na observação dos fenômenos sensoriados em uma dada área de interesse. Propõe-se, como forma de otimizar o uso dos canais de comunicação, modelo de transmissão de dados que realiza agrupamentos temporários de veículos sensores e dos dados provenientes destes. Cada agrupamento possuiria um veículo responsável por esse processamento (fusão local) e pelo envio dos dados ao nó que os requisita. As simulações realizadas mostraram que o desempenho do esquema de comunicação proposto é destacadamente prejudicado em cenários de maior variação da velocidade dos nós, isto é, cenários urbanos.

Como sequência do trabalho de definição do veículo como sensor móvel (VaaMS), Abdelhamid; Hassanein e Takahara (2015) propõem uma nova solução para otimização do acesso aos dados de sistemas públicos de sensoriamento veicular. Para tanto, emprega-se o armazenamento temporário (*caching*) de conteúdo coletado de veículos por unidades de *caching* instaladas a cada intersecção. Os veículos, por sua vez, também funcionariam na transferência de dados, coletando-os de uma unidade e repassando-os para outras. Ao fim, essa concepção permitiria maior eficiência na resposta de requisições por, ao mesmo tempo, resultar em maior aproximação dos dados aos potenciais interessados em seu uso e exigir menor capacidade computacional das unidades de via, uma vez que o armazenamento seria temporário. As simulações revelaram melhora nos níveis de atraso de resposta e nas taxas de respostas bem-sucedidas em relação aos sistemas sem uso do *caching*.

Por sua vez, Bradley e Atkins (2015) realizam extensa revisão da literatura e destacam a emergência do conceito dos sistemas ciber-físicos veiculares (*Cyber-*

physical vehicle systems, CPVS), caracterizados pela forte integração de locomoção, computação e comunicação de seus integrantes, com o objetivo de introduzir comportamento interdependente que melhore a eficiência e a segurança nos transportes. Surge, dessa maneira, como área correlata, mas não idêntica, à navegação autônoma. Em um sistema ciber-físico veicular, os sensores embarcados de diferentes veículos se conectam entre si e servem como elementos relevantes no monitoramento do estado da rede e de seu ambiente, condicionando as ações de regulação e otimização a serem tomadas. Nesse cenário móvel, a posição e o registro de tempo (*time stamp*) associados a cada evento são informações essenciais para a coordenação entre os elementos que compõem o sistema.

Liu; Niu e Liu (2016) destacam as diversas possibilidades de sensoriamento a partir de veículos equipados e apontam o desafio de se coletar dados sensoriados de forma contínua em uma rede de sensoriamento veicular heterogênea, na qual cada veículo pode possuir uma dada capacidade de sensoriamento. Considerando esse contexto, os autores propõem novo algoritmo para coleta de dados sensoriados, baseado na análise dessa heterogeneidade e na sua adequação em atender à requisição realizada. As simulações realizadas mostraram que o algoritmo proposto poderia coletar os dados sensoriados com maior área de cobertura e distribuição espaço-temporal mais uniforme em relação aos métodos usuais.

Motivados pelas aplicações de detecção de eventos perigosos em rodovias e do uso do veículo como sensor destes, Radak et al. (2016) discutem algoritmo de fusão de dados distribuída que mescla dados obtidos dos sensores embarcados e de outros instalados às margens das vias. Como fim, pretende-se reduzir problemas relacionados às fontes dos dados ou aos meios de comunicação que possam conduzir a alarmes falsos ou a não detecção de situações perigosas. Sem especificar os sistemas sensores adequados para esse fim, os autores realizam testes do algoritmo para sistema de detecção de gelo na pista. Verificou-se que a proposta permite que veículos sejam avisados sobre determinada condição da pista de forma mais rápida do que as transmissões de alertas usuais. Além disso, a fusão garante que o sistema tenha comportamento adequado mesmo quando um dos sensores apresente leituras incorretas.

3.3.3 Tecnologias de comunicação veicular sem fio

Dar et al. (2010) promovem relevante discussão acerca das tecnologias de comunicação sem fio. Inicialmente, os autores realizam listagem das possíveis aplicações ITS, citando o uso do veículo no monitoramento das condições do pavimento e do tráfego como possibilidade. Para cada serviço ITS, estabelece-se um conjunto de requisitos de comunicação. Em uma segunda parte, são classificadas as tecnologias de comunicação sem fio e levantadas suas principais características. Ao fim, fazendo a correspondência entre requisitos de serviços e características de tecnologias, os autores recomendam tecnologias de comunicação para cada categoria de aplicação ITS. Para o escopo da presente pesquisa, a principal contribuição desse artigo reside no procedimento descrito anteriormente, adotado na especificação de tecnologia de comunicação e cuja estrutura contribui para formatação da especificação de tecnologias de posicionamento.

Singh; Rawat e Bonnin (2014) discutem conceitualmente o uso de rádios cognitivos (*cognitive radios*, CR), isto é, capazes de identificar e explorar canais de comunicação ociosos, no domínio das VANET. Como motivação, também se tem o crescimento do número de aplicações veiculares e saturação das bandas de comunicação veicular. O uso oportunístico do espectro permite maior eficiência e o atendimento de níveis de qualidade de serviço (*quality-of-service*, QoS) mais exigentes de aplicações críticas em segurança. Esse campo de pesquisa é apresentado como recente e as iniciativas levantadas na literatura pelos autores, inclusive no domínio ferroviário, revelam questões abertas na adequação de técnicas existentes de CR à elevada mobilidade dos nós da rede e na garantia da privacidade.

De Cerio e Valenzuela (2015) discutem o emprego do protocolo de comunicação *bluetooth* nas comunicações V2V e V2I. Os autores refutam a ideia de que essa tecnologia não seria aplicável ao contexto por ser de curto alcance. Testes realizados confirmaram a possibilidade do emprego do *bluetooth* na comunicação de veículos em alta velocidade, desde que considerados limites no tamanho dos pacotes de dados trocados e alterações de parâmetros do padrão de requisição.

3.4 ARTIGOS CENTRADOS NOS SISTEMAS SENSORES E TRATAMENTO DOS DADOS SENSORIADOS

Neste tópico, serão descritos os artigos científicos centrados no uso de veículos no levantamento de variáveis genéricas de seu entorno, de acordo com os conceitos já discutidos de *probe vehicles* e do Veículo como Sensor Móvel (VaaMS). Os trabalhos dedicam-se à discussão das tecnologias dedicadas à obtenção dos dados e/ou no tratamento destes para geração de informações úteis.

3.4.1 Monitoramento da infraestrutura viária

Em umas das primeiras iniciativas de uso de veículos no levantamento de variáveis do meio pelo qual trafegam, Leahy; Judd e Shortis (1993) apresentam a determinação dos perfis horizontal e vertical de uma via férrea utilizando o rastreamento de composições em circulação. Como motivação, cita-se o uso de simuladores de trem no treinamento de condutores, cujo funcionamento depende do levantamento acurado, contínuo e uniforme dos perfis reais das vias férreas. Um ponto relevante desse artigo é, antes de propor o sistema de levantamento de dados, especificar uma acurácia de 10 m ou melhor para pontos dos perfis horizontal e longitudinal. Para realizar o mapeamento, os autores apresentam técnica que integra posicionamento diferencial GPS (DGPS), tiltímetro (medidor de inclinação), giroscópio e hodômetro, embarcados em composição apta a trafegar em velocidade comercial. Como vantagens do uso de veículo, obteve-se redução dos custos e maior produtividade em relação aos levantamentos topográficos tradicionais, possibilitando o levantamento de até 200 km de dados por dia sem interrupção do tráfego e atendendo aos requisitos.

Também no domínio ferroviário, Heirich; Robertson e Strang (2013) discutem técnicas de fusão de sensores para a realização de mapeamento da via, de forma similar a desenvolvida por Leahy; Judd e Shortis (1993). O sistema proposto, chamado *RailSLAM*, busca lidar com as limitações do posicionamento por satélites ao empregar fusão de dados provenientes de GNSS e de sensores inerciais de

baixo custo na realização de localização e mapeamento simultâneos (SLAM). A partir do mapa topológico da rede, ou seja, sem informações métricas, o *RailSLAM* seria capaz de criar um mapa geométrico inicial, incorporando informações métricas, e aprimorá-lo por meio das passagens sucessivas dos veículos equipados. Como resultado, poder-se-ia obter mapa da via suficientemente acurado para uso em algoritmos de posicionamento como o *map matching*.

Tratando da superestrutura ferroviária, Mori et al. (2010) apresentam o desenvolvimento de um sistema de *probe vehicles* destinados à identificação em tempo real de irregularidades na superestrutura ferroviária. A técnica apresentada emprega microfonia simples na captação do ruído de cabine, parcialmente resultante do contato roda-trilho, para detecção da corrugação (desgaste no trilho em forma ondulatória) dos trilhos. Pela análise do espectro sonoro resultante, é possível identificar os picos de energia associados aos pontos de maior desgaste. Paralelamente, irregularidades na geometria da via são detectadas por acelerômetro e giroscópio, enquanto o posicionamento do veículo-sonda é realizado por GPS e *map matching*. O conjunto coletor de dados é encapsulado em caixa de dimensões similares às de um computador portátil, facilitando seu uso nos veículos em operação. Testes realizados em linha ferroviária local, de baixa velocidade, mostraram a viabilidade do sistema e sua aptidão na identificação das irregularidades, sendo ainda discutível sua aplicação em trechos de maior velocidade.

Lee et al. (2012) descrevem um método de estimativa das irregularidades da via a partir de acelerômetro instalado no truque e na caixa de eixo de trens de alta velocidade (Figura 6). A abordagem adotada utilizou filtro de Kalman para estimar os deslocamentos verticais ou laterais associados às acelerações medidas. Em segundo momento, foram empregados filtros passa banda⁹ para separar as medições em termos do comprimento de onda de irregularidade associado. Por fim, utiliza-se filtro de compensação para remoção de discrepâncias causadas pelo movimento relativo entre os pontos de instalação dos acelerômetros e a via. Os

⁹ Filtro que permite a passagem de uma faixa (*range*) desejada de frequências e atenua frequências fora desse intervalo (IEEE, 1989).

resultados obtidos pelo sistema mostraram a viabilidade de seu emprego em todas os comprimentos de onda, fato importante uma vez que métodos usuais não fornecem bons resultados para irregularidades de curto comprimento de onda.

Figura 6 - Arranjo da instalação dos acelerômetros no truque e na caixa de eixo

Fonte: adaptado de Lee et al. (2012)

Molodova et al. (2014) discutem sistema similar, empregando medições de aceleração vertical da caixa de eixo na identificação das condições dos trilhos. Destacando o uso já consagrado dessa técnica na identificação de corrugação e defeitos nas juntas de trilho, os autores sugerem método para também se caracterizar trincas e fraturas nos trilhos. A partir da redução de ruídos e da detecção de picos, é possível definir os limiares de aceleração vertical associados a um defeito pontual e sua magnitude. Para o posicionamento, emprega-se GPS associado a medidas de velocidade do trem. Os testes conduzidos mostraram taxas de detecção correta da ordem de 78% com 15% de alarmes falsos, desempenho prejudicado pela limitação do método na identificação de trincas superficiais em relação às de maior magnitude.

Em trabalho posterior, o mesmo grupo de pesquisas discute melhorias no método para viabilização da identificação das trincas (LI et al., 2015). As alterações referem-se ao emprego adicional de acelerômetros longitudinais e de técnicas de processamento de sinal para isolar vibrações associadas aos defeitos das rodas. O

número extenso de testes realizados demonstrou a viabilidade da nova proposição na detecção de trincas em estágio inicial, com taxas de detecção correta para esses defeitos de 85%.

O uso de acelerômetros na cabine de veículo ferroviário para identificação das condições da via também é estudado por Lederman et al. (2017). Em vez de identificação de picos na aceleração vertical, verificou-se que métodos baseados na energia do sinal de resposta seriam mais sensíveis a modificações na via, estando aptos à detecção de trechos onde houve renovação de trilhos ou readequação do lastro. Além disso, o método seria menos sensível às variabilidades das condições de medição. Adicionalmente, fazendo uso de dados coletados a partir de passagens sucessivas ao longo de um mesmo trecho, os autores apontaram a viabilidade de uso desse método com abordagens de classificação supervisionada como forma de melhorar o desempenho na identificação das modificações na via. A técnica mostrou-se robusta quanto às incertezas na posição.

Li et al. (2013) também propõem sistema de inspeção automática do pavimento ferroviário, empregando análise visual a partir de câmeras embarcadas e registro de 20 quadros por segundo. Por meio de visão computacional¹⁰, o sistema testado atingiu precisão de 94% na identificação de importantes componentes da via: as fixações trilho-dormente e as juntas de ligação. Para georreferenciamento dos dados, utilizou-se posicionamento por GPS associado à hodometria. Como problema relacionado à técnica, cita-se a limitação de velocidade a 16 km/h, impedindo sua utilização em veículos em operação.

Também empregando visão computacional na inspeção ferroviária automatizada, Resendiz; Hart e Ahuja (2013) propõem novos algoritmos para detecção das fixações trilho-dormente, juntas e Aparelhos de Mudança de Via (AMV). Obteve-se, a partir dos testes, precisão de 97% na detecção das fixações e juntas, enquanto que o desempenho para os AMV foi consideravelmente inferior (75% de precisão). Os autores não discutiram a qualidade do posicionamento das identificações. Com

¹⁰ Área de estudo interdisciplinar que aborda como computadores podem adquirir, de forma autônoma, compreensão elevada do ambiente no qual estão inseridos a partir de imagens ou vídeos (BALLARD; BROWN, 1982; HUANG, 1996).

relação a velocidade de operação do veículo, limitaram-se a afirmar que esta não precisa ser constante, mas não definiram limites para o bom funcionamento.

Elberink et al. (2013) estudam a detecção e a modelagem automática dos trilhos com o uso de nuvens de pontos obtidas por MLS. A primeira etapa consiste na detecção, buscando conjuntos de pontos que melhor se ajustem às características dos trilhos: pequena elevação em relação ao terreno, linearidade e existência de estrutura similar paralela a uma bitola de distância. Posteriormente, para a modelagem, os autores propõem o ajuste dos pontos a modelos paramétricos dos trilhos. O erro do resultado obtido com o emprego da técnica foi da ordem de 2 cm, tolerável para mapeamento da via, mas inutilizável para identificação de irregularidades no trilho. Para trabalhos futuros, verificou-se a necessidade de se estudar o desempenho do algoritmo proposto em AMV.

De motivação similar, Jwa e Sonh (2015) propõem o uso de filtro baseado em Kalman na extração de modelos 3D dos trilhos a partir de nuvens de pontos provenientes de MLS. Inicialmente, as características geométricas usuais de uma ferrovia (linearidade, paralelismo entre trilhos e elevação sobre o terreno) seriam empregadas para definição dos pontos potencialmente pertencentes à via férrea. Por fim, valendo-se a linearidade da via, o emprego do mesmo filtro, considerado no domínio do espaço em vez do tempo, permitiria a minimização dos ruídos e a identificação de quais pontos corresponderiam aos trilhos. Mais uma vez, os resultados mostraram viabilidade de aplicação apenas para mapeamento, inviabilizando identificação das irregularidades do trilho ou da geometria viária, atingindo erro de 1,8 cm.

No domínio rodoviário, Eriksson et al. (2008) apresentam sistema chamado *Pothole Patrol* (Patrulha do Buraco), destinado à identificação de defeitos no pavimento do tipo panela a partir da resposta de um acelerômetro triaxial de alta frequência (360 Hz) embarcado e de posicionamento realizado por GPS absoluto simples. A detecção dos buracos é feita localmente e, por conexão *Wi-Fi* ou rede celular, é transmitida a um servidor central que agrupa os dados provenientes dos demais veículos participantes e identifica detecções discrepantes. A precisão oferecida pelo GPS, calculada em 3,3 m (desvio-padrão) pelos autores, foi julgada suficiente no sistema proposto. Com a colaboração de uma frota de taxi rodando

acumuladamente mais de 9 mil quilômetros na cidade de Boston, os autores demonstraram que o sistema está apto a identificar corretamente uma panela ou outras anomalias no pavimento em 90% dos casos.

Tendo como objetivo a inspeção das distorções do pavimento rodoviário, Li et al. (2009) propõem um sistema de escaneamento embarcado tridimensional por triangulação *laser* em tempo real e alta velocidade. Para aumentar a acurácia das medições em relação às técnicas tradicionais, os autores utilizam esquema de múltiplas vistas coplanares na calibração do sistema, o que resulta em maior número de pontos na representação das feições levantadas e, portanto, maior detalhamento do perfil transversal do pavimento. O sistema embarcado testado compreendia um projetor *laser* e duas câmeras posicionados na traseira do veículo e destinados a cobrir transversalmente uma faixa de rolamento (3,6 m). Por fim, os resultados comprovaram a viabilidade da técnica na identificação automática de trilhos de roda, escorregamento de massa asfáltica e panelas a partir das derivadas de segunda ordem dos perfis levantados.

Em outra escala de análise da infraestrutura, Charbonnier; Tarel e Goulette (2010) diagnosticam distâncias de visibilidade em vias a partir do levantamento de modelos tridimensionais. No trabalho desses autores, o primeiro sistema experimental consistia no uso de estereoscopia, acoplando duas câmeras na parte frontal do veículo. O segundo arranjo referia-se ao uso de detecção remota por *laser* (*Light Detection and Ranging*, LIDAR) móvel terrestre associado ao posicionamento absoluto por GNSS e INS. Nos dois casos, por intermédio da identificação das curvas verticais e horizontais nos modelos tridimensionais, é possível estimar as distâncias de visibilidade. Como conclusão dos testes, verifica-se que o método que emprega câmeras na estereoscopia tende a subestimar as distâncias de visibilidade, mas ainda assim constituindo boa e barata alternativa ao caro LIDAR por apresentar acurácia apenas pouco inferior.

Por sua vez, Harris et al. (2010) estudam a caracterização do perfil longitudinal do pavimento a partir de medições da aceleração vertical dos veículos. Apontando o consumo de tempo associado às técnicas estáticas e o alto custo das técnicas dinâmicas baseadas em escaneamento *laser*, os autores sugerem como alternativa de baixo custo o uso de acelerômetros embarcados na massa suspensa do veículo.

Diferentemente de outras iniciativas apresentadas, busca-se uma medição contínua das irregularidades ao longo da via, e não apenas a identificação pontual de buracos por meio de picos de aceleração vertical. A contribuição do artigo reside na introdução de novo método para calibragem dos parâmetros empregados na modelagem da massa suspensa do carro, atividade necessária para se identificar qual proporção das respostas medidas pelo acelerômetro deve-se apenas às irregularidades longitudinais. O método foi submetido a simulações e verificou-se que os valores de IRI obtidos encontravam-se em margem de $\pm 2\%$ dos valores de referência.

Outro trabalho de identificação de panelas no pavimento é apresentado por Koch e Brilakis (2011). Destacando o consumo de tempo na inspeção visual, o custoso emprego das reconstituições tridimensionais da superfície e os imprecisos métodos baseados na aceleração vertical do veículo, esses autores apresentam método de identificação automática de defeitos a partir de análise de imagens. O método baseia-se na identificação de características das panelas em imagens (como sombras, forma e textura) e na posterior segmentação das imagens capturadas em áreas de defeito e áreas de não-defeito. Nos testes realizados, foi necessário treinar o algoritmo com 50 imagens com diferentes formas de panelas. Posteriormente, ao ser empregado na análise de outras 70 imagens, o método resultou em acurácia de 85,9%. Como ponto não coberto pelo artigo e apontado pelos autores como trabalho futuro, cita-se a discussão do emprego da técnica em vídeos, visando uso de câmeras embarcadas e sistemas de identificação automática de panelas baseados em veículos.

Em trabalho posterior (JOG et al., 2012), o mesmo grupo de pesquisa investiga o uso desse método de identificação na reconstrução tridimensional dos defeitos de via. Desta vez, o método empregado inicia-se com a identificação do buraco a partir de vídeo registrado por câmera monocular de alta definição instalada em veículo. Em segundo passo, usa-se método de reconstituição 3D a partir da análise de quadros (*frames*) sucessivos. A combinação do método anteriormente proposto com a identificação 3D mostrou-se viável na identificação automática de panelas e na determinação automática do grau de severidade dos defeitos na vias.

Mednis; Elsts e Selavo (2012), por sua vez, conceberam módulo embarcado a ser empregado em VSN na identificação das condições de rolamento do pavimento, integrando acelerômetro, microfone e sensores para medição de variáveis meteorológicas, além de GPS para georreferenciamento dos dados. O sistema, nomeado *CarMote*, utiliza sensores simples e de baixo consumo energético, de forma a ser possível seu uso em larga escala e em sistemas de geração de mapas meteorológicos e das condições do pavimento em tempo real, ainda que a técnica de comunicação para este fim não seja discutida pelos autores.

Flintsch et al. (2012) realizam trabalho similar, destacando como oportunidade o uso dos sensores inerciais já embarcados em veículos para funções de controle de estabilidade e comparando dados obtidos de acelerômetros com aqueles derivados do uso do perfilômetro inercial tradicional. A comparação visual entre as medidas de aceleração vertical e perfil de referência apontaram que ambos seguem um mesmo padrão. Ao empregar função de coerência para identificar a relação entre acelerações e o perfil pressuposto real, verificou-se que há maior coerência para medidas em irregularidades de comprimento de onda entre 50 m e 300 m e menor coerência para os comprimentos de onda inferiores. Assim, verificam-se potencialidades do sistema na gestão inteligente da infraestrutura viária e sua limitação na caracterização de irregularidades de curto comprimento de onda, questão relevante para pesquisas futuras. Destaca-se que este é um dos únicos artigos a empregar o termo *probe vehicle* fora do contexto das condições do tráfego.

Yang; Fang e Li (2013) discutem modelagem tridimensional de rodovias para fins de manutenção a partir dos dados levantados por *Mobile Laser Scanning* (MLS), isto é, o uso do *laser scanning* em plataforma móvel, no presente caso, um veículo. A partir de nuvem de pontos, os autores propõem uma análise baseada na partição da nuvem em sucessivas cenas (ou linhas de escaneamento), cujo pulso de retorno dos pontos é obtido praticamente no mesmo instante. A partir dessas linhas de escaneamento, transversais ao deslocamento do veículo, seria possível recuperar a geometria da seção transversal da via. Os testes resultaram em bons valores para corretude e completude (superiores a 95%) em trecho-teste majoritariamente linear, mas o desempenho em curvas mostrou-se consideravelmente inferior na identificação de pontos de pavimento e não-pavimento. Como trabalho futuro, os autores citam a importância de se incluir a intensidade luminosa na análise.

Higuera de Frutos e Castro (2014) propõem o uso de telefones móveis de última geração na criação de inventários viários, isto é, o levantamento das características físicas e geométricas de cada seção viária, incluindo a sinalização. Trata-se de atividade relevante na gestão da malha viária, tradicionalmente custosa e demandando tempo para planejamento e execução, justificando a busca por alternativas na coleta de dados. Os pesquisadores apresentam aplicativo que permite a gravação de vídeo e sincronização com os dados GNSS, de aceleração, do campo magnético e de pressão, todos extraídos dos sensores já existentes no celular. Os testes demonstraram a viabilidade da inspeção visual remota das condições da via baseada nesse aplicativo, constituindo ferramenta de baixo custo e de resposta mais rápida a possíveis alterações nas condições viárias.

Dennis et al. (2014) abordam conceitualmente sistemas de monitoramento das condições do pavimento usando a colaboração coletiva (*crowdsourcing*) entre veículos conectados. Apontando essa prática como tendência a ser desenvolvida nos próximos anos, os autores discutem as abordagens inovadoras encontradas na literatura para coleta, tratamento e gerência dos dados que viabilizem esse conceito. Como serviços com potencial a serem consolidados em curto espaço de tempo (horizonte de 5 anos), os autores destacam o monitoramento de panelas e da condição de rolamento quanto à serventia da pista e à existência de água ou gelo. Em um horizonte de 10 anos, imagina-se a possibilidade de monitoramento da rugosidade e do IRI (não real) associado a cada veículo. Como possibilidades mais distantes e dependentes de calibração de modelos e de tratamento de grandes volumes de dados, são citados a obtenção do IRI não real associado ao conjunto dos veículos de monitoramento, a identificação de trincas e a verificação do estado das sinalizações vertical e horizontal. Por fim, o monitoramento de alguns parâmetros seria inviável no contexto dos veículos colaborativos, citando-se dados de deflexão para avaliação estrutural, coeficiente de atrito e métricas subjetivas do pavimento.

Seraj et al. (2014) investigam o monitoramento de anomalias no pavimento utilizando acelerômetros, giroscópios e receptores GNSS de *smartphones* em vez de sensores especialmente embarcados no veículo. Os autores obtiveram acurácia de aproximadamente 90% na detecção de anomalias severas a partir do uso de técnica de aprendizagem supervisionada. Também empregando *smartphones* para

detecção automatizada de anomalias, Vittorio et al. (2014) realizam análise dos sinais em termos do impulso vertical, isto é, a derivada no tempo da aceleração vertical. Definindo limiares de impulso associados aos defeitos no pavimento, a taxa de identificações corretas mostrou-se superior a 80% nos testes realizados.

Jo e Ryu (2015) estudam sistemas de detecção de placas a partir de câmera de caixa preta veicular, equipamento de baixa resolução e fixado no para-brisa do veículo para registro de áudio e vídeo, usualmente por motivos de segurança. O desafio dos autores seria utilizar essa câmera de qualidade inferior e realizar a tarefa de extração automática de feições satisfatoriamente na identificação dos defeitos na via. O emprego do algoritmo proposto resultou em uma taxa de sucesso de 88% para os testes conduzidos em rodovias coreanas, restando maiores discussões acerca do desempenho do sistema em diferentes ambientes e luminosidades.

Buscando definir sistemas pouco custosos para avaliação dos pavimentos, Madli et al. (2015) discutem a utilização de sensores ultrassônicos instalados sob um veículo na detecção e notificação automática de placas e elevações transversais (lombadas, tachinhas e tachões). Esses sensores funcionam com a determinação da distância por meio da emissão, reflexão e retorno de ondas sonoras. O sistema proposto utiliza posicionamento GPS absoluto simples para georreferenciamento dos dados sensorizados, notadamente a distância entre o sensor vinculado ao veículo e a superfície do pavimento. Placas e elevações são identificadas por, respectivamente, acréscimos e decréscimos nessa distância. O alerta de placa ou elevação seria enviado, via rede celular, aos veículos em aproximação cuja distância para uma dada singularidade no pavimento seja igual ou inferior a 100 metros. Foi realizada apenas uma viagem experimental em ambiente urbano, na qual foi possível identificar cinco singularidades na via. É necessário destacar que o sistema não foi discutido quanto à acurácia da identificação ou do posicionamento das informações.

Zeng et al. (2015) indicam a utilização de novas métricas na identificação das condições do pavimento a partir de acelerômetros. Os autores propõem o uso de índice alternativo ao IRI na caracterização das irregularidades longitudinais, com fatores associados às características do veículo empregado no levantamento e à velocidade do veículo que obteve os dados. Empregando um mesmo modelo de

veículo, esse índice poderia ser utilizado nas diferentes classes de vias e condições de tráfego, associando diretamente as acelerações medidas com uma probabilidade de deficiência do pavimento. A partir de dados coletados de furgão equipado com acelerômetro triaxial e GPS e percorrendo 80 km de rodovias, a métrica proposta esteve apta a identificar de 80 a 93% dos pavimentos efetivamente deficientes. Os trabalhos futuros pretendem verificar as faixas de velocidade nas quais a métrica é válida.

O trabalho de Ballardini et al. (2015) apresenta sistema similar aos já apresentados, empregando acelerômetro triaxial e receptor GPS para identificação dos defeitos da via. Como principal inovação, tem-se o uso de aprendizagem computacional para agrupamento dos dados coletados (resposta em aceleração) por uma frota veicular equipada, resultando em regiões da malha viária homogêneas quanto à qualidade do pavimento. Os resultados dos testes do sistema proposto mostraram-se razoavelmente correlacionados com aqueles obtidos por inspeção visual, método tradicional para classificação do pavimento. Outra distinção relevante do artigo é o destaque dado à influência da acurácia dos dados posicionais no desempenho do sistema, uma vez que o particionamento da malha viária em regiões homogêneas é sensível ao aumento do erro posicional verificado em regiões com obstáculos aos sinais dos satélites. De forma genérica, os autores apontam como passo futuro da pesquisa o uso de métodos para melhoria da acurácia do posicionamento por GPS.

Mukherjee e Majhi (2016) estabelecem como objetivo a caracterização de lombadas (*road bumps*) usando *smartphones*. A partir de estudo teórico da resposta dinâmica de um veículo a uma passagem por lombada, da aplicação de filtro passa-baixa e da compressão dos dados (isto é, transformação de valores absolutos em valores relativos ao valor máximo), verificou-se a viabilidade da identificação através de passagens sucessivas por uma única lombada-teste e com variações quanto ao tipo de veículo e velocidade.

Katicha; El Khoury e Flintsch (2016) buscam avaliar a efetividade das avaliações das irregularidades longitudinais baseadas em acelerações verticais dos *probe vehicles*, termo empregado pelos autores para descrever o veículo que coleta os dados. O conceito do cálculo do IRI baseia-se na simulação da resposta de um carro definido como padrão às irregularidades da pista. Desta forma, a partir de testes usando

veículo cujas características são compatíveis com o veículo de referência, os autores verificaram a viabilidade do uso dos *probe vehicles* nessa estimativa quando se leva em conta os parâmetros veiculares e de velocidade que afetam as medições. Além disso, verifica-se que a qualidade das medidas é fortemente afetada pela taxa de amostragem, sendo recomendado que os veículos-sensores obtenham os dados de aceleração a uma taxa de 1000 Hz.

Bridgelall et al. (2016) se utilizam do contexto dos veículos conectados para propor sistema de medição da rugosidade do pavimento baseado em acelerômetros e receptores GPS convencionais. Como contribuição relevante à área de pesquisa, os autores discutem a inadequação do posicionamento por satélites devido à sua imprecisão. Como alternativa de melhora no georreferenciamento das medições de irregularidade ao longo da via, esse trabalho sugere o uso de marcadores instalados na via (*reference inertial markers*), que geram picos de aceleração vertical claramente identificáveis no sinal resultante. Além disso, seria realizada integração cinemática para posicionamento entre marcadores sucessivos. Os testes realizados empregaram um *smartphone* para emular um conjunto de sensores embarcados e alcançaram erro subcentimétrico para um espaçamento de 10 m entre marcadores.

Também motivados pelo sensoriamento colaborativo de anomalias no pavimento, Chen; Lai e Shih (2016) abordam o uso de câmeras embarcadas e de visão computacional, compreendendo técnicas de aquisição e processamento de imagens, extração de características e detecção de elementos. Os algoritmos propostos para a classificação das imagens mostraram a viabilidade de seu emprego para detecções de placas em tempo real mesmo em cenários adversos, com precisão de 80% em cenários normais e de aproximadamente 70% na existência de névoa ou chuva.

Buscando alternativa barata aos sistemas LIDAR, usualmente empregados no levantamento do IRI, Han et al. (2016) propõem novos algoritmos para levantamento das irregularidades do pavimento a partir da triangulação *laser*. Empregando conjunto experimental embarcado com módulo *laser* de baixo custo, câmera, receptor GNSS de dupla frequência e IMU, os autores levantaram dados a uma velocidade de 20 km/h em trecho rodoviário e os compararam aos obtidos por levantamento LIDAR. Os resultados evidenciaram coeficiente de correlação entre os

dados de 0,98 na seção transversal e de 0,99 no perfil longitudinal. Como consequência, o sistema proposto apresenta-se apto a obter o IRI de qualidade comparável ao obtido pelas técnicas convencionais.

Alessandroni et al. (2017) modelam a influência da velocidade veicular na coleta de dados de sensores embarcados. Para o estudo, os autores consideram o uso dos sensores de um celular, notadamente o acelerômetro triaxial e o posicionamento por GPS, para extração da aceleração vertical e, conseqüentemente, de um índice associado às condições de rolamento de um determinado trecho. A operação de três meses do sistema proposto permitiu a obtenção de parâmetros de ajuste para cálculo do índice de irregularidade ponderando a velocidade de coleta do dado.

Buscando lidar com a impossibilidade de se instrumentar todas as obras de arte especiais, Hester e Gonzalez (2017) examinam teoricamente a utilização dos registros de aceleração de veículos trafegando por pontes e viadutos na detecção de danos estruturais localizados nessas estruturas. Empregando simulação, os autores mostram a inviabilidade de identificação dos danos diretamente da resposta em aceleração, uma vez que não foi possível, na quase totalidade do tempo, distinguir a resposta associada aos danos e aquela decorrente da velocidade do veículo, da irregularidade do pavimento e de ruídos. Em outra abordagem, coletando a resposta em aceleração em momento sabidamente sem danos e comparando-a com a resposta em caso de dano localizado, o sistema de identificação mostrou-se viável a depender da qualidade do pavimento. Conclui-se que ainda há inúmeros desafios a serem superados para essa atividade de monitoramento tornar-se viável.

Por fim, Kumar et al. (2016) discutem o monitoramento por VSN do mapeamento dos elementos de iluminação pública, elemento da infraestrutura viária pouco contemplado em iniciativas anteriores. Os autores desenvolvem métodos baseados na análise de imagens captadas por câmeras simples para identificação das luminárias, estimativa de sua altura e do nível de luminância verificado. Os dados são georreferenciados pelo resultado da integração de posicionamento GPS com sensores inerciais. A partir da análise de desempenho do protótipo, os autores comprovam a viabilidade do sistema proposto na criação automatizada de modelos tridimensionais da iluminação pública.

3.4.2 Monitoramento das condições do tráfego

Os trabalhos de Aerde; Mackinnon e Hellings (1991) e Turner e Holdener (1995), já apresentados no Capítulo 2 do presente texto, propõem a utilização dos *probe vehicles* na determinação em tempo real da matriz OD e dos tempos de viagem, respectivamente. Contudo, considerando o contexto da época em que se situam, no qual a tecnologia embarcada viabilizadora do *probe vehicle* estava em fases iniciais, esses artigos têm como questão central o estudo da influência das taxas de penetração dessas tecnologias na correção das estimativas realizadas.

Em outro artigo descrito no Capítulo 2, Huber; Lädke e Ogger (1999) definem *extended floating car data* como um conjunto de dados associados a parâmetros intervenientes no tráfego e coletados continuamente por veículos em deslocamento. Além daqueles tradicionalmente tratados nos sistemas de FCD, notadamente posições e tempos de viagem, esse conceito expandido também incluiria monitoramento de parâmetros ambientais como ocorrência de neblina, reduzindo a visibilidade, e ocorrência de chuva ou geada, prejudicando as condições de aderência pneu/pavimento. Para tanto, seriam utilizados dados provenientes de elementos preexistentes no veículo, como o sensor de chuva do para-brisa, o termômetro externo do sistema de ar condicionado, o sistema de luzes automotivas e os sistemas de auxílio à direção. Esses dados seriam enviados juntamente com a posição GPS e via rede de telefonia celular a uma central de informações do tráfego. Após integração com dados de outras fontes e processamento, informações consolidadas acerca das condições de tráfego seriam enviadas a todos os veículos também via rede celular.

Um dos trabalhos aborda os parâmetros ambientais quanto à segurança no tráfego e às condições de aderência pneu-pavimento. Yamada et al. (2001) descrevem o uso de câmeras na identificação de lâmina d'água ou gelo sobre a superfície de rolamento, fator relevante na garantia da segurança e na otimização da gestão do tráfego e das condições da via. Valendo-se da intensidade da luz refletida e de sua análise nas imagens capturadas, os autores conseguiram distinguir cinco classes de condição da pista: seca, molhada, lamacenta, com gelo e com neve. A verificação

dos resultados de testes mostrou taxas de identificação correta sempre superiores a 83% e igual a 92% em média.

Wegener et al. (2008), também no contexto das redes veiculares e da comunicação direta entre veículos, discutem a aplicação das VANETS em sistemas semafóricos inteligentes. Os autores se dedicam ao estudo dos benefícios de uma aplicação em que a programação das fases semafóricas é enviada aos veículos em aproximação. Empregando essa função, a ideia principal seria induzir economias de energia a partir de desacelerações antecipadas e suaves e do desligamento do motor durante fase vermelha, quando possível. Foi realizada simulação de tráfego acoplada à simulação de redes como forma de investigar a viabilidade dessa aplicação. Admitiu-se que cada veículo saberá o estado atual e a predição de futuras mudanças de fase de todos os semáforos localizados nos 250 metros seguintes. Como resultado, observa-se economia da ordem de 25% no consumo de combustível. Além disso, a simulação evidencia que mesmo os veículos não equipados ou que não receberam mensagens são beneficiados, uma vez que têm sua velocidade condicionada pelo pelotão que integram.

Tratando do conceito de *extended floating car data* na escala das redes veiculares, Messelodi et al. (2009) identificam a frota veicular utilizada na coleta de dados como uma rede distribuída de sensores relevante para o gerenciamento do tráfego e para os sistemas de informação aos condutores. Nesse artigo, os autores descrevem a utilização de câmeras embarcadas e de análise de imagens na estimativa dos níveis de congestionamento a partir de taxas de ocupação da via no entorno do veículo equipado e das velocidades desenvolvidas. Além disso, o sistema estaria apto a identificar acidentes e obras viárias intervenientes na fluidez do tráfego. Para a comunicação, esse sistema baseia-se na transmissão via rede celular, fato que restringe o volume de dados a ser transferido e, por consequência, exige processamento local (*onboard* ou a bordo) das imagens. Os testes em regiões suburbanas e rurais mostraram a viabilidade do sistema em termos de acurácia das detecções. Como ponto crítico, cita-se a necessidade de aumento da eficiência do sistema para viabilizar seu funcionamento em cenários urbanos, consideravelmente mais complexos do que aqueles testados.

Vinagre Díaz et al. (2012) desenvolvem trabalho similar, desta vez empregando câmera estereoscópica para a estimativa das condições de tráfego e posicionamento diferencial GNSS (DGNSS). Em testes realizados em diferentes cenários quanto à iluminação solar, verificou-se que a estereovisão aumentou a robustez¹¹ e a acurácia do sistema em relação ao uso de monovisão. Adicionalmente, os autores propõem um cálculo híbrido do nível de serviço de uma via baseado na integração de dados do sistema XFCD, melhores na estimativa de velocidades, com aqueles dos laços indutivos¹² dispostos na via, mais acurados quanto à ocupação. Ressalta-se que a proposta é descrita em termos genéricos, sem ser propriamente desenvolvida ou testada nesse artigo.

Guler; Menendez e Meier (2014) também discutem o uso das redes veiculares, desta vez no controle do tráfego e no aumento da eficiência de intersecções semaforizadas. Esses autores propõem a adaptação do plano semafórico à demanda verificada em tempo real, empregando a comunicação entre veículos para identificação de pelotões de aproximação. As simulações conduzidas buscaram comparar os benefícios dessa proposta com outra técnica emergente na literatura, baseada na total utilização de veículos autônomos e na modulação de suas velocidades de acordo com o estágio semafórico. Como resultado, os autores verificaram que sua estratégia seria mais eficiente na redução de atrasos. O próximo passo seria testar a solução em cenários mais elaborados, uma vez que as simulações consideraram intersecção de duas vias de faixa única.

Sanguesa et al. (2015) estudam a estimativa da densidade de tráfego por meio da comunicação veicular e do envio de dados posicionais obtidos por receptor GNSS de navegação. Diferentemente das demais abordagens, o mecanismo proposto pelos autores combina estimativas derivadas da comunicação entre veículos (V2V) e aquelas decorrentes da comunicação entre o veículo e as unidades viárias (V2I), aumentando a robustez do sistema. Simulações realizadas em diferentes áreas

¹¹ Robustez é o grau em que um sistema ou componente pode funcionar corretamente em condições para as quais ele não foi especificado, como no caso de dados de entradas inválidos ou de condições ambientais estressantes (IEEE, 1990).

¹² Laço indutivo é um dispositivo metálico instalado no pavimento capaz de detectar fluxo de tráfego. Para isso, considera-se a variação da indutância do laço quando da passagem de um veículo sobre esse elemento (CET, 2015).

urbanas pelo mundo demonstraram as inúmeras vantagens da abordagem em relação ao uso de câmeras ou laços indutivos, reduzindo falhas associadas à deterioração dos dispositivos e proporcionando maior área de cobertura.

Du et al. (2015) destacam o uso de *probe vehicles* e *floating cars* na formação de VSN para monitoramento do tráfego. O artigo estuda a relação entre fatores como o número e a distribuição espaço-temporal de veículos-sonda colaboradores, a taxa de congestionamento e a qualidade da estimativa do tráfego. Como objetivo, busca-se método para estimativa do tráfego que forneça resultados acurados a partir de amostras reduzidas. Os autores propõem técnica que trabalha sobre o planejamento da rota (*path*) adotada pelo *floating car* (participação proativa), buscando caminhos ótimos quanto à estimativa de tráfego. Os resultados de simulações de algoritmos propostos para esse fim mostraram que esse sistema proporcionaria erros três vezes menores nas estimativas em relação à seleção aleatória de *probe vehicles* e *floating cars*. Para viabilizar a aplicação, os autores consideram que os *floating cars* serão carros de serviço e/ou patrulha, cujas rotas possam ser alteradas a fim de atender aos objetivos do sistema.

Yang; Guler e Menendez (2015) empregam a conectividade veicular como ferramenta de priorização semafórica incondicional ao transporte público. Os autores simulam sistema no qual todos os ônibus e certa porcentagem dos veículos estão equipados com dispositivos que transmitem ao controlador semafórico seus dados posicionais e velocidade instantânea. A partir dessa informação, calculam-se os tempos de chegada de cada veículo à intersecção de interesse, estima-se o atraso total dos passageiros no transporte público e aplica-se regra semafórica que minimize esse atraso. O algoritmo proposto reduz o atraso do transporte público sem, contudo, aumentar o atraso dos veículos na aproximação concorrente.

Seo; Kusakabe e Asakura (2015) propõem nova forma de estimativa do estado do tráfego a partir de *probe vehicles*, desta vez dedicando-se ao estudo dos sensores empregados. Enquanto a maioria das iniciativas considera apenas o envio de dados posicionais e de velocidades dos veículos provenientes do GPS para cálculo posterior de fluxos e densidades, esses autores sugerem também o uso de sensores de distância embarcados como forma de obter o espaçamento entre veículos e obter informações volumétricas do tráfego. Para os testes conduzidos em anel viário de

Tóquio, a identificação do espaçamento foi realizada a partir de monocâmeras e posicionamento GPS absoluto simples apoiado por *map matching*. Como resultado, se exigiria menor número de veículos-sonda para obter uma mesma qualidade de estimativa. A técnica pôde estimar acuradamente os volumes de tráfego horários com taxas de penetração de *probe vehicles* relativamente baixas.

Kim et al. (2016) estudam a utilização do filtro de Kalman na integração de dados de *laser scanner* e estereovisão, proporcionando ferramenta para identificação de obstáculos e apoio aos sistemas de auxílio à direção (ADAS) e frenagem de emergência. Os resultados dos testes conduzidos revelaram uma acurácia de 99% em ambientes urbanos e em autoestradas, ainda que os autores não forneçam maiores detalhes acerca desses cenários. Além disso, uma possibilidade não destacada pelos autores seria o emprego dessas técnicas na caracterização volumétrica dos fluxos de tráfego, à semelhança de trabalhos anteriores que empregaram apenas uma das tecnologias fusionadas.

Enfatizando a relevância dos dados de veículos-sonda como ferramenta de gestão do tráfego, Hao et al. (2017) discutem o problema da identificação do real estado dinâmico do veículo a partir de dados GPS esparsos, isto é, com intervalos superiores a 10 segundos. Baseando-se em quatro estados possíveis de um veículo (acelerando, desacelerando, em velocidade de cruzeiro ou parado), em suas combinações possíveis e nas condições de contorno (posição e velocidade finais e iniciais, bem como restrições viárias) os autores propõem modelo estocástico para estimar o real comportamento de um veículo entre pontos consecutivos de rastreamento. Ou seja, para cada combinação de estados entre dois pontos, é calculada uma probabilidade de ocorrência em se considerando as condições de contorno. Como resultado, tem-se o estado do veículo segundo a segundo entre pontos consecutivos do rastreamento. A aplicabilidade do modelo foi demonstrada a partir do tratamento bem-sucedido de dados reais de rastreamento da cidade de Los Angeles para um intervalo de dois anos, que totalizaram 5 milhões de registros.

Outros trabalhos têm como escopo o levantamento da ocupação de vagas de estacionamento baseado em veículos-sensores. No artigo de Tasseron; Martens e Van Der Heijden (2015), são apresentadas simulações de sistemas baseados apenas na comunicação V2V ou que combinam esta tecnologia com sensores de

ocupação de vagas instaladas nas vias. Em todos os casos, considera-se que uma mensagem é criada exatamente no momento de ocupação ou desocupação de uma vaga e que essa informação é disseminada através da VANET. Os resultados, contudo, mostraram que essa estratégia não gera reduções significativas nos tempos de procura por vaga.

Thornton; Redmill e Coifman (2014) investigam a possibilidade do uso de veículos equipados com LIDAR na obtenção de dados quantitativos do uso de vagas de estacionamento urbanas. O algoritmo proposto baseou-se na detecção dos objetos em uma cena, na integração dessa detecção com a realizada por cenas posteriores e segmentação dos objetos que sejam veículos. Como resultado de testes, verificou-se erro de 0,8% na contagem de veículos estacionados. Destaca-se que os autores sugerem o emprego de *feature matching* como forma de incrementar o posicionamento em cenários adversos ao GNSS e aumentar a qualidade das informações coletadas acerca dos padrões de estacionamento. Além disso, ressaltam que o emprego de LIDAR para este fim pode proporcionar dados além da simples contagem, como dimensão dos veículos estacionado e espaçamentos.

Também empregando apenas o *laser scanner* móvel terrestre, Xiao et al. (2016) propõem técnicas para detecção de veículos estacionados e monitoramento de estacionamento em vias urbanas. Inicialmente, a nuvem de pontos coletada é segmentada nas seguintes classes: pontos de terreno, construções e objetos na via. Para a classe referente aos objetos na via, adota-se modelos geométricos veiculares e procedimento de aprendizado supervisionado para reconhecimento de veículos e não-veículos, sua classificação (modelo) e detecção de alterações (chegadas e partidas). Os experimentos mostraram acurácia de 96% na identificação, 86% na classificação e 99% na detecção de alterações. Por fim, os autores destacam que essa seria uma relevante ferramenta para levantamento de dados de ocupação de vagas, tipos de veículos estacionados e tempos médios de estacionamento.

No campo do monitoramento de infrações de trânsito e incidentes no tráfego, Tadic et al. (2017) apresentam algoritmo para reconstituição de colisões a partir do posicionamento por GNSS e pelo sistema inercial de navegação (INS), isto é, acelerômetro e giroscópio. Uma vez que a janela temporal de ocorrência de uma colisão é relativamente curta, a acumulação de erros característica dos sistemas

inerciais de navegação não afeta de forma significativa o cálculo dos deslocamentos lineares e angulares nesse intervalo de tempo. A comparação entre as posições calculadas pelo método proposto ao longo da colisão e aquelas calculadas por vídeo, pressupostas mais corretas, revelou uma discrepância ao nível decimétrico.

3.4.3 Monitoramento das condições ambientais

No sensoriamento ambiental, Hu et al. (2011) mostram, por meio de simulações, a viabilidade da exploração das VSN no monitoramento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) com maior nível de detalhe em relação ao monitoramento estático. O artigo discute a influência da dinamicidade da concentração de CO₂ e da densidade de nós veiculares na taxa de amostragem a ser adotada. Como solução para a indisponibilidade do GNSS em contextos adversos, os autores consideram o posicionamento por radiofrequência, baseado inteiramente na comunicação veicular. Apesar de não ser uma questão crítica nesse monitoramento ambiental, ressalta-se que não é discutida a imprecisão dos métodos de posicionamento e nem seu impacto na qualidade da informação, fato este associado à variação espaço-temporal das concentrações de CO₂.

Hasenfratz et al. (2015) apontam falta de estudos sobre as distribuições espaço-temporais da poluição por partículas ultrafinas para propor mapas de poluição urbana de alta resolução baseados em redes de sensores móveis. Foram coletados dados ao longo de dois anos utilizando sensores de poluição embarcados no topo de veículos do transporte público. O conjunto embarcado possuía sensores de material particulado (MP) ultrafino, CO₂, O₃, NO₂, módulo GPS e *modem* para comunicação via rede celular (Figura 7). A validação dos dados coletados mostrou a consistência do sistema proposto no sentido de se criar sistema de monitoramento da poluição urbana detalhado, acurado e em tempo real.

Figura 7 - *Tramway* com nó sensor instalado, assinalado em vermelho, à esquerda. Visão interna do nó sensor, à direita

Fonte: adaptado de Hasenfratz et al. (2015)

Yi et al. (2015), em um trabalho extenso de levantamento bibliográfico, apresentam diversas iniciativas de uso de veículos como sensores móveis para determinação da qualidade do ar, e realizam classificação desses sistemas em termos de tecnologias empregadas para sensoriamento, comunicação e posicionamento. Dos artigos levantados por esses autores, verifica-se que todas as iniciativas utilizam posicionamento por GPS e veículos sobre pneus ou *tramways*. Para comunicação, utiliza-se maior variedade de técnicas, incluindo *Wi-Fi*, *ZigBee*, e a rede de telefonia celular.

3.4.4 Monitoramento de elementos do entorno

Tendo como escopo o mapeamento de edificações no ambiente urbano, Haala et al. (2008) avaliam a qualidade dos dados provenientes do *StreetMapper*, sistema modular comercial a ser acoplado na parte frontal do veículo compreendendo quatro *laser scanners* em arranjo geométrico que permite campo de visão de 360°. Para georreferenciamento da nuvem de pontos, realiza-se integração de posicionamento por GNSS com unidade inercial (IMU). Verifica-se a possibilidade de produção de mapeamento tridimensional de desvio-padrão em posição de 30 mm em boas condições para posicionamento por satélite. A densidade da nuvem de pontos desse sistema seria capaz de gerar dados para extração de detalhes como janelas e portas

de fachada.

Zhu e Hyypä (2014), propõem uma variação do *StreetMapper* a ser aplicada no domínio ferroviário, chamada *RailMapper*. As tecnologias aplicadas para o levantamento e georreferenciamento dos pontos são as mesmas da versão anterior e possuem, por consequência, mesmas características de acurácia e densidade de pontos. Como variantes, cita-se o desenvolvimento de aplicações para medição de gabaritos disponíveis, superelevação da via e bitola, bem como para o levantamento da catenária, de obras de arte e da vegetação circundante. Apesar de os autores citarem o possível emprego do sistema no monitoramento do estado da infraestrutura, ressalta-se que a acurácia oferecida não atende os requisitos para esse fim e limita a utilização do sistema a simples mapeamento da via.

Ao fim deste capítulo de análise descritiva, é possível o leitor perceber como cada artigo levantado contribuiu para o estado da arte no contexto do veículo-sensor e de funções relacionadas. A partir dessa análise de conteúdo, já é possível depreender que a hipótese inicial, referente à necessidade de discussão do posicionamento como questão relevante, é válida. São poucos os trabalhos que discutem a relevância do posicionamento, e aqueles que o fazem se dedicam à discussão apenas de monitoramentos críticos. Para variáveis não críticas, verifica-se o uso acrítico ou pouco crítico do posicionamento por satélite.

4 CLASSIFICAÇÃO DO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

No presente capítulo, prossegue-se com a análise da bibliografia no sentido de se classificar os trabalhos levantados e quantificar as tendências de pesquisa, confirmando impressões estabelecidas pela análise descritiva.

4.1 DEFINIÇÃO DAS CLASSES

Uma vez realizados o levantamento da bibliografia relevante para o tema e a análise descritiva destes, o passo seguinte consiste na classificação desses trabalhos, ou seja, estabelecer critérios para a divisão dos artigos em categorias relevantes para o escopo do presente trabalho. A partir dos produtos da classificação, espera-se mapear de forma suficientemente detalhada o estado da arte no campo dos veículos-sensores e facilitar o trabalho de identificação de lacunas e subáreas que não foram suficientemente desenvolvidas em trabalhos prévios.

A classificação dos artigos se baseia em método empregado na literatura para análise do conteúdo encontrado em revisão da literatura, como apresentado na Seção 1.3 (Materiais e Métodos). Dessa forma, apresenta-se cada classe adotada e, quando necessário, sua breve descrição.

4.1.1 Natureza das variáveis monitoradas

Poucos autores propuseram uma classificação para as variáveis passíveis de serem sensoriadas por veículos. Willians (2008), por exemplo, apenas cita o uso do veículo no monitoramento do tráfego, da via e do ambiente, contudo, sem definir precisamente o que seria cada categoria. Hull et al. (2006) classificam o papel desempenhado pelos veículos sensores em: monitoramento ambiental, do pavimento, das condições internas do veículo, captura de imagens e *data muling*.

Ilarri et al. (2015) detalham usos de veículos-sensores em três categorias: monitoramento do tráfego, identificação de eventos pontuais na via, como acidentes, e sensoriamento cooperativo de outros fenômenos, compreendendo desde a qualidade do ar até a qualidade do pavimento.

Partindo dessas contribuições, pretendendo cobrir todo o meio no qual o veículo está inserido e analisando apenas a natureza da variável sensorizada, a presente pesquisa propõe a seguinte classificação

- a) Variáveis da infraestrutura de transporte: monitoramento das condições das infraestruturas sobre as quais o veículo trafega, notadamente as superestruturas de transporte (condições do pavimento rodoviário e via permanente ferroviária), demais elementos da via (sinalizações horizontal e vertical, barreiras, iluminação pública) e as obras de arte.
- b) Variáveis de tráfego: estimativa de fluxos, densidades de veículos e tempos de viagem, assim como monitoramento da segurança do tráfego. Considera, também, identificação de ocorrência de água ou gelo sobre o pavimento ou de névoa e geada, fatores de impacto negativo sobre a segurança viária.
- c) Variáveis ambientais (ambiente natural): relacionadas às condições da qualidade do ar e climáticas, tais como concentração de poluentes, temperatura, umidade e pressão atmosférica.
- d) Variáveis do entorno (elementos marginais): associada aos elementos externos à via, tendo como exemplos as edificações, a vegetação de margem e linhas de transmissão de energia.
- e) Variáveis genéricas: quando o artigo não especifica qual variável seria monitorada. Dessa forma, o artigo genérico é diferente daquele que cita e discute todas as demais categorias.

As classes acima não são excludentes, ou seja, um artigo pode estar assinalado em mais de uma classe à exceção da classe das variáveis genéricas. Além disso, entende-se necessário explicar escolhas realizadas nessa classificação. O uso da natureza do fenômeno monitorado como critério na definição das classes justifica a separação de variáveis da condição da via (infraestrutura) e de condições do

entorno em duas categorias diferentes. Enquanto o primeiro conjunto de variáveis está diretamente relacionado à operação viária, interessando condutores e gestores viários, o segundo conjunto também considera variáveis de interesse apenas de terceiros. Também se preferiu não classificar as variáveis quanto à continuidade espaço-temporal, uma vez que monitoramentos contínuos ou discretos (baseados em eventos) podem ser de diferentes naturezas. Contudo, essa questão será levantada para cada variável no Capítulo 5.

4.1.2 Subsistemas abordados pelo artigo

Nessa categoria, diferentemente da organização do Capítulo 3, o artigo é classificado não apenas por seu tema central. Para estar assinalado em uma das classes abaixo, o artigo deve trazer discussão relevante acerca de um dado subsistema ainda que este não seja seu escopo. Adota-se a definição dos subsistemas de um sistema sensor baseado em veículos, como apresentado no item 2.3:

- a) Subsistema de sensoriamento: artigos que tratam das técnicas para a obtenção das variáveis propriamente ditas.
- b) Posicionamento: discussão das tecnologias adotadas para o posicionamento do veículo e para o georreferenciamento dos dados sensoriados.
- c) Comunicação: abordagem das tecnologias para transmissão e recepção dos dados sensoriados.
- d) Tratamento e representação dos dados: artigos que discutem o trabalho a ser realizado para que os dados sensoriados se transformem em informações úteis.

Ressalta-se que as classes acima também não são excludentes.

4.1.3 Modalidade do artigo

Os artigos são classificados também quanto ao seu escopo e à profundidade com a qual trata o assunto abordado:

- a) Proposições e testes: artigos que propõem um sistema para uma finalidade específica e realizam simulações ou testes para avaliar sua viabilidade ou, em um passo mais avançado, suas vantagens e desvantagens em relação aos sistemas já existentes empregados para serviços similares.
- b) Revisão bibliográfica: são os artigos baseados no levantamento do estado da arte em um determinado subtema
- c) Conceituação: artigos que se propõem a ir além da revisão bibliográfica. A partir do levantamento de artigos considerados relevantes, normalmente menos numerosa que uma revisão, essa modalidade de artigos propõe novos conceitos e termos dentro de uma área.

Ao contrário dos demais tópicos, essas classes são excludentes, uma vez que um artigo possui formato, escopo e profundidade únicos.

4.1.4 Modo de transporte

Uma vez que o escopo do trabalho considera apenas transportes terrestres, têm-se as seguintes classes:

- a) Ferroviário: todos os veículos sobre trilhos, compreendendo trens de carga ou passageiros de longa distância, trens metropolitanos, *tramways* e outros.
- b) Rodoviário: veículos sobre pneus, incluindo carros de passeio, bicicletas, motocicletas, ônibus e caminhões.
- c) Genérico: o artigo não especifica em que modal pode ser aplicado. Mais uma vez, o artigo genérico é diferente daquele que cita e discute ferroviário e rodoviário ao mesmo tempo.

Destaca-se que as classes acima não são excludentes, à exceção da classe genérica.

4.2 TERMOS CITADOS E TÉCNICAS EMPREGADAS

Além da categorização proposta, o quadro apresentado no Apêndice A também realiza uma contagem de citação de termos e de emprego de técnicas nos artigos levantados. Destaca-se que, mesmo que um artigo não discuta em profundidade a utilização de uma técnica ou um conceito, o simples fato de citá-lo como possibilidade ou empregá-lo no sistema proposto faz com que o artigo seja considerado na contagem referente a esse termo. Dessa forma, explica-se porque alguns artigos constam em termos e técnicas associados ao posicionamento ainda que não sejam considerados relevantes para a questão do posicionamento na categorização apresentada no item anterior.

Os termos e as técnicas apresentam-se listados a seguir, divididos de acordo com o domínio ao qual pertencem:

4.2.1 Comunicação

Neste quesito, classifica-se os trabalhos quanto à discussão da comunicação. Não se pretende categorizar os trabalhos em termos das diferentes tecnologias de comunicação (tais como *ZigBee*, *Bluetooth*, rede *celular*, *WiFi*, entre outros), uma vez que comunicação não é o escopo do trabalho. Aqui, define-se apenas em que escala o trabalho aborda a questão: se na escala da tecnologia de transmissão, na escala das redes veiculares genéricas ou na escala das redes veiculares especializadas.

- a) V2X e tecnologias de comunicação sem fio: trata da comunicação veicular (V2V, V2I, V2P e V2N) e dos protocolos de comunicação, tais como *Wi-Fi*,

bluetooth, *zigbee*, padrão IEEE 802.11p¹³, bem como o uso da telefonia móvel (3G, 4G, 5G) para transmissão de dados.

- b) VANET: artigos que tratam das redes veiculares *ad-hoc* genéricas e das questões associadas à transmissão de dados nesse ambiente.
- c) VASNET, WSN, VSN: artigos que tratam das especializações das redes veiculares *ad-hoc* aplicadas ao sensoriamento do ambiente dos transportes e discutem peculiaridades da transmissão dos dados sensoriados nesse contexto.

4.2.2 Posicionamento

Neste tópico, são listadas não apenas as técnicas de posicionamento em si, mas também técnicas auxiliares, notadamente ferramentas usadas no cálculo de deslocamentos e na integração de sensores de posição. Ressalta-se que a listagem se refere apenas às técnicas identificadas no levantamento bibliográfico descrito no capítulo anterior.

- a) Posicionamento absoluto simples por GNSS: Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS) é o termo genérico para os sistemas que fornecem solução de posição tridimensional a partir de uma constelação de satélites artificiais que transmite dados posicionais a um receptor. Os sistemas GPS e GLONASS (*Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema*, operado pela Força Espacial Russa) são os únicos sistemas de navegação por satélite de alcance global que estão totalmente operacionais atualmente (EUROPEAN COMMISSION, 2016).
- b) Posicionamento diferencial GNSS (DGNSS): uso de um receptor-base instalado em ponto de coordenadas conhecidas para cálculo e transmissão de correções das coordenadas ou das medidas das pseudodistâncias aos

¹³ Padrão estabelecido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) para comunicação sem fio em ambientes veiculares (WILLIAMS, 2008).

receptores em deslocamento (MONICO, 2007).

- c) Posicionamento relativo *Real-Time Kinematic* GNSS (RTK GNSS): técnica relativa baseada no uso de receptor instalado em ponto de coordenadas conhecidas (estação-base) a partir do qual se transmite correções e/ou observações da fase da onda portadora aos receptores em deslocamento (MONICO, 2007).
- d) Sensores inerciais de navegação e sensores de movimento: acelerômetros e giroscópios (sensores inerciais) empregados para determinação dos deslocamentos lineares e angulares do veículo, além de outros sensores de movimento como hodômetro e taquímetro. São sensores empregados na técnica de navegação estimada (*dead reckoning*).
- e) Hodometria visual: emprego de comparação entre cenas sucessivas, capturadas por câmeras ou *laser scanner*, para estimar deslocamentos desenvolvidos. Também empregada na técnica de navegação estimada (*dead reckoning*).
- f) *Feature matching*: correspondência com mapa (*map matching*) ou com modelo tridimensional preexistente do entorno para correção da posição inicialmente fixada.
- g) *SLAM*: mapeamento e posicionamento simultâneos
- h) Radiolocalização: ocorre a partir da medição do tempo de propagação e da direção do sinal recebido pelo veículo a partir de estações de comunicação.
- i) RFID: tecnologia de identificação de veículos por proximidade empregando comunicação por radiofrequência entre etiquetas e leitores.
- j) Balizas/*transponders*: dispositivos de proximidade para comunicação bidirecional, usualmente empregados na sinalização ferroviária.
- k) Fusão de sensores: aplicação de algoritmos de fusão a dados posicionais provenientes de diferentes sensores. Como exemplo mais utilizado, cita-se o filtro de Kalman e suas variações.

No próximo capítulo, essa lista será complementada com outras técnicas utilizáveis

nesse contexto, já consolidadas na literatura, mas que não foram empregadas por nenhum artigo selecionado no contexto do veículo-sensor, tais como sistemas de aumento GNSS¹⁴, o GNSS assistido (*Assisted GNSS*, AGNSS) e o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP).

Além de técnicas, serão levantadas as ocorrências referentes à discussão de parâmetros de desempenho do posicionamento. Segundo definição de Hofmann-Wellenhof; Legat e Wieser (2003), têm-se:

- j) Acurácia: conformidade da solução calculada à posição real.
- k) Precisão: medida de repetibilidade da solução obtida.
- l) Disponibilidade: porcentagem do tempo na qual o sistema é utilizável, sendo função das características físicas do ambiente e as capacidades técnicas do sistema.
- m) Cobertura: área para a qual o sistema é projetado para funcionar.
- n) Integridade: capacidade do sistema de detectar e alertar seu mau funcionamento.
- o) Confiabilidade: probabilidade de desempenhar uma determinada função sem falha em dadas condições e em dado período de tempo.
- p) Continuidade: capacidade do sistema de desempenhar uma função sem interrupção durante uma dada operação.
- q) Taxa de atualização: número de soluções independentes de posicionamento por unidade de tempo.

4.2.3 Técnicas de sensoriamento

- a) Sensores inerciais: emprego na identificação da atitude do veículo e de sua

¹⁴ Tradução sugerida pela ANAC (2017) para os *GNSS augmentation systems*.

resposta à interação pneu-pavimento.

- b) Câmeras: processamento de imagens, vídeos (monocâmera) ou realização de estereoscopia (estereocâmera ou duas câmeras).
- c) *Laser scanner*: uso de técnicas de mapeamento *laser* no levantamento de nuvens de pontos tridimensionais.
- d) Triangulação *laser*: determinação de distância a partir de emissor *laser* e câmera para captação da luz refletida.
- e) RADAR: determinação da distância por meio da emissão, reflexão e retorno de ondas eletromagnéticas.
- f) Sensor ultrassônico: determinação da distância por meio da emissão, reflexão e retorno de ondas sonoras.
- g) Microfone: identificação de ruídos externos ou relacionados às condições da infraestrutura.
- h) Sensores ambientais: sensores de concentração de poluentes, temperatura, pressão, umidade, etc.
- i) Fusão de sensores: aplicação de algoritmos de fusão a dados provenientes de diferentes sensores.

4.2.4 Variáveis sensoriadas

- a) Condições de fluidez do tráfego, considerando fundamentalmente as densidades, os fluxos e os tempos de viagem.
- b) Fiscalização e monitoramento das condições de segurança do tráfego, incluindo notificação de acidentes.
- c) Condições pontuais da infraestrutura viária: ocorrências pontuais de defeitos ou elementos da infraestrutura de transportes.
- d) Condições contínuas da infraestrutura viária: medições de irregularidade no

pavimento ou no trilho de forma contínua ao longo da via.

- e) Sinalização: identificação das condições das sinalizações horizontal (marcações na pista) e vertical (placas e semáforos).
- f) Modelo tridimensional do entorno: levantamento de feições que circundam a via.
- g) Qualidade do ar: medição da concentração de poluentes atmosféricos.
- h) Condições climáticas: verificação de ocorrência de chuva, névoa ou geada. Medição de pressão atmosférica e umidade.

4.3 RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO E DA CONTAGEM DOS TERMOS E TECNOLOGIAS EMPREGADOS

O quadro que sintetiza a classificação realizada e a contagem dos termos abordados é apresentado de forma completa no Apêndice A. A seguir, seguem os resultados em termos de frequência de ocorrência.

Quadro 1 - Frequência de ocorrência de artigos segundo categorização proposta pelo presente trabalho

	Categorias														
	Variáveis					Subsistema				Modalidade			Modo		
	Infraestrutura	Ambiental	Tráfego	Entorno	Genérico	Sensores	Comunicação	Posicionamento	Tratamento / representação dados	Conceituação	Proposições, simulações e/ou testes	Levantamento Bibliográfico	Ferrovário	Rodoviário	Genérico
Freq.	43	6	26	11	35	56	37	34	57	12	85	8	20	69	14

Fonte: próprio autor (2017)

4.3.1 Considerações finais da classificação

Neste capítulo, o presente trabalho apresentou uma proposta de categorização da literatura como forma de melhor mapear o estado da arte na área dos veículos-sensores. Como resultado, foi possível produzir resultados quantitativos que complementam impressões baseadas na mera leitura dos trabalhos selecionados. Verifica-se a necessidade de se considerar a relevância do posicionamento para as atividades de sensoriamento baseadas em veículo, uma vez que há falta de detalhamento na discussão da adequação de técnicas de posicionamento às diferentes variáveis a serem monitoradas, aos diferentes serviços propostos e aos diferentes cenários nos quais se dá a mobilidade. Como resultado, confirma-se a hipótese inicialmente aventada de que se faz necessário aprofundar o estudo do posicionamento do ponto de vista do veículo-sensor. Para ilustrar esse fato, destaca-se a existência de dois padrões de comportamento opostos na discussão do posicionamento na literatura levantada, que serão descritos a seguir.

O primeiro comportamento refere-se a serviços não críticos, nos quais o posicionamento absoluto por GNSS ou até mesmo o posicionamento por radiolocalização são utilizados sem maiores discussões acerca das características dessas técnicas e do impacto destas na qualidade das informações afluentes desses sistemas sensores. O segundo comportamento é a busca de acurácia, precisão e disponibilidade cada vez maiores. Como justificativa, encontra-se o apoio a funções críticas em segurança que, em futuro próximo, conduzirão ao veículo autônomo.

Contudo, a própria revisão bibliográfica revela a grande diversidade de sistemas sensores propostos e de variáveis sensoriadas, tanto em termos de criticidade em segurança quando em termos da variabilidade espaço-temporal dos fenômenos monitorados, características que deveria condicionar a seleção dos sistemas de posicionamento. Dessa forma, a presente dissertação trabalhará nas nuances entre esses extremos e contribuirá para essa discussão ao estabelecer orientações para a escolha de tecnologias de posicionamento em sistemas sensores baseados em veículos, sempre de acordo com as características das variáveis consideradas.

5 MÉTODO ORIENTATIVO DE ESPECIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE POSICIONAMENTO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do método orientativo a ser empregado na atividade de especificação das tecnologias de posicionamento em sistemas de veículos-sensores. Inicia-se com a identificação de diretrizes para criação do método, definindo termos e listando atividades a serem cumpridas para sua construção. A seguir, são descritos os parâmetros de desempenho do posicionamento que serão considerados. Na etapa seguinte, considerando esses parâmetros, são descritos os possíveis serviços de sensoriamento baseados em veículos. Por fim, as técnicas de posicionamento também são caracterizadas em termos desses parâmetros, viabilizando a análise de sua aplicabilidade a diferentes serviços.

5.1 DIRETRIZES PARA O MÉTODO ORIENTATIVO DE ESPECIFICAÇÃO

A atividade de especificação é definida como a determinação de um conjunto explicitado de requisitos a serem satisfeitos por um material, produto, sistema ou serviço, de forma a atender necessidades e expectativas dos usuários (ASTM, 2016). Do ponto de vista de sistemas e serviços, é realizada a partir da etapa de elicitación, termo da engenharia de requisitos para o processo através do qual usuário e fornecedor identificam, reveem, articulam, compreendem e documentam os requisitos de acordo com as funções a serem desempenhadas e as restrições impostas pelos cenários possíveis (SOMERVILLE, 2003; ISO; IEC; IEEE, 2011). Como etapa final, o conjunto de requisitos deve ser descrito em termos de parâmetros ou critérios de desempenho, qualidade e/ou segurança¹⁵ (SOMERVILLE, 2003; ASTM, 2016).

¹⁵ Desempenho é o comportamento de um serviço em operação. Qualidade é o grau de atendimento de um serviço às especificações. Segurança é o grau de afastamento em relação a risco inaceitável em uma dada situação (ASTM, 2013a, 2013b).

Desta forma, observa-se que a atividade de especificação das tecnologias de posicionamento veicular no escopo do presente trabalho deve estar diretamente relacionada à finalidade do sistema-sensor e ao contexto no qual está inserido. Diversos artigos contribuíram nesse sentido, elencando, de forma dissociada, atividades de monitoramento baseadas em veículos-sensores, característica de fenômenos sensoriados, características de sistemas de posicionamento e parâmetros de desempenho para o posicionamento. Contudo, como verificado no Capítulo 3, são escassos os trabalhos que discutem a especificação de um sistema de posicionamento considerando as peculiaridades de veículos-sensores.

Autores como Groves (2008), Hofmann-Wellenhof; Lichtenegger e Wasle (2007), Ochieng e Sauer (2002) e Skog e Handel (2009) se dedicam à discussão de parâmetros de desempenho dos sistemas de posicionamento veicular. Entretanto, esses trabalhos foram desenvolvidos tendo em conta apenas serviços críticos em segurança e realizados em tempo real, motivo pelo qual os autores partem dos já consolidados parâmetros adotados em sistemas de navegação aérea, serviço notadamente crítico em segurança. Os parâmetros que descrevem o desempenho requerido em navegação aérea¹⁶ (RNP, do inglês *Required Navigation Performance*) são acurácia, integridade, continuidade e disponibilidade.

Quando considerado o cenário do veículo-sensor, têm-se como principais diferenças tanto para um cenário de navegação crítica em termos de segurança quanto para serviço veicular de criticidade nula:

- a) Tempo para determinação da posição. Os serviços de sensoriamento podem ou não ocorrer em tempo em tempo real. Esse fator é importante por não inviabilizar, a depender do serviço considerado, a utilização de técnicas que demandam pós-processamento e que são inutilizáveis em navegação, que por princípio ocorre em tempo real.

¹⁶ Performance de navegação requerida, ou *Required Navigation Performance* (RNP), é a meta de desempenho de navegação necessária para operação de uma aeronave em determinado espaço aéreo. A RNP estabelece um conjunto de requisitos para o espaço aéreo (infraestrutura de comunicação e vigilância) e para as aeronaves (sensores de navegação) que ali estão autorizadas a operar. São definidos seis tipos (níveis) de RNP, variando quanto à exigência de desempenho e identificados pelo código n.nn, onde n.nn é o erro máximo (em milhas náuticas) do sistema de navegação em 95% do tempo. (ICAO, 1999; SIQUEIRA, 2005).

- b) Criticidade em segurança. O sistema sensor pode compor serviços de grau moderado ou alto de criticidade, como aqueles de alertas de risco ao condutor ou de prevenção de colisão, este último usado em sistemas autônomos de guiagem. Em contraposição, para atividades não críticas, funcionaria de forma similar a um mapeamento comum, mas ainda assim exigente quanto à qualidade geométrica do posicionamento para boa representação dos fenômenos.

De tal maneira, considerando as particularidades de um sistema de posicionamento para veículos sensores, cita-se como atividades a serem cumpridas na elaboração de um método orientativo para especificação de um sistema de posicionamento:

- a) Listar os parâmetros definidores de desempenho, também denominados critérios ou figuras de mérito, que melhor descrevam a qualidade de um sistema de posicionamento e os requisitos posicionais associados a cada fenômeno monitorável (por exemplo: acurácia, precisão, disponibilidade, etc.). Para tornar tanto o levantamento de dados da literatura quanto a atividade orientativa mais práticos, os parâmetros serão considerados em termos de níveis (ou faixas de valor) a serem definidos. Por exemplo, a acurácia no posicionamento pode ser tratada nas seguintes faixas ou níveis: pontual, da faixa de trânsito, da rua ou da vizinhança. Imagina-se, dessa forma, trazer maior significado às características de cada técnica no contexto dos transportes.
- b) Reunir as iniciativas levantadas na literatura de uso do veículo-sensor e listas de serviços ITS para compor uma lista de possíveis atividades de sensoriamento baseadas em veículo (exemplo: serviço de identificação de placas, em tempo real ou não). Estas são classificadas de acordo com a natureza da variável monitorada, similar ao apresentado na Seção 4.1.1, e descritas em termos dos demais elementos que a compõem, como a aplicação que utilizará os dados, o cenário em que ocorre e o modo de transporte. Além disso, deve-se estabelecer os níveis de qualidade no posicionamento a serem atendidos (requisitos) para cada parâmetro de desempenho e para cada variável monitorada. A fonte das informações será majoritariamente o conjunto de dados existentes na literatura (exemplo:

serviço de monitoramento da irregularidade longitudinal da via requer acurácia posicional ao nível da faixa de rolagem e disponibilidade ao longo de todo o trajeto)

- c) Caracterizar as técnicas de posicionamento em termos dos parâmetros definidores de desempenho e das faixas previamente definidas (exemplo: posicionamento por GNSS integrado a INS pode oferecer acurácia ao nível da faixa com disponibilidade total). Mais uma vez, a fonte será o conjunto de dados da literatura.

Como produto final, pretende-se obter um método que contribua para a identificação de quais tecnologias existentes seriam mais adequadas para cada atividade de monitoramento. Destaca-se que, uma vez que novas tecnologias possam surgir e tecnologias atuais possam ser aprimoradas, o método proposto tem seu maior mérito não na prescrição das tecnologias, mas sim na orientação de como fazê-la, destacando os parâmetros que deveriam ser considerados e os passos recomendados para uma escolha criteriosa. Ressalta-se que essa análise de adequação atende critérios somente técnicos, sabendo-se que na prática a escolha tecnológica pode depender de outros fatores não técnicos ou de demais especificidades de um contexto.

Para ressaltar a importância de um método orientativo, citam-se erros usualmente cometidos na prescrição de tecnologias de posicionamento. Na literatura do veículo-sensor, é possível citar a não discussão da disponibilidade do posicionamento para determinados serviços não críticos. Em cenários urbanos reais, um serviço de identificação de placas como o proposto por Eriksson et al. (2008), cuja posição do veículo é obtida por posicionamento GPS absoluto simples, não funcionaria de forma adequada em áreas de sombra GNSS. Ainda que não interfira na operação viária ou represente riscos, esse fato representaria um decréscimo da qualidade do sistema proposto e a necessidade de inspeção complementar de placas nessas áreas de sombra. Na prática, um sistema de monitoramento que teria como vantagem a ubiquidade não a concretiza. Outra questão relevante é a necessidade de discussão dos requisitos posicionais do ponto de vista do usuário da fonte de dados. Por exemplo, o parâmetro integridade não é percebido de forma direta pelo usuário, mas apenas por meio de seu efeito na disponibilidade do sistema coletor de dados.

5.2 PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO POSICIONAMENTO

Considerando as diretrizes estabelecidas na seção anterior, a especificação de um sistema de posicionamento inicia-se com a definição de quais parâmetros melhor descrevem o desempenho desse sistema. Como citado na seção anterior, Groves (2008), Hofmann-Wellenhof; Lichtenegger e Wasle (2007), Ochieng e Sauer (2002) e Skog e Handel (2009) recomendam o uso de acurácia, integridade, disponibilidade e continuidade como parâmetros de desempenho do posicionamento para serviços críticos em segurança. Hofmann-Wellenhof; Legat e Wieser (2003), de forma genérica, citam parâmetros adicionais como precisão, capacidade, cobertura, dimensionalidade, confiabilidade e taxa de atualização.

Diferentemente da navegação crítica, é possível afirmar que a atividade de sensoriamento de uma variável é similar ao mapeamento de uma região ou de um fenômeno que nela ocorre. O que se busca é obter um dado, seja topográfico ou relacionado a outro fenômeno, e posicioná-lo no espaço, atividade realizada ou não em tempo real a depender da aplicação. Assim, as normas e a literatura vinculadas à avaliação da qualidade cartográfica também podem fornecer subsídios para a discussão dos parâmetros de desempenho em posicionamento. As normas técnicas dedicadas análise de qualidade cartográfica (SHI; FISHER; GOODCHILD, 2005; JAKOBSSON; GIVERSEN, 2009; BRAVO; SLUTER, 2015; MINISTÉRIO DA DEFESA, 2016a), derivadas da ISO 19157, diferenciam parâmetros de qualidade posicional e parâmetros de qualidade semântica. Os primeiros são relacionados à acurácia posicional, avaliada por meio de análises de tendência¹⁷ e precisão¹⁸. A qualidade semântica, por sua vez, considera a análise dos seguintes parâmetros: completude¹⁹, consistência lógica²⁰, acurácia temática²¹,

¹⁷ Erro sistemático, igual à diferença da média das observações para o valor de referência (MONICO et al., 2009).

¹⁸ Dispersão das medidas em relação à média, associada a erros aleatórios (MONICO et al., 2009).

¹⁹ Análise da omissão (ausência) ou comissão (excesso) de feições, atributos e relacionamentos (NOGUEIRA JÚNIOR, 2003; DEVILLERS; JEANSOULIN, 2013; BRASIL, 2016b).

²⁰ Correção quanto ao cumprimento das regras lógicas da estrutura dos dados, dos atributos e das relações topológicas (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2016b)

²¹ Correção no preenchimento e na interpretação dos atributos (DEVILLERS; JEANSOULIN, 2013; MINISTÉRIO DA DEFESA, 2016b).

linhagem²² e acurácia temporal²³. Considerando o veículo-sensor, os parâmetros geométricos, a completude, a consistência lógica (quanto à topologia) e a acurácia temporal teriam relação direta com o desempenho do sistema de posicionamento.

A partir dessas duas visões distintas sobre a qualidade posicional, associadas a dois diferentes contextos, espera-se obter subsídios para a escolha dos parâmetros quando analisado o contexto do veículo-sensor. Considerando o grande número de possíveis parâmetros de desempenho do posicionamento e as variações de significados desses termos, a presente pesquisa adota os seguintes critérios na escolha dos parâmetros a serem discutidos:

- a) Tangibilidade da análise por meio da revisão bibliográfica realizada e de levantamento bibliográfico complementar. Ou seja, quais são os parâmetros cujo valor (ou faixa de valores) pode ser claramente definido apenas com as informações já contidas na literatura, sem necessitar de resultados complementares de testes.
- b) Sobreposição conceitual. Uma vez que há diferentes definições para um mesmo parâmetro e há parâmetros que conceitualmente podem abarcar outros, a pesquisa procura evitar a superposição de conceitos. Busca-se, além de clareza e simplificação conceitual, tratar os parâmetros a partir do ponto de vista do usuário do veículo-sensor enquanto fonte de dados. Desta forma, justifica-se o tratamento de parâmetros como confiabilidade e integridade apenas em termos de seu efeito na disponibilidade, parâmetro mais concreto do ponto de vista do usuário dos dados.

Além de definir os parâmetros, a pesquisa também estabeleceu quais seriam seus valores possíveis. Mostra-se impraticável o estabelecimento de valores absolutos para definir o nível desejado ou oferecido segundo um parâmetro, uma vez que o desempenho esbarra em características específicas do cenário de operação, sendo mais comum a adoção de faixas de valores prováveis (KARIMI, 2011). Desta forma,

²² Descrição das fontes de dados, dos métodos e dos processos usados na criação do produto cartográfico (NOGUEIRA JÚNIOR, 2003; DEVILLERS; JEANSOULIN, 2013).

²³ Exatidão e consistência da medição de tempo, além da validade temporal dos dados (NOGUEIRA JÚNIOR, 2003; MINISTÉRIO DA DEFESA, 2016b).

em vez de especificar valores pontuais, decidiu-se descrever cada parâmetro de desempenho em termos de faixas que possuam sentido concreto no domínio dos transportes. Por exemplo, ao analisar a acurácia, serão definidas faixas de valores associados ao meio no qual o transporte se dá: ao nível pontual, da faixa de rolamento, da rua, do quarteirão e da vizinhança. Como vantagem adicional, tem-se maior facilidade na descrição dos requisitos associados a um sistema sensor em termos dessas faixas, uma vez que elas são as unidades espaciais de ocorrência dos fenômenos no cenário dos transportes.

Uma vez que as tecnologias de posicionamento não respeitam exatamente essa divisão em faixas, o trabalho irá categorizá-las da forma mais favorável dentro do que a literatura julga possível, uma vez que esse método não procura especificar a tecnologia, mas sim levantar eventuais candidatas a serem estudadas em etapas posteriores de um processo de especificação concreto. Assim, ressalta-se mais uma vez que estes requisitos não são absolutos ou um fim em si mesmos, mas buscam tão somente orientar os desenvolvedores de sistemas de posicionamento. Considera-se que testes específicos e considerações pontuais devem ser realizados de forma a garantir adequação ao cenário efetivo do serviço e às restrições não técnicas, como as de ordem econômica e de legislação.

A seguir, serão descritos os parâmetros de desempenho considerados na dissertação e as faixas definidas.

5.2.1 Acurácia

Acurácia é o grau de conformidade da solução calculada à posição real ou de referência (JCGM, 2008). A acurácia de um sistema de posicionamento ou de navegação é usualmente apresentada como uma medida estatística de erro²⁴ associada, unidimensionalmente, a um intervalo de confiança de 95% (HOFMANN-WELLENHOF; LEGAT; WIESER, 2003). Dessa forma, a presente dissertação

²⁴ Segundo a ISO 5725, a acurácia não é uma grandeza e não se exprime numericamente. O erro de medida é a grandeza que permite afirmar se uma medida é acurada ou não, sendo composto pelo erro sistemático e pelo erro aleatório (JCGM, 2008).

sempre considerará a medida do erro segundo esses critérios.

Mikhail; Ackermann e Leberl (1978) apresentam acurácia e precisão como conceitos dissociados. Para esses autores, acurácia estaria associada à diferença da média de uma série de medidas repetidas para o valor real ou de referência, grandeza igual à tendência (erro sistemático) e inversamente proporcional à exatidão. Por sua vez, a precisão se relacionaria com a dispersão de uma série de medidas em relação ao seu valor médio, decorrente dos erros aleatórios.

Contudo, a definição tradicional de acurácia de Gauss (MIKHAIL; ACKERMANN; LEBERL, 1978) e adotada pela ISO 5725, pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (JCGM, 2008), por Monico et al. (2009), por Gemael; Machado e Wandresen (2015) e pelo Plano Federal de Radionavegação dos EUA (DOD; DHS; DOT, 2014) considera que a análise da acurácia leva em conta tanto a tendência quanto a dispersão. Dessa maneira, na ausência de erros sistemáticos e grosseiros, acurácia e precisão são iguais.

Considerando que a definição literal de acurácia leva em conta a conformidade à referência e não apenas a distância, a presente pesquisa adota como correta a definição de acurácia que incorpora as medidas de tendência e dispersão. Como enfatizado por Monico et al. (2009), dois estimadores que forneçam a mesma média mas dispersões diferentes não podem ser considerados idênticos quanto à acurácia. Para ilustrar essa conclusão, considere-se a Figura 8. Os estimadores 1 e 2 apresentados oferecem mesma média mas diferentes dispersões em torno do valor médio. É trivial verificar que, ao se tomar uma única medição de cada um desses estimadores, é mais provável que o valor dado pelo estimador 1 esteja mais próximo do valor real do que o oferecido pelo estimador 2. Em outras palavras, como a acurácia é a conformidade em relação ao valor real, o estimador 1 encontra-se mais conforme ao valor real por estar mais próximo em maior frequência. Vale citar que referências como Wolf e Ghilani (1996) e Hofmann-Wellenhof; Lichtenegger e Wasle (2007) utilizam esse exemplo para ilustrar, de forma errada, estimadores de igual acurácia (na realidade, exatidão ou tendência) e diferentes precisões.

Figura 8 - Ilustração do conceito de acurácia utilizando alvos. O valor real é representado pelo centro do alvo e os tiros são os valores de medição dos estimadores

Fonte: próprio autor (2017)

Para a análise da acurácia, a presente pesquisa propõe a seguinte divisão em níveis:

- i. Nível pontual – erro de medida abaixo de 0,5 m.
- ii. Nível da faixa – erro entre 0,5 e 1,5 m. Considerando larguras típicas de faixas de rolamento ou o espaçamento típico entre vias férreas, trata-se de erro que permite determinar corretamente por qual faixa de rolamento ou via férrea se trafega (SHLADOVER; TAN, 2006; DURAZO-CARDENAS et al., 2014; LEE; OH; GERLA, 2014).
- iii. Nível da rua – erro de 1,5 a 10 m. Adota-se esse limiar superior por ser valor tipicamente associado à técnica de posicionamento absoluto simples por GNSS (DOD; DHS; DOT, 2014). Além disso, considerando possíveis variações na largura de ruas, avenidas e rodovias, trata-se de faixa de erro que permitiria definir em qual arco da malha viária se está trafegando (LEAHY; JUDD; SHORTIS, 1993).
- iv. Nível da vizinhança – erros superiores a 10 metros, determinando a posição apenas em termos da região aproximada na qual o veículo está.

Esses níveis ou faixas buscam representar a unidade espacial de ocorrência de um

fenômeno a ser monitorado, concepção similar à identificada por Longley et al. (2013) como unidade de análise. Além disso, busca lidar com o fato de as características de sistemas de posicionamento serem apresentadas apenas em termos de sua ordem de grandeza, devido à influência de diferentes fatores variáveis para diferentes tipos de serviço de transporte. Assim, sendo este um método meramente orientativo, espera-se análise detalhada das tecnologias candidatas mais viáveis para cada cenário em etapas posteriores de uma atividade de especificação concreta.

5.2.2 Disponibilidade

Disponibilidade é a porcentagem do tempo durante a qual o sistema está disponível para uso. Trata-se de parâmetro que influencia diretamente a completude dos dados coletados. É função das características físicas do ambiente de operação e das capacidades técnicas do sistema de operar da maneira especificada, estando diretamente relacionada com a cobertura, continuidade, integridade, confiabilidade e capacidade do sistema (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2007; DOD; DHS; DOT, 2014; SKOG; HANDEL, 2009). Como se trata de método orientativo, esses parâmetros serão tratados somente de acordo com seu impacto na disponibilidade. Imagina-se mais prático realizar a análise dessa maneira, uma vez que esses parâmetros são caracterizados por uma porcentagem de tempo, assim como a disponibilidade, ou por uma limitação espacial que, no contexto de objetos móveis, também se traduz em restrição temporal. Além disso, do ponto de vista das exigências associadas a um dado serviço, esses subparâmetros são percebidos como tempo sem disponibilidade de um serviço.

A acurácia também afeta a disponibilidade se considerado que um sistema oferecendo acurácia inferior à desejada está, na verdade, indisponível para uso (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2007). Contudo, a acurácia é descrita por uma medida de erro em unidade de distância e por um intervalo de probabilidade, sendo mais adequadamente tratada de forma separada.

O presente trabalho define os seguintes níveis para a disponibilidade:

- i. Quase total/total: solução de posicionamento disponível em porcentagem de tempo superior a 99,7%, limiar associado por (DOD; DHS; DOT, 2014) a serviços críticos quanto à segurança.
- ii. Alta: indisponibilidade pontual tolerável sem perda significativa da qualidade do sistema de sensoriamento. Como limiar, adota-se o valor especificado como disponibilidade média global do sistema GPS: aproximadamente 95% (OCHIENG; SAUER, 2002).
- iii. Intermediária: a solução de posicionamento está indisponível em considerável parte do tempo no cenário considerado, isto é, está disponível entre 84 e 95% do tempo devido às restrições do ambiente. Trata-se dos valores, respectivamente, da disponibilidade estimada para o pior caso regional e da média global para o sistema GPS (OCHIENG; SAUER, 2002)
- iv. Baixa: disponibilidade inferior a 84% do tempo.

5.2.3 Taxa de atualização

A taxa de atualização refere-se ao número de soluções independentes de posicionamento por unidade de tempo (DOD; DHS; DOT, 2014). Destaca-se que essa frequência de aquisição diferencia-se tanto da frequência de registro dos dados quanto da frequência de envio dos dados (RODRIGUES; CUGNASCA; FILHO, 2009).

O presente trabalho define as seguintes faixas:

- i. Alta: superior a 1 Hz (intervalo igual ou inferior a 1 segundo). A taxa de 1 Hz é definida como valor limítrofe por ser a mínima oferecida pelos receptores GNSS (DOD; DHS; DOT, 2014). Tipicamente, esses receptores, a depender de sua qualidade, oferecem taxas entre 1 e 20 Hz, descrevendo a trajetória dos veículos em alta resolução espaço-temporal.

- ii. Média: intervalo entre 1 e 10 segundos. O intervalo de 10 segundos é apontado por Hao et al. (2017) como valor limítrofe para identificação bem-sucedida de arcos da malha viária percorridos ao longo de um deslocamento. Isso se justifica, como apontado por Quiroga e Bullock (1998), pelo fato de o intervalo entre pontos consecutivos deve ser menor que metade do tempo decorrido no menor segmento de viagem considerando dimensões típicas de quadras viárias.
- iii. Baixa: intervalo superior a 10 segundos, resultando em valores considerados esparsos para a maioria das atividades de sensoriamento efetuadas ao ambiente viário.

5.2.4 Tempo para determinação da posição

O tempo para determinação da posição do veículo define-se em:

- i. Posicionamento em tempo real: o sistema de posicionamento deve fornecer soluções concomitantemente ao deslocamento do veículo (WADE; SOMMER, 2006) e à atividade de sensoriamento. Associado a serviços também em tempo real, como aqueles críticos em segurança ou de informação relacionados às condições viárias.
- ii. Posicionamento não realizado em tempo real: solução de posicionamento pode ser pós-processada, assim como os dados do sensoriamento. Associado a serviços cartográficos, por exemplo, por realizarem processamento dos dados sensorizados em momento posterior à coleta.

5.3 REQUISITOS POSICIONAIS PARA SERVIÇOS DE SENSORIAMENTO BASEADOS EM VEÍCULOS

A partir da caracterização do estado da arte no campo dos veículos-sensores, o

trabalho buscará definir quais são os requisitos posicionais associados a cada variável monitorada, ou seja, qual nível de desempenho é exigido do posicionamento para satisfatório funcionamento do serviço.

Voltando à analogia cartográfica estabelecida no capítulo anterior, podemos identificar uma gradação de produtos cartográficos em termos de escala e finalidade que se traduz em gradação similar da qualidade requerida. Por exemplo, mapas meramente informativos são menos exigentes quanto à acurácia geométrica. Por outro lado, produtos da cartografia sistemática²⁵, ou seja, mapeamentos, cartas e plantas que atendam às normas técnicas da cartografia nacional, exigem maior rigor quanto à qualidade do produto. Além disso, a qualidade exigida aumenta conforme a finalidade e o aumento da escala cartográfica considerada (ABNT, 2003).

Considerando esse fato sob o conceito do veículo-sensor, a pesquisa identifica que a qualidade requerida para o sistema de posicionamento deste está condicionada por:

- a) Finalidade do serviço proposto;
- b) A variação espaço-temporal do fenômeno monitorado, decorrente da natureza da variável;
- c) Cenário (ambiente físico) por onde o veículo trafega;
- d) Modo de transporte.

Dessa forma, todo serviço de sensoriamento baseado em veículos pode ser descrito por essas quatro componentes: finalidade da aplicação, natureza da variável, cenário e modo de transporte. O cenário e o modo de transporte são fatores autoexplicativos e serão detalhados posteriormente. Para melhor explicar o tratamento da questão espacial em termos da variação espaço-temporal e da finalidade do serviço, cita-se o universo das variáveis ambientais. Dentre as comumente monitoradas em sistemas baseados em veículos, é possível distinguir

²⁵ Cartografia sistemática é a representação no plano de uma porção da superfície terrestre que atende a padrões e linguagem técnica. Se opõe à cartografia temática, que não possui padronização das representações gráficas, mas apenas princípios a serem seguidos (ARCHELA, 1996; SANTOS et al., 2010).

duas variáveis cuja variância espaço-temporal e relevância no ambiente urbano difere sobremaneira: ozônio e temperatura. Enquanto o ozônio varia pouco na escala da cidade, com variações significativas de sua concentração ocorrendo na escala dos quilômetros (RAY, 2001; LEE, 2003), as temperaturas podem apresentar diferenças significativas, da ordem de até 4º C, da borda para o interior de uma quadra (WENG; LU; SCHUBRING, 2004). Tendo em conta a sua finalidade, o monitoramento das concentrações de ozônio, por outro lado, seria mais exigente quanto à completude se considerado um sistema de alerta de riscos à saúde. A temperatura, por sua vez, pode ser usada tanto em atividades de mapeamento de ilhas de calor, exigentes quanto à acurácia posicional, ou em atividade de mera informação ao usuário, pouco exigente. Análise similar será feita para o detalhamento das demais variáveis a partir dos artigos levantados e de bibliografia complementar.

A variação temporal do fenômeno monitorado, por sua vez, também condiciona a taxa de atualização, com intervalo compatível a variações significativas no tempo. Além disso, a representação de elementos estáticos ou perenes teria maior tolerância à indisponibilidade (se não causada integralmente pelo cenário) em relação aos fenômenos dinâmicos quando considerada possível visita posterior ao ponto sem dados. Fora do escopo do presente trabalho, a variação temporal também condicionaria parâmetros associados à rede de veículos-sensores, e não apenas à atividade de posicionamento, como a taxa de revisita a um ponto e a taxa de penetração do sistema, isto é, a proporção de veículos com a tecnologia de sensoriamento considerada.

A seguir, os fatores que descrevem um serviço de sensoriamento baseado em veículos e definidos pela presente dissertação serão descritos em termos de requisitos posicionais ou de restrições a uso de determinada tecnologia.

5.3.1 Finalidade do serviço

O trabalho propõe a seguinte classificação quanto à finalidade de um serviço de sensoriamento baseado em veículos-sensores:

- a) Alertas: serviços em tempo real associados a elementos que interferem diretamente na operação veicular ou na sua segurança, como serviços de alerta de colisão (SHLADOVER; TAN, 2006), de notificação de acidentes (PIRAN; MURTHY; BABU, 2011) ou de localização e mapeamento simultâneos (HEIRICH; ROBERTSON; STRANG, 2013; MUNGUÍA et al., 2016) para veículos com grau de autonomia. Possuem maior criticidade nos parâmetros de desempenho, exigindo altas acurácia posicional e disponibilidade, bem como soluções de posição em tempo real. Quanto à continuidade, dependerá da natureza da variável monitorada.
- b) Cartografia: serviços de representação sistemática dos elementos existentes no ambiente pelo qual o veículo trafega. Essa modalidade de serviço não está associada à operação veicular e possui maior criticidade na qualidade geométrica (GROVES, 2013; HUNG; KING; CHEN, 2015), com exigência em acurácia variando de acordo com a escala cartográfica utilizada mas usualmente se situando ao nível do ponto. É mais flexível quanto à disponibilidade, uma vez que possível incompletude pode ser sanada por novas passagens de um veículo por uma região, a depender da taxa de penetração do sistema, ou por levantamento complementar usando técnicas tradicionais em áreas de indisponibilidade. Além disso, não se faz necessário posicionamento em tempo real por lidar com informações perenes e que podem ser pós-processadas. Assim como no caso dos serviços de alerta, a exigência em continuidade está vinculada à variável monitorada.
- c) Informação ao usuário: fornecimento de informações não críticas a usuários, diretamente relacionadas aos serviços de transportes ou não. Por usuário, entende-se qualquer indivíduo consumidor de informações de serviços genéricos, não se restringindo ao usuário de serviços de transporte. Como exemplos de serviços, pode-se citar sistemas de informação da qualidade do ar e meteorológicos (HASENFRATZ et al., 2015) e sistemas de informação ao usuário do transporte público (WILLIAMS, 2008) São pouco críticos em termos dos parâmetros de desempenho do sistema de posicionamento. Ainda assim, como discutido por (BEN-ELIA et al., 2013; GROVES, 2013), há a limitação de usabilidade de um sistema de acordo com a qualidade

oferecida. Dessa forma, a depender das características da variável monitorada, o sistema deve atender a um mínimo de desempenho que ainda o torne atrativo e útil para o usuário.

5.3.2 Variável a ser sensoriada

Segundo a natureza de cada variável, a dissertação propõe a seguinte classificação:

a) Variáveis da infraestrutura:

- i. Elementos pontuais do pavimento cuja existência no pavimento é prevista e perene. Nesta categoria, estão as juntas de dilatação, lombadas, tachões, tachinhas e dispositivos de transição em cabeceiras de obras-de-arte especiais. Estão normalmente vinculadas a serviços de mapeamento ou informação (MUKHERJEE; MAJHI, 2016), podendo eventualmente ser associadas a serviços de alerta no contexto de veículos autônomos (CHOI et al., 2012). Para as aplicações menos exigentes, seria necessário no mínimo acurácia posicional ao nível da rua (ERIKSSON et al., 2008).
- ii. Defeitos pontuais no pavimento, como panelas e trincas (trilho ou pavimento rodoviário). Podem estar relacionados a serviços de informação ao usuário (ERIKSSON et al., 2008; MEDNIS; ELSTS; SELAVO, 2012) ou de alerta (CHOI et al., 2012), a depender do grau de severidade de um defeito ou do grau de autonomia do veículo. Por serem elementos desejavelmente transitórios, ainda que possam ser visualizados em mapas, não estão associados a atividades de cartografia propriamente dita, diferenciando-os dos elementos pontuais. A acurácia desejada é similar àquela dos elementos pontuais, estando no mínimo ao nível da rua (ERIKSSON et al., 2008; MADLI et al., 2015).
- iii. Elementos contínuos do pavimento. Trata-se da descrição das condições de elementos contínuos que constituem o pavimento, tais

como a camada de rolamento do pavimento asfáltico, os trilhos ferroviários ou a própria geometria viária. Suas características, nesse caso, são descritas de forma contínua na malha viária e não apenas por um ponto. Como exemplos, tem-se a irregularidade longitudinal (IRI) (BRIDGELALL et al., 2016) e a corrugação de trilhos (MORI et al., 2010). Uma vez que os dados de qualidade do pavimento, seja ferroviário ou rodoviário, são dependentes de características variáveis ao nível da faixa, como volume e composição do tráfego (BERNUCCI et al., 2006; PITA, 2006), a acurácia posicional desejada também estaria ao nível da faixa.

- iv. Elementos pontuais da sinalização viária. Trata-se dos elementos da sinalização vertical, isto é, placas de trânsito ou sinais ferroviários, da mesma maneira que elementos pontuais da sinalização horizontal, como faixas de travessia de pedestres. Essa variável é de interesse na construção de inventários da infraestrutura viária (HIGUERA DE FRUTOS; CASTRO, 2014), atividade de cartografia que exigiria acurácia ao nível do ponto (DURAZO-CARDENAS et al., 2014). Ao mesmo tempo, poderia compor serviço de informação ao condutor ou serviço de alerta, a depender do grau de automação do veículo. Outro ponto de atenção é a influência da validade espacial de uma placa de trânsito nos requisitos posicionais. Por exemplo, placas de orientação de destino podem ser válidas apenas para uma faixa, como aquelas associadas a retornos ou bifurcações. Ao mesmo tempo, placas são dispostas na via a uma certa distância de antecipação do fenômeno por ela indicado, garantindo tempo para leitura e tomada de decisão (CONTRAN, 2005) .
- v. Elementos contínuos da sinalização viária. São considerados os elementos da sinalização horizontal que são contínuos, como as linhas de demarcação da faixa de trânsito. Também é variável relevante em inventários da infraestrutura viária (HIGUERA DE FRUTOS; CASTRO, 2014), além da possibilidade de compor serviço de informação ao condutor ou serviço de alerta a veículos com certo grau de automação. Para tornar essa informação útil, a natureza

desse tipo de sinalização, usado para demarcar faixas de trânsito, exigiria acurácia posicional no mínimo a esse nível.

- vi. Obras de arte especiais. Considera-se o monitoramento das condições estruturais de pontes, viadutos e túneis, atividade pouco discutida na literatura até o momento e cujo mérito foi abordado por Hester e Gonzales (2017). A princípio, o comportamento dessa variável seria semelhante àquele dos defeitos pontuais no pavimento.
- vii. Iluminação pública. É uma variável cuja informação, a princípio, não seria utilizada pelos condutores, sendo levantada apenas usualmente para fins cartográficos (KUMAR et al., 2016). Dessa forma, seria desejável acurácia ao nível pontual.

b) Variáveis de tráfego

- i. Segurança e fiscalização. Prevenção e notificação de acidentes, bem como detecção de ocorrências que interfiram nas condições de segurança. Como exemplo, cita-se sistema de identificação de existência de água/gelo na pista (YAMADA et al., 2001), de prevenção de colisões em ambiente rodoviário (SHLADOVER; TAN, 2006), de identificação da partição de composições ferroviárias (SCHOLTEN; WESTENBERG; SCHOEMAKER, 2009; ACHARYA; SADHU; GHOSHAL, 2011), de notificação de acidentes (PIRAN; MURTHY; BABU, 2011) e de reconstituição de colisões para fins forenses (TADIC et al., 2017). Esses serviços possuem maior criticidade quanto aos parâmetros de desempenho do posicionamento, com acurácia situando-se ao nível da faixa ou melhor, disponibilidade quase total e posicionamento contínuo e em tempo real.
- ii. Nível de serviço de vias e tempos de viagem. Trata-se das variáveis associadas às condições de fluidez do tráfego. Considera-se tanto a estimativa de densidades e fluxos (SANGUESA et al., 2015; SEO; KUSAKABE; ASAKURA, 2015) quanto o cálculo de tempos de viagem (TURNER; HOLDENER, 1995). São informações menos críticas

quanto ao posicionamento, servindo unicamente como informação ao condutor ou ao gestor do tráfego, seja em tempo real ou não

c) Variáveis ambientais (em sentido estrito):

- i. Condições climáticas. Refere-se à descrição da condição atmosférica em termos de parâmetros meteorológicos como temperatura, umidade, vento, pressão atmosférica e outros parâmetros relacionados (BOURCIER et al., 2003). Exclui-se, portanto, serviços que consideram o impacto na operação dos transportes, tratados neste trabalho como associados à segurança do tráfego e, portanto, mais críticos.

Variações de temperatura do ar de 1° a 3° C são consideradas significativas quanto ao conforto humano (GONÇALVES; BODE, 2015). No ambiente urbano, variações de 4° C podem ocorrer em poucos metros devido ao contraste entre áreas arborizadas e áreas construídas de pouca cobertura vegetal, as chamadas ilhas de calor de escala local (WENG; LU; SCHUBRING, 2004). Outras variáveis da condição climática, como umidade e vento, também sofrem variação significativa devido a esse fenômeno (BORGES, 2009). No ambiente rural, ocorrência de similar magnitude se dá pelo contraste entre áreas arborizadas e áreas de solo exposto ou de pastagem altamente degradada (SOUSA; FERREIRA, 2012). Dessa forma, para a atividade de mapeamento de ilhas de calor, por exemplo, seria desejável acurácia posicional na escala da rua. Para atividades de mera informação ao usuário, compreende-se não ser necessário tal nível de acurácia. Quanto a continuidade, taxa de atualização e tempo para cálculo da posição, trata de conjunto de variáveis menos crítico.

- ii. Poluição do ar. Trata-se da descrição da condição atmosférica em termos da concentração de poluentes ou da medição da poluição sonora. Serviços dessa natureza, como aqueles descritos em Hu et al. (2011) e Hasenfratz et al. (2015), normalmente alimentam sistemas de informação pouco críticos em posicionamento. Ainda assim, a caracterização do comportamento da concentração de poluentes (ou

dos níveis de ruído) e sua relação com níveis de tráfego exigiria nível de acurácia dependente da variabilidade espacial do poluente em questão. Como exemplos extremos, cita-se o ozônio, pouco variável na escala urbana (RAY, 2001), e a concentração de material particulado, de grande variabilidade no ambiente urbano (MUELLER et al., 2016). Em casos de monitoramento da qualidade do ar em túneis, seria questão de saúde pública (CHOW; CHAN, 2003) e cenário restritivo para a maior parte das tecnologias de posicionamento, há maior criticidade quanto ao posicionamento.

- d) Entorno. Considera-se o levantamento de construções, vegetação e/ou linhas de alta-tensão, ou seja, elementos no entorno do veículo e que não impactam diretamente a sua operação. Usualmente, trata-se de atividade cartográfica (HAALA et al., 2008), incluindo o levantamento de modelos tridimensionais desses elementos. Desta forma, trata-se de atividade crítica em acurácia posicional.

5.3.3 Cenário do serviço

Para descrever os cenários quanto à presença de elementos circundantes ao veículo, a dissertação seguirá o conceito de fator de visão do céu (*Sky view factor*, SVF) tradicionalmente adotado em climatologia urbana (HÄMMERLE et al., 2011). O fator de céu visível é um parâmetro adimensional da fração de céu visível em uma dada localidade, com valores variando de 0 a 1 (OKE, 1981). Para o cálculo, considera-se uma semiesfera centrada no ponto de análise como representativa do céu. Essa esfera divide-se em superfícies livres (céu visível) e superfícies de obstrução. Matematicamente, o fator de céu visível é igual à integral (área) da superfície de céu visível sobre a área total da semiesfera. Chapman; Thornes e Bradley (2002) propuseram uso dos dados GPS (DOP, intensidade dos sinais recebidos e número dos satélites diretamente visíveis) na identificação do SVF para aplicações na Geografia, reconhecendo o vínculo entre o fator de visão do céu e as condições de recepção dos sinais de satélites.

Neste trabalho, se utilizará o conceito de SVF como forma simples de descrever o cenário da mobilidade, uma vez que a diferenciação usual entre os cenários urbano, interurbano e rural baseia-se na função dos territórios e não necessariamente na existência de obstáculos. Svensson (2004) propõe uma classificação da estrutura urbana de acordo com o valor de céu visível, utilizada como base para a proposta de classificação abaixo:

- a) Em túnel: sem visão de céu. Cenário extremo e descrito com fator de visão do céu igual a 0.
- b) Densamente construído/densamente arborizado: ambiente com alta densidade de obstáculos, como cânions urbanos ou áreas densamente arborizadas. Fator de visão do céu de até a 0,6.
- c) Pouco construído/pouco arborizado: menor densidade de obstáculos. Fator de visão do céu entre 0,6 e 0,8.
- d) Aberto: com pouca ou nenhuma obstrução. Fator de visão do céu correspondente varia de 0,8 a 1.

5.3.4 Modo de transporte

- a) Rodoviário:
 - i. Rota fixa: serviço de transporte de programação horária e itinerário pré-determinado, usualmente realizando embarques e desembarques em pontos específicos (APTA, 1996). Nessa categoria, estão os ônibus do serviço de transporte coletivo. Ainda que haja alterações operacionais programadas ou emergenciais decorrentes de interdição de ruas, na quase totalidade do tempo os veículos seguem pelo itinerário pré-fixado. Trata-se, do ponto de vista do posicionamento, de uma restrição a ser adotada pelo algoritmo de correspondência ao mapa (*map matching*). Além disso, facilita a implantação de sistemas de posicionamento baseados em marcadores de referência e passagens em pontos de checagem (RODRIGUES; CUGNASCA;

FILHO, 2009).

- ii. Rota não fixa: serviço de transporte cujas rotas e horários não são programados (APTA, 1996). Estão nessa categoria os veículos de transporte individual ou coletivo privado e de serviços de transporte de resposta à demanda, como táxis.
- b) Ferroviário: por princípio, o transporte ferroviário possui rota fixa, considerando tanto o transporte ferroviário de trens de passageiro e de carga, os Veículos leves sobre Trilhos (VLT) e os *tramways* (APTA, 1996). Ressalta-se que no caso dos dois últimos, a infraestrutura viária pode ser parcialmente compartilhada com o transporte rodoviário.

5.4 CARACTERIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO QUANTO A DESEMPENHO

Esta seção buscará consolidar as informações coletadas na literatura acerca dos sistemas de posicionamento veicular e complementar o estudo através de revisão bibliográfica adicional, a fim de relacionar tecnologias não empregadas nas iniciativas levantadas nos itens anteriores. Será realizada uma caracterização das tecnologias em termos de sua tecnologia-base e dos parâmetros de desempenho.

5.4.1 Técnicas baseadas em GNSS

As técnicas de posicionamento baseadas nos *Global Navigation Satellite Systems* são:

- a) Posicionamento absoluto simples: técnica em tempo real na qual o receptor GNSS, de posição inicialmente desconhecida, mede as pseudodistâncias para quatro ou mais satélites e calcula sua posição através da trilateração. Oferece erro horizontal igual ou superior a 10 metros (nível da vizinhança) em áreas com alguma sombra ao GNSS e degradação da qualidade do

posicionamento devido ao bloqueio de sinais e o efeito do multi-caminho. Pode atingir erros ao nível da rua em áreas sem obstrução ao sinal (OCHIENG; SAUER, 2002).

Quanto à disponibilidade, os sistemas GNSS são projetado para operação em escala global (GROVES, 2008). São indisponível em cenários de bloqueio total aos sinais GNSS ou tem disponibilidade prejudicada em cenários com existência de bloqueios ao sinal (DURAZO-CARDENAS et al., 2014). Além disso, o uso de receptores multi-constelação pode contribuir na melhora da disponibilidade e da acurácia (ANGRISANO et al., 2006). A taxa de atualização desses sistemas pode superar o valor de 1 Hz (DOD; DHS; DOT, 2014).

A utilização da correspondência ao mapa (*map matching*) pode levar a acurácia superior, tendo como limite o nível da rua ou, no caso de serviços de transporte em corredor isolado e apenas um grau de liberdade, o nível da faixa. A integração com um sistema inercial de navegação, por sua vez, torna o sistema de posicionamento disponível mesmo em regiões sem recepção dos sinais GNSS na totalidade do tempo. Além disso, quando utilizados sensores inerciais de alto desempenho e custo, é possível obter melhor acurácia posicional nessa integração, com erro abaixo do metro (QUDDUS; OCHIENG; NOLAND, 2007a). Como limitação, cita-se a deriva associada aos sensores inerciais e o consequente aumento na incerteza da posição conforme se aumenta o período de indisponibilidade do GNSS.

- b) A-GNSS: GNSS assistido, técnica de posicionamento absoluto na qual dados suplementares (dados orbitais dos satélites, frequência dos sinais, posição aproximada e/ou tempo preciso) são enviados ao receptor por meio de canal alternativo de comunicação, como a rede de telefonia celular ou a *internet*. Como resultado, tem-se o cálculo da posição de forma mais rápida e viabilizado mesmo quando da recepção de sinais GNSS mais fracos, em cenários restritivos (DIGGLEN, 2009). Dessa forma, em termos de parâmetro de posicionamento, tem-se a melhora da disponibilidade em relação ao posicionamento absoluto simples.
- c) DGNSS: técnica de posicionamento diferencial que utiliza receptor-base em

ponto de coordenadas conhecidas para cálculo e transmissão de correções a receptores em deslocamento (*rover*). Essa correção diferencial pode se dar nas coordenadas ou nas medidas das pseudodistâncias (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2007; MONICO, 2007). Em relação ao posicionamento absoluto, há ganho em acurácia, com erro posicional situando-se entre 1 e 2 metros (nível da faixa viária) (OCHIENG; SAUER, 2002). O desempenho da técnica depende do comprimento da linha-base, isto é, distância entre os receptores móvel e fixo, que para melhor aproveitamento da técnica não deve ultrapassar 200 km (MONICO, 2007). Além disso, pode realizar posicionamento em tempo real ou pós-processado.

- d) GNSS aumentado: são sistemas derivados do conceito do DGNSS nos quais se transmite aos receptores móveis a correção diferencial, alertas de integridade e sinais adicionais (GROVES, 2008). Dessa forma, tem-se aumento de acurácia, com erro ao nível da faixa, e da disponibilidade em relação ao posicionamento absoluto simples.

Há dois tipos de sistemas de augmentação: baseados em solo (*Ground Based Augmentation Systems*, GBAS), com radiotransmissores em terra, e baseados no espaço (*Space Based Augmentation Systems*, SBAS), com uso de satélites geoestacionários para transmissão de informações. Como exemplos desses últimos, cita-se o estadunidense *Wide Area Augmentation System* (WAAS), o europeu *Euro Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS), o japonês *Multifunction Transport Satellite* (MTSat) e o chinês *Satellite Navigation Augmentation System* (SNAS). Os sistemas de augmentação são projetados para operação em área de cobertura bem delimitada, associada à distribuição das estações de referência utilizadas no cálculo das correções e das estações (ou satélites) de transmissão dos dados adicionais.

- e) *Real-Time Kinematic GNSS* (RTK GNSS): técnica de posicionamento relativo em tempo real que utiliza receptor-base em ponto de coordenadas conhecidas para cálculo e transmissão de correções e/ou transmissão de observações aos receptores em deslocamento. Por usar a medida de fase

da onda portadora, trate-se de técnica que oferece maior acurácia em relação ao DGNSS, com erros horizontais da ordem de centímetros (nível pontual) ou, em cenários favoráveis, de milímetros. Para melhor uso da técnica, as linhas-base não devem superar 20 km (OCHIENG; SAUER, 2002; GROVES, 2008).

- f) Posicionamento relativo cinemático pós-processado: técnica similar ao RTK, atingindo acurácia centimétrica (nível pontual) no cenário mais favorável, mas com cálculo da posição posterior à coleta dos dados. É aplicável, portanto, somente a aplicações que não se desenvolvam em tempo real.
- g) PPP: técnica de posicionamento absoluto que utiliza efemérides (dados de órbita dos satélites) precisas e correções dos relógios dos satélites. Pode ser realizada em tempo real, com o uso de efemérides preditas e menos acuradas, ou em pós-processamento, com latências da ordem de 3 horas para as efemérides ultrarrápidas, 17 horas para as efemérides rápidas e 13 dias para as efemérides finais. Melhora-se a acurácia, com possibilidade de erros da ordem de decímetros se utilizadas as efemérides precisas e respeitado tempo para convergência da solução, de aproximadamente 2 horas no modo cinemático (SHEN; GAO, 2002; GROVES, 2008)

5.4.2 Radiolocalização

As técnicas de radiolocalização podem ser baseadas em:

- a) Infraestrutura de telefonia celular. As técnicas de posicionamento baseadas na rede celular usualmente fornecem menor acurácia em relação às técnicas GNSS. São apresentados os seguintes métodos de posicionamento a partir de Estações Rádio Base (ERB) de coordenadas conhecidas (RODRIGUES; CUGNASCA; FILHO, 2009):

- Métodos de posicionamento baseados em única célula²⁶. O método mais simples contempla a identificação da célula (*Cell ID*) na qual o usuário se encontra. Essa técnica pode ser melhorada a partir de recursos como a setorização da célula, permitindo determinação do ângulo de chegada do sinal (*angle of arrival*), e a medição de tempo de propagação do sinal (*timing advance*), viabilizando cálculo da distância. A acurácia no posicionamento é dependente da dimensão da célula. Ainda assim, no contexto mais favorável, o erro em posição é da ordem de dezenas de metros, ou seja, sempre ao nível da vizinhança.
- Métodos de posicionamento baseados em mais de uma célula. Utilizando pelo menos três estações para cálculo da posição, esses métodos também se baseiam na mensuração do tempo de propagação do sinal (*time of arrival*) empregando tecnologia mais sofisticada do que daquela do *timing advance*. Os erros são superiores a 30 m, com posicionamento sempre ao nível da vizinhança.

Trata-se de técnicas de boa funcionalidade em cenários de restrição à recepção de sinais GNSS, como cânions urbanos e áreas completamente fechadas. Contudo, erros da ordem de dezenas de metros oferecem acurácia posicional sempre na faixa da vizinhança, mesmo se considerada possível correspondência a mapa.

- b) Infraestrutura própria de radiocomunicação. Considera-se a utilização das estações de comunicação utilizadas para o serviço de transporte através do qual o veículo trafega. Conhecendo-se as coordenadas das estações e os tempos de propagação dos sinais, calcula-se a posição do veículo através da trilateração. A acurácia oferecida é baixa, com erros superiores a 30 m (DURAZO-CARDENAS et al., 2014). Outra desvantagem é o custo de

²⁶ Célula é a área de cobertura associada a uma Estação Rádio Base (ERB) (RODRIGUES; CUGNASCA; FILHO, 2009)

implantação e manutenção do sistema se a infraestrutura de comunicação não for preexistente. Como possível vantagem em relação às demais técnicas, tem-se o uso de infraestrutura já projetada para correto funcionamento no cenário onde o serviço de transporte se desenvolve e, por consequência, maior garantia de disponibilidade.

5.4.3 Dispositivos de proximidade

Os dispositivos de proximidade usualmente empregados para a atividade de posicionamento são balizas (*transponders*) e etiquetas/leitores RFID. Essa técnica posiciona o veículo a partir da interação eletromagnética entre o veículo e dispositivos fixos de coordenadas conhecidas. Trata-se, na forma mais básica, de técnica em tempo real descontínua, com taxa de atualização dependente do espaçamento entre dispositivos e da velocidade do veículo. Para posicionamento contínuo, faz-se necessário realizar navegação estimada (*dead reckoning*) usando os pontos de interação com os dispositivos como posições iniciais (HOFMANN-WELLENHOF; LEGAT; WIESER, 2003; DURAZO-CARDENAS et al., 2014)

A técnica apresenta-se praticamente sem erro posicional no momento da passagem sobre o dispositivo, com degradação da acurácia conforme o veículo se distancia devido à deriva característica dos sensores inerciais e demais sensores de movimento. A acurácia do sistema, portanto, depende da qualidade desses sensores e do espaçamento adotado entre os dispositivos de via. Além disso, a necessidade de equipamento instalado em via aumenta a garantia de disponibilidade do serviço de posicionamento ao mesmo tempo que exige maior investimento em implantação e manutenção (DURAZO-CARDENAS et al., 2014).

6 ESTUDO DE CAMPO

Uma vez discutidos os conceitos relacionados ao veículo-sensor, a relevância do posicionamento nesse contexto e um método orientativo para especificação de técnicas de posicionamento para esses veículos, a pesquisa se propõe a realizar estudo de campo de um serviço de sensoriamento baseado em veículo. Dessa forma, pretende-se estudar a viabilidade de método de identificação de lombadas a partir de telefone móvel embarcado e registro dos dados de seus sensores, notadamente o acelerômetro triaxial e o receptor GNSS.

Neste capítulo, inicialmente, apresenta-se os trabalhos levantados na literatura que propõem sistemas similares. A seguir, considerando a viagem experimental e empregando as ferramentas do método orientativo proposto (Capítulo 5), descreve-se o serviço e discute-se a questão do posicionamento em termos de natureza da variável sensoriada, da natureza do serviço proposto, do cenário e do modo de transporte usado na coleta dos dados. Posteriormente, baseando-se na decomposição de um sistema de veículos-sensores em subfunções (Capítulo 2), descreve-se as técnicas usadas na coleta, na transmissão e no tratamento dos dados. Por fim, analisa-se a viabilidade do serviço proposto quanto à acurácia na identificação de lombadas e à adequação da técnica de posicionamento utilizada ao grau de exigência posicional do serviço.

6.1 TRABALHOS RELACIONADOS

Diversas iniciativas levantadas na literatura e descritas no Capítulo 3 se dedicaram ao levantamento de elementos e defeitos pontuais no pavimento rodoviário empregando acelerômetros. Em uma das primeiras iniciativas bem-sucedidas nesse sentido, Eriksson et al. (2008) realizam contribuições relevantes quanto à resposta veicular aos diferentes fenômenos do pavimento. Restringindo o escopo do de seu trabalho à detecção de buracos, esses autores adotaram os seguintes filtros para tratamento dos dados de aceleração:

- Velocidade: eliminação de dados associados a velocidades muito baixas ou nulas, removendo eventos como batidas de porta e passagens por guias em entradas de estacionamento.
- Filtro passa-alta: remoção de dados de baixa frequência dos sinais de aceleração lateral e vertical, subtraindo a influência da aceleração do veículo e de mudanças de direção.
- Picos de aceleração vertical: seleção dos dados com picos, em valor absoluto, da aceleração vertical. Trata-se de característica notável das anomalias de maior dimensão no pavimento viário.
- Relação entre as acelerações vertical e lateral: anomalias transversais à via, como lombadas e juntas de dilatação, impactam os dois lados de um veículo de forma mais uniforme que as painelas. Assim, a identificação de buracos deve desprezar picos absolutos de aceleração vertical que não estejam associados a um pico (também absoluto) de aceleração lateral.
- Relação entre velocidade e pico de aceleração vertical: são rejeitadas as identificações de anomalia nas quais a velocidade é superior a um dado fator multiplicado pelo pico de aceleração vertical. Busca-se, desta forma, desconsiderar picos de aceleração gerados por pequenas anomalias devido à alta velocidade.

Seraj et al. (2014) e Vittorio et al. (2014) se dedicam a identificação de elementos e defeitos pontuais no pavimento utilizando acelerômetros, giroscópios e receptores GNSS de *smartphones* em vez de sensores especialmente embarcados no veículo. Utilizando, respectivamente, aprendizagem computacional e análise de picos em impulso vertical, demonstrou-se a viabilidade de sensores de menor custo como os existentes em *smartphones*. Mukherjee e Majhi (2016), por sua vez, restringem a aplicação dos telefones móveis apenas à identificação de lombadas (*road bumps*). Baseado na identificação do pico teórico em aceleração vertical, o algoritmo foi testado quanto à sua viabilidade apenas em uma lombada-teste. Contudo, como principal contribuição, tem-se a busca por uma resposta teórica associada à lombada e sua comparação com dados de campo.

Bridgelall et al. (2016) também utilizam o *smartphone* para monitoramento da

infraestrutura, desta vez na estimativa do IRI de trechos viários. Para auxílio ao posicionamento, seriam utilizados marcadores inerciais de referência, isto é, elementos transversais à via, de posição conhecida e cuja resposta veicular seja claramente identificável no sinal de aceleração vertical resultante. No caso desse artigo, os marcadores inerciais utilizados nos testes foram juntas de transição entre trechos asfálticos e trechos em pavimento de concreto.

No estudo proposto pela presente dissertação, é realizada uma adaptação ao contexto urbano brasileiro, considerando as características geométricas das lombadas (CONTRAN, 2016) e as variações na qualidade do pavimento, fatores preponderantes na discussão de um método identificador de lombadas (MUKHERJEE; MAJHI, 2016).

6.2 DESCRIÇÃO DO SERVIÇO DE SENSORIAMENTO

A seguir, serão apresentados os elementos que compõem o serviço de sensoriamento de lombadas proposto nessa dissertação. Adota-se as ferramentas de caracterização de serviços apresentadas no Capítulo 5, isto é, sua descrição em termos de quatro componentes: variável a ser sensoriada, natureza do serviço de sensoriamento, cenário e modo de transporte.

6.2.1 Variável sensoriada

Elementos pontuais da infraestrutura, segundo classificação adotada na dissertação, as lombadas são ondulações transversais à via empregadas para redução de velocidades (CONTRAN, 2016). Em termos físicos, uma lombada é uma elevação de concreto ou asfalto com geometria especificada pelo Código de Transito Brasileiro de acordo com as características da via a ser instalada (Quadro 3). Trata-se de ferramenta de tráfego comumente usada no Brasil para reduzir risco potencial de acidentes cujo principal fator seja o excesso de velocidade.

Quadro 3 - Tipos de lombada de acordo com características da via

Tipo de Lombada	Velocidade máxima de travessia da lombada (km/h)	Tipo de via	Comprimento (m)	Altura (m)
A	30	Rodovia em trecho urbanizado, via coletora ou via urbana local	3,70	Entre 0,08 e 0,10
B	20	Via urbana local sem operação regular de transporte coletivo	1,50	Entre 0,06 e 0,08

Fonte: adaptado de (CONTRAN, 2016)

A Resolução 600 do CONTRAN (2016) exige, para instalação da lombada, realização de estudo técnico de engenharia de tráfego indicando a imperativa necessidade desse dispositivo e a inexistência de alternativas no cenário considerado, bem como autorização expressa da autoridade de trânsito. O cuidado com a aplicação das lombadas justifica-se por seu potencial na geração de desconforto ao motorista, além de possíveis danos à suspensão veicular, perda de controle quando atravessada a altas velocidades e atrasos excessivos (INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS, 2009). Além disso, a regulamentação brasileira proíbe a utilização de tachas e tachões em vias públicas com a função de redutores de velocidades.

6.2.2 Natureza do serviço

A princípio, a atividade de identificação de lombadas poderia servir tanto para serviços cartográficos quanto para serviços de informação ao usuário. Contudo, como posto no Capítulo 5, Seção 5.3, um serviço cartográfico exigiria posicionamento acurado ao nível pontual (erro abaixo do metro). Identificou-se no Capítulo 5, Seção 5.4, que o posicionamento GNSS absoluto simples, com ou sem correspondência ao mapa, não poderia oferecer o nível de acurácia desejado para essa segunda proposta de serviço. Dessa forma, empregando posicionamento por receptor GNSS de celular, considera-se apenas serviços com finalidade de informação ao usuário.

Como descrito no item anterior, lombadas são elementos que impactam

sobremaneira a atividade de condução de veículos. Por consequência, o mapeamento desses elementos viários tem mérito e poderia, por exemplo, compor os dados de aplicativos de auxílio à navegação como o *Waze*, o *Here* e o *Google Maps*, ou mapeamentos colaborativos como o *OpenStreetMap*²⁷.

6.2.3 Cenário

Os levantamentos foram realizados na Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira (CUASO), o *campus* da Universidade de São Paulo no bairro do Butantã, cidade de São Paulo. A base cartográfica da CUASO, chamada *AtlasUSP* e de Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) classe A e escala 1:1.000 (NERO, 2005), possui mapeamento das lombadas dessa região e possibilita análise da qualidade dos dados coletados em relação a uma referência. Está mapeado na base da USP um total de 35 lombadas, enquanto o registro manual escrito durante a viagem e a inspeção visual por meio do *Google Maps* (GOOGLE, 2017a) contabilizou 37 lombadas.

Fisicamente, o cenário pode ser caracterizado como diverso, apresentando regiões densamente arborizadas, representando obstáculo considerável à recepção dos sinais GNSS, e regiões com poucas obstruções. As edificações existentes não são elevadas e apresentam grandes recuos, representando interferência menos relevante em comparação à vegetação. As Figuras 9, 10 e 11 ilustram o cenário considerado.

²⁷ Serviços disponíveis em: <https://www.waze.com/pt-BR/livemap> (*Waze*), <https://wego.here.com> (*Here*), <https://www.google.com.br/maps> (*Google Maps*) e <https://www.openstreetmap.org> (*OpenStreetMap*).

Figura 9 - Rua do Matão, Cidade Universitária, em região densamente arborizada

Fonte: Google (2017a)

Figura 10 - Avenida Professor Lineu Prestes, Cidade Universitária, em região com poucas obstruções ao sinal GNSS

Fonte: Google (2017a)

Figura 11 – Comparação entre a quantidade de céu visível em trecho da Rua do Matão, à esquerda, e trecho da Avenida Professor Lineu Prestes, à direita. Fotografias obtidas por câmera com lente do tipo olho de peixe apontada para o zênite

Fonte: próprio autor (2017)

6.2.4 Modo de transporte

Para levantamento dos dados, utilizou-se um dos veículos da linha circular de ônibus 8022, que realiza a ligação entre a estação de metrô Butantã e a CUASO no sentido anti-horário. Para a análise dos dados, será considerada somente a parte do itinerário que se dá no interior da Cidade Universitária, trajeto de 16.134 m para o qual há mapeamento de referência. Cita-se que, para o serviço considerado, há uma dupla passagem por uma das lombadas, totalizando 38 travessias sobre elevações transversais. Foi realizada uma viagem de ônibus pela CUASO no dia 23 de fevereiro de 2017. A Figura 12 apresenta o itinerário do serviço circular de transporte coletivo considerado.

Figura 12 - Itinerário da linha circular de ônibus 8022- Metrô Butantã-Cidade Universitária, em vermelho no mapa

Fonte: próprio autor, a partir de PMSP (2017) e usando o *Google Maps* (GOOGLE, 2017a) como base

6.3 TÉCNICAS DE COLETA E TRANSMISSÃO DOS DADOS

O serviço se baseia na obtenção de aceleração vertical, velocidade, orientação, posição e instante de tempo ao longo do deslocamento de um veículo para identificação de lombadas, viável quanto ao pós-processamento por se tratar de elemento perene da infraestrutura viária. Os dados foram obtidos a partir de um *smartphone*, de marca *Lenovo*, modelo *Vibe K5* e sistema operacional *Android 6.0.1* (*Marshmallow*). O aplicativo adotado para registro dos dados chama-se *AndroSensor*, disponível gratuitamente. Assim, a seguir, serão descritas as técnicas utilizadas para cada subfunção associada ao serviço proposto, nos moldes da divisão em subsistemas estabelecida no Capítulo 2.

6.3.1 Posicionamento

O receptor GNSS do *smartphone* adotado realiza posicionamento por ponto simples e é capaz de rastrear satélites dos sistemas GPS e GLONASS. Dessa forma, para o cenário considerado, espera-se acurácia posicional entre o nível da vizinhança (cenários de restrição à recepção de sinais e sem considerar correspondência ao mapa) e o nível da via (todos os cenários se considerada correspondência ao mapa). Para realização de correspondência ao mapa, se utilizará a camada viária da base cartográfica AtlasUSP.

Para o registro dos dados, adota-se a taxa de atualização de 1Hz, valor máximo para o receptor do telefone móvel. O aplicativo adotado registra a posição em termos de coordenadas geográficas (latitude e longitude) referenciadas ao elipsoide de referência do sistema GPS (*World Geodetic System 84*, WGS84). Além disso, fornece uma estimativa do erro no plano horizontal baseada apenas na qualidade da geometria dos satélites (GOOGLE, 2017b).

Quanto ao tempo, o aplicativo *AndroSensor* utiliza os dados do relógio do celular, de forma a ser possível rotular dados coletados a taxas superiores a 1 Hz, como aqueles provenientes do acelerômetro.

6.3.2 Sensoriamento

Por sensoriamento, compreende-se a coleta dos dados diretamente utilizados para identificação das lombadas. No presente caso, o aplicativo empregado é configurado para o registro dos seguintes dados além da posição:

- Aceleração linear (em m/s^2) nos três eixos, valor que considera a subtração da aceleração da gravidade daquela fornecida diretamente pelo acelerômetro. Esse valor é gerado pelo sistema operacional do celular a partir da fusão dos dados do acelerômetro, do giroscópio e do magnetômetro (GOOGLE, 2017c). Os dados de aceleração são obtidos a uma taxa de 100 Hz, valor máximo para esse sensor.

- Velocidade (em m/s). Para o cálculo da velocidade, o receptor GNSS vale-se do efeito Doppler, isto é, da alteração da frequência do sinal percebida pelo receptor decorrente do movimento relativo entre os emissores (satélites) e o receptor (PETOVELLO, 2015). Os valores são atualizados a uma taxa de 1 Hz, valor máximo para esse receptor GNSS.
- Azimute (em graus). O sistema operacional de um *smartphone* usualmente parte do cálculo da orientação em relação ao Norte Magnético, obtida a partir do magnetômetro e corrigida por dados do acelerômetro quanto à inclinação do aparelho. Depois, usa-se a posição GNSS para obtenção do valor da declinação magnética²⁸, tornando possível o cálculo da orientação em relação ao Norte Verdadeiro (BGS, 2017). Uma vez que cálculo do azimute depende do receptor GNSS, a taxa de atualização máxima é igual a 1 Hz.

O Quadro 4 apresenta as especificações técnicas dos sensores existentes no *smartphone Lenovo Vibe K5* e utilizados na presente pesquisa. Utiliza-se informações disponibilizadas pelo aplicativo usado para registro dos dados.

Quadro 4 - Especificações técnicas dos sensores existentes no *Lenovo Vibe K5* e usados no estudo de campo

Sensor	Fabricante	Amplitude máxima	Resolução
Acelerômetro	Invensense	156,8000 m/s ²	0,0006 m/s ²
Giroscópio	Invensense	2000,00 °/s	0,06 °/s
Magnetômetro	Senodia	3200,0 µT	0,1 µT

Fonte: próprio autor, a partir de (FIVASIM, 2017).

²⁸ Declinação magnética é o ângulo formado entre o Norte Verdadeiro e o Norte Magnético, variando com o local e o tempo (BLITZKOW, 2004).

6.3.3 Comunicação

Uma vez que a lombada é um elemento perene da infraestrutura viária e, por consequência, viabiliza-se o pós-processamento para sua identificação, não se considerou neste estudo de caso a transmissão dos dados coletados. Dessa forma, realizou-se o registro dos dados em arquivo de extensão CSV (*comma separated values*, valores separados por vírgula) e posterior transferência do arquivo para tratamento dos dados.

6.3.4 Descrição do arranjo experimental

O *smartphone* utilizado para coleta dos dados (Figura 13) foi fixado na posição paisagem em uma das janelas do lado esquerdo de um dos ônibus da linha Circular 8022. Como resultado, o eixo x associou-se à aceleração vertical sobre o veículo e o eixo z, à aceleração lateral.

Figura 13 - Orientação dos eixos cartesianos associados ao *smartphone* *Lenovo Vibe K5*. À esquerda, tem-se a visão em perspectiva do celular. À direita, tem-se o celular na posição de fixação na janela do ônibus

Fonte: próprio autor (2017)

Escolheu-se posicionar o aparelho sobre o eixo traseiro (Figura 14), de modo que o máximo deslocamento vertical no celular esteja associado ao máximo deslocamento vertical do eixo traseiro.

Figura 14 – Orientação de fixação do *smartphone*, à esquerda, e posição de fixação no ônibus, à direita e destacado em vermelho

Fonte: próprio autor (2017)

6.4 TÉCNICAS DE TRATAMENTO DOS DADOS

Nesta seção, serão discutidos os tratamentos realizados sobre os dados posicionais e de sensoriamento para a identificação das lombadas.

6.4.1 Dados posicionais

Os dados de aceleração são obtidos a uma taxa de 100 Hz, enquanto a posição GNSS é atualizada somente a cada segundo. Assim, foi necessário interpolar linearmente as coordenadas para os cem registros contidos no intervalo entre duas posições GNSS sucessivas. A interpolação foi realizada diretamente sobre os valores de longitude e latitude, uma vez que a curta distância entre dois pontos sucessivos torna desprezível efeitos da curvatura terrestre (BLITZKOW, 2004).

A interpolação linear é uma das formas de interpolação cinemática mais utilizadas em atividades de posicionamento veicular (LONG, 2015). Para analisar o erro decorrente dessa simplificação, estudou-se um deslocamento hipotético unidimensional entre dois pontos sucessivos. Adotando um espaçamento máximo de

20 metros (taxa de 1Hz e velocidade de 20 m/s) e um valor aceleração no intervalo igual a $1,8 \text{ m/s}^2$ (valor do percentil 95 nos dados coletados), verificou-se que os erros em posição decorrentes da interpolação linear seriam da ordem de 0,2 m, tornando esse método aceitável para o serviço considerado.

Após a interpolação e identificação dos pontos associados às lombadas, será estudada a acurácia do posicionamento sem e com a realização de correspondência ao mapa. Para a realização do *map matching*, se utilizará abordagem geométrica conhecida como ponto-a-ponto, baseada na correspondência da posição GNSS com o ponto mais próximo da malha viária. Trata-se da técnica mais simples de correspondência ao mapa, compatível com o grau de acurácia desejado e a natureza esparsa da ocorrência de lombadas.

6.4.2 Dados de aceleração e velocidade

A passagem de um veículo por uma lombada está associada a características que definem um traço ou uma assinatura em termos das acelerações vertical e lateral do veículo, bem como da velocidade de travessia. Utilizando-se o conjunto de sensores definido para o presente estudo de caso, são esperadas as seguintes respostas à passagem por uma lombada:

- a) Aceleração vertical: uma lombada é, usualmente, uma elevação vertical do pavimento de maior magnitude que as demais irregularidades no pavimento, justificando sua associação a picos, em valor absoluto, de aceleração vertical. Além disso, sabe-se que a segunda derivada do deslocamento vertical de um veículo no tempo está associada à aceleração vertical, a menos dos efeitos dinâmicos decorrentes das velocidades empregadas, da massa e do sistema de suspensão do veículo (SAYERS; KARAMIHAS, 1998). Por consequência, a forma da resposta em aceleração vertical à passagem sobre uma lombada deve possuir, ao menos qualitativamente, comportamento similar à curva obtida da derivada de segunda ordem da função representando o perfil de uma lombada.

Para se obter a forma dessa assinatura, propõe-se a descrição do perfil de

uma lombada em termos de uma função. Baseando-se em Bagnato (1998), DEPARTMENT FOR TRANSPORT (2007) e Mukherjee e Majhi(2016), esse perfil pode ser descrito por uma função senoidal:

$$y(x) = \frac{y_0}{2} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{L} + \frac{\pi}{2}\right), \text{ para } x \in [0, L] \quad (1)$$

onde $y(x)$: deslocamento vertical [m];

y_0 : altura da lombada [m];

L : comprimento da lombada [m];

x : posição longitudinal [m].

Para fins ilustrativos e simplificadores, são adotados os valores especificados na Resolução (CONTRAN, 2016) para uma lombada do tipo A: altura de 0,1 m e comprimento de 3,7 m, além de se considerar velocidade de travessia V constante em 30 km/h (ou 8,3 m/s).

Pode-se considerar que o deslocamento vertical de um eixo veicular no momento de travessia obedece à função associada à lombada. Tomando essa função e substituindo a posição longitudinal x pelo tempo t (sendo $x = V \cdot t$ para V constante), obtém-se a função $y(t)$, igual ao deslocamento vertical durante a travessia pela lombada. Calculou-se a derivada de segunda ordem em relação ao tempo da função $y(t)$ e obteve-se a função associada à aceleração vertical ao longo da passagem pela lombada (Figura 15).

Figura 15 – Gráfico da função representativa do perfil da lombada, em vermelho, e função representativa da aceleração vertical ao longo da travessia, em azul

Fonte: próprio autor (2017)

Em que pesem as simplificações realizadas quanto à não consideração da dinâmica veicular e às possíveis variações de geometria do dispositivo viário, espera-se que a resposta em aceleração vertical à passagem por uma lombada apresente comportamento similar ao apresentado na Figura 15. Isto é, espera-se um pico de aceleração no início da travessia, um vale (mínimo em aceleração) ao se atingir a crista da lombada e um novo pico ao fim da passagem. Outro resultado é a associação entre a crista da lombada (eixo pontilhado na Figura 15) e o ponto de mínimo em aceleração. Essa descrição qualitativa do comportamento da aceleração ao longo da travessia é definida, no presente método, como a assinatura da lombada em aceleração vertical.

Por fim, verifica-se que a simples ocorrência dos picos de aceleração não é fator unívoco para identificação das lombadas em pavimentos em mau estado de conservação. É possível verificar por matemática similar que painéis, por exemplo, podem gerar picos de aceleração vertical de magnitude similar às geradas por lombadas, considerando ainda que passagens por esses defeitos são normalmente realizadas em velocidades

maiores que aquelas em travessias por lombada. Quando tomada a forma da curva em aceleração, a resposta à passagem sobre uma panela é inversa à da lombada, razão pela qual o método se baseará na identificação através da assinatura e não apenas de picos em aceleração.

- b) Aceleração lateral: considerando uma passagem ideal sobre uma lombada, isto é, perpendicular a esse elemento, não haveria resposta do veículo em termos de aceleração lateral ou essa resposta apresentaria valor muito reduzido em relação à aceleração vertical. Desta forma, como apontado por Eriksson et al. (2008), é possível utilizar um limiar de aceleração lateral que diferencia a detecção de uma lombada da detecção de anomalias em forma de ondulação. Na presente pesquisa, será adotado como critério a taxa de aceleração de pico, isto é, se o pico de aceleração lateral em uma dada janela de tempo centrada na passagem pela lombada é inferior a uma porcentagem (a ser definida) da aceleração vertical de pico na mesma janela de tempo. Assim, essa taxa limítrofe é definida como a componente da assinatura da lombada em aceleração lateral. Esse filtro busca eliminar passagens por irregularidades, pressupostas menos regulares geometricamente do que as lombadas. Ao mesmo tempo, a adoção de uma taxa de aceleração lateral em vez de um simples limiar evita a remoção da identificação de lombadas cujo pavimento apresente irregularidades geradoras de aceleração lateral.
- c) Velocidade de passagem: sendo a lombada um dispositivo redutor de velocidades, espera-se que o veículo trafegando sobre esse elemento reduza sua velocidade. Portanto, a travessia não deve ocorrer em velocidade além de um dado limiar a ser determinado. Essa velocidade limítrofe pode ser utilizada, assim, como outra componente da assinatura da lombada. Esse filtro ajuda a eliminar falsos positivos associados aos efeitos dinâmicos das passagens em alta velocidade por irregularidades do pavimento.

A lista a seguir sistematiza a assinatura da lombada identificada nos passos anteriores em uma sequência de filtros a ser utilizada sobre os dados coletados. Os parâmetros serão ajustados a partir dos dados experimentais:

- Passo 1: filtro média móvel (passa-baixa). Filtro indicado para remoção dos ruídos mecânico e elétrico de sinais provenientes de acelerômetros (FREESCALE, 2007). O número de amostras utilizado para o cálculo será definido posteriormente.
- Passo 2: análise dos dados de aceleração vertical para detecção da assinatura de uma lombada. A amplitude da assinatura é definida como a diferença entre as acelerações máxima e mínima quando da passagem por uma lombada. Considerando esse fato, analisam-se os dados de aceleração vertical para detecção de máximos locais (em janela temporal a ser definida, associada ao tempo de passagem por lombada) que sejam sucedidos por mínimos locais em um certo intervalo (janela) de tempo. Posteriormente, calcula-se a amplitude e verifica-se se a mesma ultrapassa um limiar identificador de uma lombada a ser definido.
- Passo 3: remoção das identificações associadas a picos de aceleração lateral. Cálculo da taxa de aceleração lateral, isto é, a relação entre os picos de aceleração vertical e lateral na janela de tempo associada à passagem por uma lombada. Verifica-se se essa relação ultrapassa o limiar a ser determinado.
- Passo 4: remoção das identificações associadas a velocidades altas. Para os pontos identificados, elimina-se aqueles nos quais as velocidades sejam iguais ou superiores a limiar a ser determinado.

Para definição inicial dos parâmetros a serem empregados nos filtros, realizou-se análise preliminar dos dados coletados por meio da plotagem no sistema de informação geográfica *QGIS*. Com o emprego de escala de cores para os registros de aceleração vertical e comparação com o mapeamento de lombadas do AtlasUSP, verificou-se que os picos de aceleração vertical permitiam clara identificação desses elementos apenas em trechos de melhor qualidade do pavimento. Como forma de detalhar a análise, selecionou-se uma das lombadas mais facilmente identificáveis e estudou-se, em detalhes, sua resposta em aceleração (Figura 16).

Figura 16 - Lombada na Rua do Matão, à altura do Parque Esporte para Todos, Cidade Universitária

Fonte: próprio autor (2017)

A Figura 17 mostra o comportamento da aceleração vertical para um intervalo de tempo de 7 segundos e que contém a ocorrência da lombada em questão. É possível verificar que a resposta em aceleração vertical à passagem pela lombada, entre os instantes 6 e 7,5 s, está próxima daquela teoricamente esperada. Também é possível concluir que o primeiro pico positivo é mais facilmente identificável que o segundo, o que leva o presente trabalho a realizar a análise em termos apenas da primeira parte dessa assinatura (entre primeiro pico positivo e vale). Em termos de aceleração lateral, há uma confirmação de sua menor magnitude em comparação ao pico em aceleração vertical. Também se verifica um menor valor da velocidade do veículo no momento de passagem pela lombada em relação à média do intervalo imediatamente anterior (entre 2 e 6 s).

Figura 17 - Assinatura da lombada-exemplo em termos da velocidade e das acelerações vertical e lateral. O filtro média móvel para 40 amostras foi aplicado aos dados de aceleração

Fonte: próprio autor (2017)

Dessa forma, utilizou-se a assinatura associada à lombada obtida na Figura 15 para parametrização inicial dos filtros propostos:

- Média móvel: utilizando-se análise de sensibilidade, isto é, análise do comportamento da curva na variação do número de amostras usadas no cálculo da média móvel, verificou-se que o filtro média móvel aplicado a 40 amostras é o limiar entre a filtragem desejada e a perda de qualidade dos dados.
- Janelas de busca: a primeira janela compreende o intervalo entre o primeiro pico positivo e o pico negativo, associado ao tempo de passagem por uma lombada. Utilizando a lombada-exemplo, verifica-se que uma janela de tempo de 1,5 s (150 amostras) é adequada para avaliação. Essa janela também será adotada para a busca da aceleração lateral máxima e sua comparação com o pico em aceleração vertical. Ao mesmo tempo, a janela adotada para busca de máximos e mínimos locais pode ser, de acordo com a geometria da lombada (Gráfico 1), igual à metade do intervalo entre o máximo e o mínimo em aceleração (0,75 s ou 75 amostras).
- Amplitude em aceleração vertical: superior a 6 m/s^2 .

- Taxa de aceleração lateral: em módulo, o pico da aceleração lateral no intervalo associado à travessia de uma lombada deve ser inferior a 0,3 do pico de aceleração vertical.
- Velocidade: deve ser inferior a 30 km/h.

6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.5.1 Qualidade da identificação de lombadas

Definidos os valores iniciais dos parâmetros, os filtros foram aplicados para os dados da viagem completa, que totalizam mais de 230 mil linhas de dados. Obteve-se taxa de acerto na identificação de 84% (32 acertos em 38 passagens por lombada), com 6 erros de omissão e 8 erros de comissão. Em um segundo passo, os valores dos parâmetros foram ajustados de modo a maximizar o número de identificações corretas e minimizar o número de omissões e comissões. Desta forma, foram adotados os parâmetros finais descritos no Quadro 5.

Quadro 5 - Parâmetros finais dos filtros utilizados

	Parâmetros
Média móvel	40 amostras
Janela de busca (distância entre máximo e mínimo em aceleração vertical, associados à lombada)	1,5 s ou 150 amostras
Janela de busca (busca dos máximos e mínimos locais)	0,75 s ou 75 amostras
Amplitude	$> 5,5 \text{ m/s}^2$
Taxa aceleração lateral de pico	Em módulo, $< 0,3$ vezes aceleração vertical de pico
Velocidade	$< 31,5 \text{ km/h}$

Fonte: próprio autor (2017).

A partir da readequação de parâmetros e limiares de identificação, o método permitiu a detecção adequada de 92% das lombadas do cenário considerado. Não foram identificados erros de comissão, enquanto três lombadas não puderam ser corretamente identificadas (Quadro 6 e Figura 18).

Quadro 6 - Resultado da identificação de lombadas

Quantidade total de lombadas	38
Identificações corretas	35 (92%)
Erros comissão	0
Erros omissão	3 (8%)

Fonte: próprio autor (2017)

Figura 18 – Mapa de lombadas identificadas e não identificadas

Fonte: próprio autor, usando o *Google Maps* (GOOGLE, 2017a) como base

A inspeção visual das três lombadas não identificadas revela a deterioração do pavimento constituinte, perdendo muito de sua altura na faixa de tráfego dos ônibus (faixa de rolamento à direita na Figura 19). Esse tipo de defeito, além de gerar deslocamento vertical menor e considerável deslocamento lateral, similar a defeitos na via, também conduz motoristas a trafegar a uma velocidade maior que a desejada sobre uma lombada, fato verificado em viagens sucessivas pela mesma linha circular. Portanto, verifica-se que a principal limitação desse método de

identificação baseado em acelerômetros de baixo custo reside na inadequação da qualidade do pavimento.

Figura 19 – Lombada não identificada pelo método proposto, localizada na Avenida Professor Mello de Moraes, à altura do Instituto de Psicologia da USP

Fonte: próprio autor (2017)

6.5.2 Qualidade do posicionamento

Uma vez estudada a acurácia do método identificador, o trabalho avalia a qualidade do método de posicionamento utilizado. Serão discutidos os quatro parâmetros definidos nessa dissertação para análise da qualidade em posicionamento: acurácia, disponibilidade, taxa de atualização e tempo para cálculo da posição.

A acurácia posicional pode ser determinada a partir da discrepância entre as coordenadas obtidas na identificação das lombadas e aquelas provenientes da base de dados AtlasUSP. Para permitir a comparação, as coordenadas geográficas associadas aos dados coletado pelo celular foram transformadas em coordenadas projetadas, considerando que o AtlasUSP se apresenta em projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e *datum* oficialmente utilizado no Brasil, o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas em sua realização do ano 2000 (SIGRAS

2000). Para essa atividade de conversão, utilizou-se o Sistema de Informação Geográfica QGIS. Além disso, realizou-se uma numeração das lombadas segundo ordem de ocorrência no itinerário considerado. A Tabela 1 apresenta as discrepâncias encontradas (ΔE e ΔN) em Este (E) e Norte (N). Ressalta-se que as lombadas não identificadas e/ou não mapeadas na base cartográfica AtlasUSP não estão presentes nesta listagem.

Tabela 1 - Discrepâncias no posicionamento das lombadas

ID lombada	BASE ATLAS USP		SISTEMA PROPOSTO		ΔE (m)	ΔN (m)
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)		
2	325072,24	7393471,85	325072,92	7393464,04	0,69	-7,81
3	324353,16	7393809,93	324345,07	7393820,60	-8,09	10,68
5	323585,16	7394229,28	323583,12	7394224,78	-2,04	-4,50
6	323341,96	7393554,65	323342,08	7393551,63	0,12	-3,02
7	323653,83	7393394,04	323653,40	7393393,52	-0,44	-0,52
8	323960,65	7393235,70	323963,50	7393234,63	2,84	-1,07
9	324234,36	7393002,62	324239,03	7392996,82	4,68	-5,80
10	324114,12	7392930,67	324113,95	7392926,34	-0,17	-4,33
11	323990,06	7392856,18	323992,34	7392849,70	2,27	-6,48
12	323904,33	7392804,63	323906,09	7392797,19	1,76	-7,44
13	323733,37	7392702,09	323734,85	7392693,97	1,47	-8,12
14	323529,08	7392579,31	323530,83	7392573,31	1,75	-6,01
17	322471,46	7392471,84	322471,92	7392485,23	0,46	13,38
20	322637,96	7392651,79	322632,98	7392647,18	-4,98	-4,61
21	322497,04	7392858,23	322493,69	7392856,04	-3,34	-2,19
22	322726,86	7393471,43	322730,66	7393468,90	3,79	-2,53
23	322888,66	7393460,68	322882,46	7393457,86	-6,20	-2,82
24	323063,68	7393444,18	323063,44	7393442,41	-0,24	-1,78
27	323535,88	7392977,61	323533,59	7392975,31	-2,29	-2,30
28	323411,24	7392734,45	323407,20	7392739,94	-4,03	5,50
29	323702,72	7392659,06	323703,78	7392652,35	1,06	-6,71
30	323866,58	7392757,55	323869,51	7392750,57	2,92	-6,98
31	323974,55	7392822,27	323974,21	7392816,75	-0,34	-5,53
32	324087,54	7392890,27	324090,11	7392885,84	2,57	-4,43
33	324196,59	7392955,50	324198,87	7392951,69	2,28	-3,81
34	324282,14	7393006,80	324282,64	7393004,52	0,50	-2,28
35	324417,50	7393088,16	324414,53	7393082,89	-2,97	-5,28
36	324819,87	7393054,67	324823,43	7393048,72	3,56	-5,95
Média (μ)					-0,09	-2,96
Desvio-padrão (σ)					3,15	5,09

Fonte: próprio autor (2017)

Considerando que, no presente caso, o desvio-padrão populacional não é conhecido, utiliza-se a distribuição *t* de Student para a distribuição estatística dos erros (MONICO *et al.*, 2009). Considerando também o teste de hipótese apontado em ABNT (2003), verificou-se a não existência de erro sistemático em Este e Norte para 95% de significância. Dessa forma, estima-se que os erros em Este e Norte são inferiores a, respectivamente, 6,43 m ($2,042.\sigma_E$) e 10,39 ($2,042.\sigma_N$) em 95% do tempo. Trata-se de valores associados à acurácia ao nível da rua, desejada para a presente aplicação.

Posteriormente, como forma de associar as posições à malha viária, realizou-se a projeção do erro em cada lombada nos eixos lateral (perpendicular ao eixo viário) e longitudinal (paralelo ao eixo viário). O azimuth *A* do vetor deslocamento sobre uma lombada foi obtido do mapeamento da Cidade Universitária por meio de simples operação de intersecção entre a camada vetorial de lombadas (poligonal) e a camada vetorial do itinerário do ônibus circular (linear). Utilizando-se esse valor, as componentes lateral e longitudinal do erro podem ser calculadas segundo as fórmulas a seguir:

$$\Delta_{longitudinal} = \Delta E.\text{sen}(A) + \Delta N.\text{cos}(A) \quad (2)$$

$$\Delta_{lateral} = \Delta E.\text{cos}(A) - \Delta N.\text{sen}(A) \quad (3)$$

Realizando essa correspondência ao mapa, tem-se a eliminação do erro lateral. Como resultado, a componente restante do erro é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Discrepância longitudinal no posicionamento das lombadas

ID lombada	Azimuth (°)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta_{longitudinal}$ (m)
2	305,3	0,69	-7,81	-5,08
3	299,8	-8,09	10,68	12,32
5	298,1	-2,04	-4,50	-0,33
6	117,7	0,12	-3,02	1,51
7	118,3	-0,44	-0,52	-0,14
8	118,1	2,84	-1,07	3,01
9	239,7	4,68	-5,80	-1,11
10	240	-0,17	-4,33	2,31
11	239,5	2,27	-6,48	1,33
12	239,5	1,76	-7,44	2,26
13	239,4	1,47	-8,12	2,87

continua

continuação				
ID lombada	Azimute (°)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta_{longitudinal}$ (m)
14	239	1,75	-6,01	1,59
17	290,6	0,46	13,38	4,28
20	307	-4,98	-4,61	1,21
21	331,7	-3,34	-2,19	-0,35
22	89,6	3,79	-2,53	3,78
23	95,8	-6,20	-2,82	-5,88
24	96,3	-0,24	-1,78	-0,04
27	162	-2,29	-2,30	1,47
28	194,2	-4,03	5,50	-4,34
29	59,6	1,06	-6,71	-2,48
30	59,3	2,92	-6,98	-1,05
31	60	-0,34	-5,53	-3,06
32	59,6	2,57	-4,43	-0,03
33	59,6	2,28	-3,81	0,03
34	58,7	0,50	-2,28	-0,76
35	59,8	-2,97	-5,28	-5,22
36	118,3	3,56	-5,95	5,96
Média (μ)				0,50
Desvio-padrão (σ)				3,73

Considerando novamente o teste de hipótese apontado em (ABNT, 2003), verificou-se a não existência de erro sistemático para 95% de significância. Assim, estima-se que os erros longitudinais sejam inferiores a 7,62 m ($2,042 \cdot \sigma$) em 95% do tempo.

A indisponibilidade, por sua vez, pode ser calculada como a porcentagem do tempo de viagem sem dados obtidos do receptor GNSS. Na viagem realizada, não houve momentos de indisponibilidade. Para estudo da suscetibilidade à indisponibilidade, a Figura 19 mostra o número de satélites visíveis ao longo da viagem realizada. Verifica-se que os pontos mais vulneráveis à indisponibilidade, segundo esse critério, são aqueles em regiões mais arborizadas da CUASO.

7 CONCLUSÕES

Uma vez cumpridos os objetivos estabelecidos para a presente dissertação, apresenta-se as principais conclusões acerca das atividades realizadas.

7.1 MAPEAMENTO DA LITERATURA

Como resultado do levantamento do estado da arte no campo do veículo-sensor, verificou-se a confirmação da hipótese inicial de falta de discussão aprofundada da importância do posicionamento para a qualidade das informações de saída. Além disso, quando essa discussão ocorre, verifica-se a ocorrência de dois comportamentos opostos:

- Uso pouco crítico do posicionamento absoluto por GNSS ou até mesmo do posicionamento por radiolocalização, notadamente em aplicações não críticas.
- Busca de acurácia e disponibilidade cada vez maiores em serviços de alerta e auxílio ao condutor, considerando também possíveis graus de automação de um veículo.

Contudo, a própria revisão bibliográfica revela a grande diversidade de sistemas sensores propostos e de variáveis sensoriadas, tanto em termos de criticidade (ou exigência) em quando em termos da variabilidade espaço-temporal dos fenômenos monitorados. Essas características condicionam a seleção dos sistemas de posicionamento ou, em caso de sistema já em operação, limitam a utilização dos dados dele afluentes.

7.2 MÉTODO ORIENTATIVO DE ESPECIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE POSICIONAMENTO

O presente trabalho procurou trabalhar nas nuances entre serviços críticos e não críticos, contribuindo para a discussão ao estabelecer método orientativo de escolha das tecnologias de posicionamento em sistemas sensores baseados em veículos, sempre de acordo com as características da variável e do serviço considerado.

Como principal mérito do método orientativo, cita-se a definição de quais parâmetros de desempenho do sistema de posicionamento seriam mais relevantes do ponto de vista de um serviço de sensoriamento baseado em veículos. Assim, explica-se o tratamento de parâmetros como integridade, cobertura e confiabilidade apenas em termos de seu impacto na disponibilidade, uma vez que é essa a característica diretamente percebida pelo usuário do serviço de sensoriamento. Além disso, a definição de faixas para descrição dos parâmetros foi importante para atribuir às faixas típicas encontradas na literatura um sentido físico no contexto da malha viária. Recomenda-se ainda que a temática abordada neste trabalho seja mais discutida no ambiente acadêmico, por entidades interessadas na coleta desse tipo de dados e por fornecedores de serviços de posicionamento, com a finalidade de ampliar a discussão e refinar os parâmetros aqui apresentados.

Outra questão importante tratada pelo método é a decomposição dos serviços de sensoriamento baseados em veículos em quatro fatores: natureza da aplicação, natureza da variável, cenário e modo de transporte. Essa forma de descrever um serviço acaba por evidenciar limitações e potencialidades na aplicação de tecnologias, seja de posicionamento, comunicação ou do sensoriamento propriamente dito.

7.3 ESTUDO DE CAMPO

Por fim, o estudo de campo analisou e confirmou a viabilidade de método identificador de lombadas baseado na coleta e análise de dados provenientes de

sensores de um *smartphone*. Com o auxílio das ferramentas estabelecidas pelo método orientativo proposto, foi possível identificar limitações e potencialidades dessa atividade de sensoriamento em um contexto de má qualidade do pavimento e áreas de sombra ao GNSS. De forma concreta, identificou-se que o método de identificação de lombadas baseado em acelerômetro de aparelho celular é viável, ainda que o mau estado de conservação do pavimento constituinte desses elementos da via seja dificultador a ser considerado. Além disso, verificou-se que, para o cenário adotado, o uso da solução GNSS oferecida pelo *smartphone* é adequada para a representação desse fenômeno em acurácia, disponibilidade, taxa de atualização e tempo para obtenção da solução.

Além disso, ainda que o desenvolvimento de um sistema identificador de lombadas propriamente dito não seja o escopo da presente pesquisa, identifica-se a necessidade de viagens adicionais para verificação da repetitividade do método empregado. Em passo posterior, também se imagina viável a automatização dessa identificação. Dessa forma, identifica-se como relevante oportunidade de pesquisa o prosseguimento desses estudos, buscando aprimorar o método e o sistema de identificação de lombadas.

REFERÊNCIAS

- ABDELHAMID, S.; HASSANEIN, H. S.; TAKAHARA, G. Vehicle as a mobile sensor. **The 9th International Conference on Future Networks and Communications**, v. 34, p. 286–295, 2014.
- ABDELHAMID, S.; HASSANEIN, H. S.; TAKAHARA, G. On-Road Caching Assistance for Ubiquitous Vehicle-Based Information Services. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 64, n. 12, p. 5477–5492, 2015.
- ABNT. **Projeto de Norma - Controle de Qualidade Posicional em Cartografia – Procedimento**. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.
- ACHARYA, A.; SADHU, S.; GHOSHAL, T. K. Train localization and parting detection using data fusion. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 19, n. 1, p. 75–84, 2011.
- AERDE, M. V.; MACKINNON, G.; HELLINGA, B. The Generation of Synthetic O-D Demands from Real-Time Vehicle Probe Data : Potential and Limitations. **Vehicle Navigation and Information Systems Conference**, 1991.
- AHMAD, A.; PAUL, A.; RATHORE, M. M.; CHANG, H. Smart cyber society: Integration of capillary devices with high usability based on Cyber-Physical System. **Future Generation Computer Systems**, v. 56, p. 493–503, 2015.
- ALAM, N.; DEMPSTER, A. G. Cooperative positioning for vehicular networks: Facts and future. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 4, p. 1708–1717, 2013.
- ALESSANDRONI, G.; CARINI, A.; LATTANZI, E.; FRESCHI, V.; BOGLIOLO, A. A Study on the Influence of Speed on Road Roughness Sensing: The SmartRoadSense Case. **Sensors**, v. 17, n. 2, 2017.
- ANAC. **Sistema de aumento baseado em terra**. Disponível em <www2.anac.gov.br/anacpedia/por_esp/tr470.htm>. Acesso em: 22 jun. 2017
- ANGRISANO, A.; GAGLIONE, S.; GIOIA, C.; ROBUSTELLI, U.; VULTAGGIO, M. **Algorithms for GNSS Positioning in Difficult Scenario**. University of Naples, Italy, 2006.
- APTA. **Transit fact Book**. Washington DC: American Public Transit Association, 1996.
- ARCHELA, R. S. Cartografia no Pensamento Geográfico. **Bibliografia da Cartografia: bibliografias comentadas**, 1996.
- ASTM. **Standard Terminology of Facility Management**. ASTM International, 2013a.
- ASTM. **Standard Practice for Marking Medical Devices and Other Items for Safety in the Magnetic Resonance Environment**. ASTM International, 2013b.
- ASTM. **Definitions and Sample Standards**. West Conshohocken, PAASTM International, 2016.
- BAGNATO, V. S. Problemas Interessantes em Física: O Quebra-Molas. **Revista Brasileira de Ensino em Física**, v. 20, n. 4, p. 422–424, 1998.

- BAI, F.; KRISHNAMACHARI, B. Spatio-Temporal Variations of Vehicle Traffic in VANETs: Facts and Implications. **Proceedings of the sixth ACM International Conference on Vehicular Ad Hoc Networks**, p. 43–52, 2009.
- BAI, F.; KRISHNAMACHARI, B. Exploiting the wisdom of the crowd: Localized, distributed information-centric VANETs. **IEEE Communications Magazine**, v. 48, n. 5, p. 138–146, 2010.
- BALLARD, D. H.; BROWN, C. M. **Computer Vision**. Prentice Hall, 1982.
- BALLARDINI, A. L.; FONTANA, S.; FURLAN, A.; LIMONGI, D.; SORRENTI, D. G. A Framework for Outdoor Urban Environment Estimation. **IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC**, v. 2015–Octob, p. 2721–2727, 2015.
- BAZZI, A.; ZANELLA, A. Position Based Routing in Crowd Sensing Vehicular Networks. **Ad Hoc Networks**, v. 36, p. 409–424, 2015.
- BEN-ELIA, E.; DI PACE, R.; BIFULCO, G. N.; SHIFTAN, Y. The impact of travel information' s accuracy on route-choice. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 26, p. 146–159, 2013.
- BERNUCCI, L. B.; AUGUSTO, J.; CERATTI, P.; BARBOSA, J.; LAURA, S.; GORETTI, M.; MOTTA, D. **Pavimentação Asfáltica**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.
- BEUGIN, J.; MARAIS, J. Simulation-based evaluation of dependability and safety properties of satellite technologies for railway localization. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 22, p. 42–57, 2012.
- BGS. **Magnetic Chips**: how does a smartphone work out True North? Nottingham, UKBritish Geological Survey, 2017.
- BLITZKOW, D. Sistema de Posicionamento por Satélites GPS. In: **Informações Espaciais II - Notas de aula**. Almada, 2004. p. 9–39.
- BORGES, M. G. E. **Influência do ambiente construído no microclima: estudo de caso no campus da Universidade Federal de Santa Catarina**. 2009. Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- BOURCIER, T.; VIBOUD, C.; COHEN, J.-C.; THOMAS, F.; BURY, T.; CADIOT, L.; MESTRE, O.; FLAHAULT, A.; BORDERIE, V.; LAROCHE, L. Effects of air pollution and climatic conditions on the frequency of ophthalmological emergency examinations. **British Journal of Ophthalmology**, v. 87, n. 7, p. 809–811, 2003.
- BOURDEAU, A.; SAHMOUDI, M.; TOURNERET, J. Tight integration of GNSS and a 3D city model for robust positioning in urban canyons. **ION GPS: International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation**, v. 2012, p. 1263–1269, 2012.
- BRADLEY, J. M.; ATKINS, E. M. Optimization and control of cyber-physical vehicle systems. **Sensors**, v. 15, n. 9, p. 23020–23049, 2015.
- BRAVO, J. V. M.; SLUTER, C. R. O problema da qualidade de dados espaciais na era das informações geográficas voluntárias. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 1, p. 56–73, 2015.
- BRIDGELALL, R.; HUANG, Y.; ZHANG, Z.; DENG, F. Precision enhancement of pavement roughness localization with connected vehicles. **Measurement Science**

and Technology, v. 27, n. 2, p. 25012, 2016.

BVSYS. **RailCheck**. Bremen, Bildverarbeitungssysteme, 2016.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M.; DAVIS, C.; VINHAS, L.; QUEIROZ, G. R. de. **Bancos de Dados Geográficos**. Curitiba: MundoGEO, 2005.

CET. **Especificações técnicas - Sistema de detecção veicular magnético**. São Paulo, Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo, 2015.

CHAPMAN, L.; THORNES, J. E.; BRADLEY, A. V. Sky-view factor approximation using GPS receivers. **International Journal of Climatology**, v. 22, n. 5, p. 615–621, 2002.

CHARBONNIER, P.; TAREL, J.; GOULETTE, F. On the Diagnostic of Road Pathway Visibility. **Transport Research Arena Europe**, n. 1, 2010.

CHEN, L. W.; SHIH, H. W. Finding Lane Positions of Vehicles. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, n. December, p. 70–80, 2015.

CHEN, H.; LAI, C.; SHIH, C. Toward Community Sensing of Road Anomalies Using Monocular Vision. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 8, p. 2380–2388, 2016.

CHOI, J.; LEE, J.; KIM, D.; SOPRANI, G.; CERRI, P.; BROGGI, A.; YI, K. Environment-detection-and-mapping algorithm for autonomous driving in rural or off-road environment. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 13, n. 2, p. 974–982, 2012.

CHOW, W. K.; CHAN, M. Y. Field measurement on transient carbon monoxide levels in vehicular tunnels. **Building and Environment**, v. 38, n. 2, p. 227–236, 2003.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. Da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. **8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolviemnto de Produto - CNGDP 2011**, v. 8, n. 1998, p. 1–12, 2011.

CONTRAN. **Sinalização Vertical de Regulamentação**. Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito - Sinalização Semafórica, 2005.

CONTRAN. **Resolução nº 600 - Estabelece os padrões e critérios para a instalação de ondulação transversal (lombada física) em vias públicas**. CONTRAN, 2016.

CORNICK, M.; KOEHLING, J.; STANLEY, B.; ZHANG, B. Localizing Ground Penetrating RADAR: A Step Toward Robust Autonomous Ground Vehicle Localization. **Journal of Field Robotics**, 2015.

CPTM. **Relatório Técnico - Inspeção de geometria de via com o Carro Controle na Linha 12**. São Paulo, Companhia Paulista de Trens Metropolitanos, 2015.

CUNHA, F.; VILLAS, L.; BOUKERCHE, A.; MAIA, G.; VIANA, A.; MINI, R. A. F.; LOUREIRO, A. A. F. Data communication in VANETs: Protocols, applications and challenges. **Ad Hoc Networks**, v. 44, p. 90–103, 2016.

DAR, K.; BAKHOUYA, M.; GABER, J.; WACK, M.; LORENZ, P. Wireless communication technologies for ITS applications. **IEEE Communications Magazine**, v. 48, n. May, p. 156–162, 2010.

DE CERIO, D.; VALENZUELA, J. Provisioning Vehicular Services and Communications Based on a Bluetooth Sensor Network Deployment. **Sensors**, v.

15, n. 6, p. 12765–12781, 2015.

DE LA ESCALERA, A.; IZQUIERDO, E.; MARTIN, D.; MUSLEH, B.; GARCIA, F.; ARMINGOL, J. M. Stereo visual odometry in urban environments based on detecting ground features. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 80, p. 1–10, 2016.

DENNIS, E. P.; HONG, Q.; WALLACE, R.; TANSIL, W.; SMITH, M. Pavement Condition Monitoring with Crowdsourced Connected Vehicle Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2460, n. 1, p. 31–38, 2014.

DEPARTMENT FOR TRANSPORT. **Local Transport Note 1/07: Traffic Calming**. London, UK, 2007.

DEVILLERS, R.; JEANSOULIN, R. **Fundamentals of Spatial Data Quality**. London, UK: ISTE, 2013. v. 53.

DIGGLEN, F. Van. **A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS**. London, UK: Artech House, 2009.

DIKAIKOS, M. D.; IQBAL, S.; NADEEM, T.; IFTODE, L. VITP: an information transfer protocol for vehicular computing. **VANET '05: Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks**, p. 30–39, 2005.

DOD; DHS; DOT. **Federal Radionavigation Plan**. Washington DC, 2014.

DU, R.; CHEN, C.; YANG, B.; LU, N.; GUAN, X.; SHEN, X. Effective urban traffic monitoring by vehicular sensor networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 64, n. 1, p. 273–286, 2015.

DURAZO-CARDENAS, I.; STARR, A.; TSOURDOS, A.; BEVILACQUA, M.; MORINEAU, J. Precise Vehicle Location as a Fundamental Parameter for Intelligent Self-aware Rail-track Maintenance Systems. **Procedia CIRP: 3rd International Conference on Through-life Engineering Services**, v. 22, p. 219–224, 2014.

ELBERINK, S.; KHOSHELHAM, K.; ARASTOUNIA, M.; DIAZ BENITO, D. Rail Track Detection and Modelling in Mobile Laser Scanner Data. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. II-5/W2, n. November, p. 223–228, 2013.

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA. **Telemetry**. Encyclopædia Britannica, Inc., 1999.

ENGELBERG, T.; MESCH, F. Eddy current sensor system for non-contact speed and distance measurement of rail vehicles. In: BREBBIA J.; ALLAN, R.J.; HILL, G. S. & S. S. (Ed.). **Computers in Railways**. WIT Press, 2000.

ERIKSSON, J.; GIROD, L.; HULL, B.; NEWTON, R.; MADDEN, S.; BALAKRISHNAN, H. The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring. **Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services**, p. 29–39, 2008.

EUROPEAN COMMISSION. **Galileo - The history of Galileo**. Disponível em: <http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo_en>. Acesso em: 20 jul. 2016.

FIVASIM. **AndroSensor - App description**. Disponível em: <<http://www.fivasim.com/androsensor.html>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

FLINTSCH, G. W.; VALERI, S. M.; KATICH, S. W.; IZEPPI, E. D. de L.; MEDINA-FLINTSCH, A. Probe Vehicles Used to Measure Road Ride Quality. **Transportation**

Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2304, n. 1, p. 158–165, 2012.

FRA. Federal Railroad Administration - Track Safety Standards Compliance Manual. v. 2, 2006.

GAUTHIER, B. La Télémétrie Vehiculaire: Une technologie incontournable. **Transport Magazine**, p. 38–39, 2014.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações**: aplicações geodésicas. Editora UFPR, 2015.

GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GOOGLE. **Google Maps - Itinerary Maps**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/dir/>>. Acesso em: 1 fev. 2017a.

GOOGLE. **Google Developers - Location**. Disponível em: <<https://developer.android.com/reference/android/location/Location.html>>. Acesso em: 20 jun. 2017b.

GOOGLE. **Google Developers - Motion Sensors**. Disponível em: <<https://developer.android.com/reference/android/motionsensors.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2017c.

GORRIERI, A.; MARTALÒ, M.; BUSANELLI, S.; FERRARI, G. Clustering and sensing with decentralized detection in vehicular ad hoc networks. **Ad Hoc Networks**, v. 36, p. 450–464, 2014.

GROVES, P. D. **Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems**. London: Artech House, 2008.

GROVES, P. D. The Complexity Problem in Future Multisensor Navigation and Positioning Systems: A Modular Solution. **The Journal of Navigation**, v. 67, n. 2, p. 311–326, 2013.

GROVES, P. D.; JIANG, Z.; WANG, L.; ZIEBART, M. K. Intelligent Urban Positioning using Multi- Constellation GNSS with 3D Mapping and NLOS Signal Detection. **IEEE Transactions On Aerospace**, p. 458–472, 2012.

GRUYER, D.; BELAROUSSI, R.; REVILLOUD, M. Accurate lateral positioning from map data and road marking detection. **Expert Systems with Applications**, v. 43, p. 1–8, 2016.

GU, Y.; HSU, L. T.; KAMIJO, S. Passive sensor integration for vehicle self-localization in urban traffic environment. **Sensors**, v. 15, n. 12, p. 30199–30220, 2015.

GULER, S. I.; MENENDEZ, M.; MEIER, L. Using connected vehicle technology to improve the efficiency of intersections. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 46, p. 121–131, 2014.

HAALA, N.; PETER, M.; CEFALU, A.; KREMER, J. Mobile LIDAR Mapping for Urban Data Capture. **VSM 2008 Conference on Virtual Systems and MultiMedia Dedicated to Digital Heritage**, p. 101–106, 2008.

HÄMMERLE, M.; GÁL, T.; UNGER, J.; MATZARAKIS, A. Introducing a Script for Calculating the Sky View Factor. **ACTA Climatologica Et Chorologica**, p. 83–92,

2011.

HAN, J.; CHEN, A.; LIN, Y. Image-Based Approach for Road Profile Analyses. **Journal of Surveying Engineering**, v. 142, n. 1, p. 1–9, 2016.

HAO, P.; BORIBOONSOMSIN, K.; WU, G.; BARTH, M. J. Modal Activity-Based Stochastic Model for Estimating Vehicle Trajectories from Sparse Mobile Sensor Data. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 18, n. 3, p. 701–711, mar. 2017.

HARRIS, N. K.; GONZALEZ, A.; OBRIEN, E. J.; MCGETRICK, P. Characterisation of pavement profile heights using accelerometer readings and a combinatorial optimisation technique. **Journal of Sound and Vibration**, v. 329, n. 5, p. 497–508, 2010.

HASENFRATZ, D.; SAUKH, O.; WALSER, C.; HUEGLIN, C.; FIERZ, M.; ARN, T.; BEUTEL, J.; THIELE, L. Deriving high-resolution urban air pollution maps using mobile sensor nodes. **Pervasive and Mobile Computing**, v. 16, n. PB, p. 268–285, 2015.

HEIRICH, O.; ROBERTSON, P.; STRANG, T. RailSLAM - Localization of rail vehicles and mapping of geometric railway tracks. **Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation**, p. 5212–5219, 2013.

HESTER, D.; GONZALEZ, A. A discussion on the merits and limitations of using drive-by monitoring to detect localised damage in a bridge. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 90, p. 234–253, jun. 2017.

HIGUERA DE FRUTOS, S.; CASTRO, M. Using smartphones as a very low-cost tool for road inventories. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 38, p. 136–145, 2014.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LEGAT, K.; WIESER, M. **Navigation: principles of positioning and guidance**. Wien: Springer International Publishing, 2003.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems - GPS, GLONASS, Galileo, and more**. Springer-Verlag Wien, 2007.

HU, S. C.; WANG, Y. C.; HUANG, C. Y.; TSENG, Y. C. Measuring air quality in city areas by vehicular wireless sensor networks. **Journal of Systems and Software**, v. 84, n. 11, p. 2005–2012, 2011.

HUANG, T. **Computer Vision: Evolution And Promise**. 19th CERN School of Computing. Geneva, CERN, 1996.

HUBER, W.; LÄDKE, M.; OGGER, R. Extended floating-car data for the acquisition of traffic information. **Proceedings of 6th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS)**, p. 1–9, 1999.

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. **The 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems**, p. 125–138, 2006.

HUNG, R.; KING, B.; CHEN, W. Conceptual Issues Regarding the Development of Underground Railway Laser Scanning Systems. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 1, p. 185–198, 2015.

ICAO. **Manual on Required Navigation Performance (RNP)**. ICAO Publications, 1999.

IEEE. **802.7-1989 - IEEE Recommended Practices for Broadband Local Area Networks**. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1989.

IEEE. **610.12-1990 - IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology**. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1990.

IEEE. **844-1991 - IEEE Recommended Practice for Electrical Impedance, Induction, and Skin Effect Heating of Pipelines and Vessels**. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2000.

IEEE. **1646-2004 - IEEE Standard Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2004.

IEEE. **1902.1-2009 - IEEE Standard for Long Wavelength Wireless Network Protocol**. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2009.

IET. **Jamming and radio interference: understanding the impact**. Disponível em: <<http://www.theiet.org/sectors/information-communications/signal-jamming.cfm>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

ILARRI, S.; HERMOSO, R.; TRILLO-LADO, R.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, M. C. A Review of the Role of Sensors in Mobile Context-Aware Recommendation Systems. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 2015, 2015.

INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS. **Traffic and Safety Information Series**. City of Des Moines, 2009.

ISO; IEC; IEEE. **29148-2011 - ISO/IEC/IEEE International Standard - Systems and software engineering - Life cycle processes - Requirements engineering**. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2011.

JAKOBSSON, A.; GIVERSEN, J. **Guidelines for Implementing the ISO 19100 Geographic Information Quality Standards in National Mapping and Cadastral Agencies**. Eurogeographics, 2009.

JCGM. **Joint Committee for Guides in Metrology - 200:2008 International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms**. Geneva, International Organization for Standardization, 2008.

JO, Y.; RYU, S. Pothole Detection System Using a Black-box Camera. **Sensors**, v. 15, n. 12, p. 29316–29331, 2015.

JOG, G. M.; KOCH, C.; GOLPARVAR-FARD, M.; BRILAKIS, I. Pothole Properties Measurement through Visual 2D Recognition and 3D Reconstruction. **Computing in Civil Engineering**, 2012.

JWA, Y.; SONH, G. Kalman Filter Based Railway Tracking From Mobile Lidar Data. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. II-3/W5, p. 159–164, 2015.

KARIMI, H. A. **Universal Navigation on Smartphones**. Springer US, 2011.

KATICHA, S. W.; EL KHOURY, J.; FLINTSCH, G. W. Assessing the effectiveness of probe vehicle acceleration measurements in estimating road roughness. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 17, n. 8, p. 698–708, 2016.

- KIM, S.; KIM, H.; YOO, W.; HUH, K. Sensor Fusion Algorithm Design in Vehicles Using Laser Scanner and Stereo Vision. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 4, p. 1–13, 2016.
- KLEEMAN, L. Understanding and applying Kalman filtering. **Proceedings of the Second Workshop on Perceptive Systems**, p. 17, 1996.
- KOCH, C.; BRILAKIS, I. Pothole detection in asphalt pavement images. **Advanced Engineering Informatics**, v. 25, n. 3, p. 507–515, 2011.
- KUMAR, S.; DESHPANDE, A.; HO, S. S.; KU, J. S.; SARMA, S. E. Urban Street Lighting Infrastructure Monitoring Using a Mobile Sensor Platform. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 12, p. 4981–4994, 2016.
- LANE, N. D.; MILUZZO, E.; LU, H.; PEEBLES, D.; CHOUDHURY, T.; CAMPBELL, A. T. A survey of mobile phone sensing. **IEEE Communications Magazine**, v. 48, n. 9, p. 140–150, 2010.
- LAUER, M.; STEIN, D. A Train Localization Algorithm for Train Protection Systems of the Future. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 16, n. 2, p. 970–979, 2015.
- LEAHY, F.; JUDD, M.; SHORTIS, M. Measurement of railway profiles using GPS integrated with other sensors. **Proceedings of the IEEE-IEE Vehicle Navigation and Informations Systems Conference**, p. 706–709, 1993.
- LEDERMAN, G.; CHEN, S.; GARRETT, J.; KOVACEVIC, J.; NOH, H. Y.; BIELAK, J. Track-monitoring from the dynamic response of an operational train. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 87, n. A, p. 1–16, mar. 2017.
- LEE, E. H. Use of auxiliary data for spatial interpolation of surface ozone patterns. **Ozone Air Pollution in the Siera Nevada: Distribution and Effects on Forests**, v. Volume 2, p. 165–194, 2003.
- LEE, E. K.; OH, S. Y.; GERLA, M. RFID assisted vehicle positioning in VANETs. **Pervasive and Mobile Computing**, v. 8, n. 2, p. 167–179, 2012.
- LEE, J. S.; CHOI, S.; KIM, S. S.; PARK, C.; KIM, Y. G. A mixed filtering approach for track condition monitoring using accelerometers on the axle box and bogie. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 61, n. 3, p. 749–758, 2012.
- LEE, L. T.; TSANG, K. F. An Active RFID System for Railway Vehicle Identification and Positioning. **International Conference on Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age**, 2008.
- LEE, U.; MAGISTRETTI, E.; ZHOU, B.; GERLA, M.; BELLAVISTA, P.; CORRADI, A. Efficient Data Harvesting in Mobile Sensor Platfrms. **Proceedings of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops**, 2006a.
- LEE, U.; ZHOU, B.; GERLA, M.; MAGISTRETTI, E.; BELLAVISTA, P.; CORRADI, A. Mobeyes: Smart mobs for urban monitoring with a vehicular sensor network. **IEEE Wireless Communications**, v. 13, n. 5, p. 52–57, 2006b.
- LEIRAS, A.; BRITO JR, I. de; PERES, E. Q.; BERTAZZO, T. R.; YOSHIZAKI, H. T. Y. Literature review of humanitarian logistics research: trends and challenges. **Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management**, v. 4, n. 1, p.

95–130, 2014.

LI, L.; QUDDUS, M.; ZHAO, L. High accuracy tightly-coupled integrity monitoring algorithm for map-matching. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 36, p. 13–26, 2013.

LI, Q.; YAO, M.; YAO, X.; XU, B. A real-time 3D scanning system for pavement distortion inspection. **Measurement Science and Technology**, v. 21, p. 15702, 2009.

LI, Y.; TRINH, H.; HAAS, N.; OTTO, C.; PANKANTI, S. Rail Component Detection, Optimization, and Assessment for Automatic Rail Track Inspection. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 15, n. 2, p. 760–770, 2013.

LI, Z.; MOLODOVA, M.; NUNEZ, A.; DOLLEVOET, R. Improvements in Axle Box Acceleration Measurements for the Detection of Light Squats in Railway Infrastructure. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 7, p. 4385–4397, 2015.

LIU, Y.; NIU, J.; LIU, X. Comprehensive tempo-spatial data collection in crowd sensing using a heterogeneous sensing vehicle selection method. **Personal and Ubiquitous Computing**, v. 20, n. 3, p. 397–411, 2016.

LONG, J. A. Kinematic interpolation of movement data. **International Journal of Geographical Information Science**, 2015.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3ª ed., Bookman, 2013.

LUTFU, A.; METIN, K.; DAGLI, M. A.; KUBRA, O. An RFID Supported Train Tracking System for Tram Lines. **IFAC Workshop on Advances in Control and Automation Theory for Transportation Applications**, v. 46, n. 25, p. 129–132, 2013.

MADLI, R.; HEBBAR, S.; PATTAR, P.; GOLLA, V. Automatic detection and notification of potholes and humps on roads to aid drivers. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 8, p. 4313–4318, 2015.

MANZIE, C.; KIM, T. S.; SHARMA, R. Optimal use of telemetry by parallel hybrid vehicles in urban driving. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 25, p. 134–151, 2012.

MARAI, J.; MEURIE, C.; ATTIA, D.; RUICHEK, Y.; FLANCQUART, A. Toward accurate localization in guided transport: Combining GNSS data and imaging information. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 43, p. 188–197, 2014.

MARINOV, M.; HENSEL, S.; STRAUS, T. Eddy current sensor based velocity and distance estimation in rail vehicles. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 9, n. 7, p. 875–881, 2015.

MEDNIS, A.; ELSTS, A.; SELAVO, L. Embedded solution for road condition monitoring using vehicular sensor networks. **2012 6th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2012 - Proceedings**, p. 0–4, 2012.

MESSELODI, S.; MODENA, C. M.; ZANIN, M.; DE NATALE, F. G. B.; GRANELLI, F.; BETTERLE, E.; GUARISE, A. Intelligent extended floating car data collection. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 3, part 1, p. 4213–4227, 2009.

- MIKHAIL, E. M.; ACKERMANN, F.; LEBERL, F. **Observations and Least Squares**. Photogrammetria, 1978. v. 34.
- MINISTÉRIO DA DEFESA. **Norma da Especificação Técnica para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais - Fundamentos Básicos**. Brasília, 2016a.
- MINISTÉRIO DA DEFESA. **Norma da Especificação Técnica para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais - Avaliação da Qualidade**. Brasília, 2016b.
- MOLODOVA, M.; LI, Z.; NÚÑEZ, A.; DOLLEVOET, R. Automatic Detection of Squats in Railway Infrastructure. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 18, n. 1, p. 1980–1990, 2014.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2007.
- MONICO, J. F. G.; DAL PÓZ, A. P.; GALO, M.; DOS SANTOS, M. C.; DE OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciencias Geodesicas**, v. 15, n. 3, p. 469–483, 2009.
- MOREIRA, K. B. R. **O processo de produção e gestão de segurança patrimonial de edifícios residenciais verticais na cidade de São Paulo**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2012.
- MORI, H.; TSUNASHIMA, H.; KOJIMA, T.; MATSUMOTO, A.; MIZUMA, T. Condition Monitoring of Railway Track Using In-service Vehicle. **Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics**, v. 3, n. 1, p. 154–165, 2010.
- MUELLER, M. D.; HASENFRATZ, D.; SAUKH, O.; FIERZ, M.; HUEGLIN, C. Statistical modelling of particle number concentration in Zurich at high spatio-temporal resolution utilizing data from a mobile sensor network. **Atmospheric Environment**, v. 126, p. 171–181, 2016.
- MUKHERJEE, A.; MAJHI, S. Characterisation of road bumps using smartphones. **European Transport Research Review**, v. 8, n. 2, p. 1–12, 2016.
- MUNGUÍA, R.; NUÑO, E.; ALDANA, C. I.; URZUA, S. A Visual-aided Inertial Navigation and Mapping System. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, p. 1, 2016.
- NERI, A. C. **Avaliação da eficácia de medidas de recuperação ambiental em mineração de calcário para cimento**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2007.
- NERO, M. A. **Propostas para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase na componente posicional**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2005.
- NHTSA. **National Highway Traffic Safety Administration Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles**. Washington DC, 2013.
- NOGUEIRA JÚNIOR, J. B. N. **Controle de Qualidade de Produtos Cartográficos**. Universidade Estadual Paulista, 2003.
- OCHIENG, W. Y.; SAUER, K. Urban road transport navigation: Performance of the global positioning system after selective availability. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 10, n. 3, p. 171–187, 2002.
- OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of

scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, n. 3, p. 237–254, 1981.

OLSON, C. F. Probabilistic self-localization for mobile robots. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 16, n. 1, p. 55–66, 2000.

PALAZZI, C. E.; PEZZONI, F.; RUIZ, P. M. Delay-bounded data gathering in urban vehicular sensor networks. **Pervasive and Mobile Computing**, v. 8, n. 2, p. 180–193, 2012.

PETOVELLO, M. G. How does a GNSS receiver estimate velocity? **Inside GNSS**, p. 38–41, 2015.

PIRAN, M. J.; MURTHY, G. R.; BABU, G. P. Vehicular Ad Hoc and Sensor Networks; Principles and Challenges. **International Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing (IJASUC)**, v. 2, n. 2, p. 38–49, 2011.

PIRAN, M. J.; MURTHY, G. R.; BABU, G. P.; AHVAR, E. Total GPS-free localization protocol for vehicular ad hoc and sensor networks (VASNET). **Proceedings - CIMSIm 2011: 3rd International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation**, p. 388–393, 2011.

PITA, A. L. **Infraestructuras Ferroviarias**. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.

PMSP. **GeoSampa - Mapa Digital da Cidade de São Paulo**. Disponível em: <geosampa.prefeitura.sp.gov.br>. Acesso em: 10 fev. 2017.

QUDDUS, M. A.; OCHIENG, W. Y.; NOLAND, R. B. Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 15, n. 5, p. 312–328, 2007a.

QUDDUS, M.; OCHIENG, W. Y.; NOLAND, R. B. Current Map Matching Algorithms for Transport Applications: State-of-the art and Future Research Directions. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2007b.

QUIROGA, C. A.; BULLOCK, D. Travel time studies with global positioning and geographic information systems: an integrated methodology. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 6, p. 101–127, 1998.

RADAK, J.; DUCOURTHIAL, B.; CHERFAOUI, V.; BONNET, S. Detecting Road Events Using Distributed Data Fusion: Experimental Evaluation for the Icy Roads Case. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 1, p. 184–194, 2016.

RAY, J. D. Spatial distribution of tropospheric ozone in national parks of California: interpretation of passive-sampler data. **The Scientific World Journal**, v. 1, p. 483–497, 2001.

RESENDIZ, E.; HART, J. M.; AHUJA, N. Automated visual inspection of railroad tracks. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 2, p. 751–760, 2013.

RODRIGUES, M.; CUGNASCA, C. E.; FILHO, A. P. de Q. **Rastreamento de Veículos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

ROUNDS, S. Part II: Antenna Enhancements - Jamming Protection of GPS Receivers. **GPS World**, 2004.

- RSSB. **Future Traffic Regulation Optimisation (FuTRO) (T952)**. London, UK, 2014.
- SANGUESA, J.; BARRACHINA, J.; FOGUE, M.; GARRIDO, P.; MARTINEZ, F.; CANO, J.-C.; CALAFATE, C.; MANZONI, P. Sensing Traffic Density Combining V2V and V2I Wireless Communications. **Sensors**, v. 15, n. 12, p. 31794–31810, 2015.
- SANTOS, S. D. R.; HUINCA, S. C. M.; MELO, L. F. D. S.; SILVA, M. T. Q. S. DA; DELAZA, L. S. Considerações sobre a utilização do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) nos dias atuais. **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, n. 2001, p. 1–5, 2010.
- SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M. **The little book of profiling**: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles. University of Michigan, 1998.
- SCHOLTEN, H.; WESTENBERG, R.; SCHOEMAKER, M. Sensing train integrity. **Proceedings of IEEE Sensors**, p. 669–674, 2009.
- SEO, T.; KUSAKABE, T.; ASAKURA, Y. Estimation of flow and density using probe vehicles with spacing measurement equipment. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 53, p. 134–150, 2015.
- SERAJ, F.; VAN DER ZWAAG, B. J.; DILO, A.; LUARASI, T.; HAVINGA, P. RoADS: A Road Pavement Monitoring System for Anomaly Detection Using Smart Phones. **Big Data Analytics in the Social and Ubiquitous Context**, p. 128–146, 2014.
- SEURING, S.; GOLD, S. Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 17, n. 5, p. 544–555, 2012.
- SEURING, S.; MÜLLER, M.; WESTHAUS, M.; MORANA, R. Conducting a Literature Review - The Example of Sustainability in Supply Chains. In: KOTZAB, H.; SEURING, S.; MÜLLER, M.; REINER, G. (Ed.). **Research Methodologies in Supply Chain Management**: In Collaboration with Magnus Westhaus. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2005. p. 91–106.
- SHEN, X.; GAO, Y. Kinematic Processing Analysis of Carrier Phase based Precise Point Positioning. **FIG XXII International Congress**, p. 1–11, 2002.
- SHI, W.; FISHER, P. F.; GOODCHILD, M. F. **Spatial Data Quality**. New York: Taylor & Francis, 2005.
- SHLADOVER, S. E.; TAN, S. Analysis of Vehicle Positioning Accuracy Requirements for Communication-Based Cooperative Collision Warning. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, v. 10, n. 3, p. 131–140, 2006.
- SILVA, F. A.; BOUKERCHE, A.; BRAGA SILVA, T. R. M.; RUIZ, L. B.; LOUREIRO, A. A. F. Geo-localized content availability in VANETs. **Ad Hoc Networks**, v. 36, 2015.
- SINGH, K.; RAWAT, P.; BONNIN, J.-M. Cognitive radio for vehicular ad hoc networks (CR-VANETs): approaches and challenges. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2014, n. 1, p. 49, 2014.
- SIQUEIRA, C. de A. **Navegação Aérea Segundo o Conceito CNS / ATM**: Custos e Benefícios. Dissertação de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 146 p., 2005.
- SKOG, I.; HANDEL, P. In-Car Positioning and Navigation Technologies - A Survey.

IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, v. 10, n. 1, p. 4–21, 2009.

SOLEYMANI, S. A.; ABDULLAH, A. H.; HASSAN, W. H.; ANISI, M. H.; GOUDARZI, S.; REZAZADEH BAEI, M. A.; MANDALA, S. Trust management in vehicular ad hoc network: a systematic review. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2015, n. 1, p. 146, 2015.

SOMERVILLE, I. **Engenharia de Software**. 9. ed., Pearson, 2003.

SONG, X.; LI, X.; TANG, W.; ZHANG, W. A fusion strategy for reliable vehicle positioning utilizing RFID and in-vehicle sensors. **Information Fusion**, v. 31, p. 76–86, 2016.

SOUSA, S. B. DE; FERREIRA, L. G. Análise da temperatura de superfície em ambientes urbanos: um estudo por meio de sensoriamento remoto no município de Goiânia, Goiás (2002 – 2011). **Revista franco-brasileira de geografia**, p. 1–18, 2012.

SUN, S. H.; HU, J. L.; PENG, Y.; PAN, X. M.; ZHAO, L.; FANG, J. Y. Support for vehicle-to-everything services based on LTE. **IEEE Wireless Communications**, v. 23, n. 3, p. 4–8, 2016.

SVENSSON, M. K. Sky view factor analysis – implications for urban air temperature differences. **Meteorological Applications**, v. 11, n. 3, p. 201–211, 2004.

TADIC, S.; STANCIC, R.; SARANOVAC, L. V.; IVANIS, P. N. Vehicle Collision Reconstruction With 3-D Inertial Navigation and GNSS. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 66, n. 1, p. 14–23, 2017.

TASSERON, G.; MARTENS, K.; VAN DER HEIJDEN, R. The potential impact of vehicle-to-vehicle and sensor-to-vehicle communication in urban parking. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 7, n. 2, p. 22–33, 2015.

TERRASSE, R. La « Section Mauzin ». **Revue d'histoire des chemins de fer**, v. 39, 2008.

THOMSON REUTERS. **Web of Science - Quik reference guide**. v. 11, n. 0, p. 11–13, 2016.

THORNTON, D. A.; REDMILL, K.; COIFMAN, B. Automated parking surveys from a LIDAR equipped vehicle. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 39, n. 2014, p. 23–35, 2014.

TRIGO, C. C. **Pré-fabricados em argamassa armada**: material, técnica e desenho de componentes desenvolvidos por Lelé. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitetura da Universidade de São Paulo, 2009.

TURNER, S. M.; HOLDENER, D. J. Probe vehicle sample sizes for real-time information: the Houston experience. **Pacific Rim TransTech Conference. 1995 Vehicle Navigation and Information Systems Conference Proceedings.**, p. 3–10, 1995.

UEHARA, K.; SUNAHARA, H.; MURAI, J. The InternetCAR network architecture: Connect vehicles to the internet using IPv6. **The 5th International Conference on ITS**, 2005.

USDOT. **Trilateral Probe Data**. Disponível em: <http://www.its.dot.gov/factsheets/us_japan_probedata.htm>. Acesso em: 15 dez.

2015.

VECTRA. **Auscultation des chaussées - Matériel mlpc®**. La Verrière, 2014.

VINAGRE DÍAZ, J. J.; FERNÁNDEZ LLORCA, D.; RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, A. B.; QUINTERO MÍNGUEZ, R.; LLAMAZARES, Á.; SOTELO, M. Á. Extended floating car data system: Experimental results and application for a hybrid route level of service. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 13, n. 1, p. 25–35, 2012.

VITTORIO, A.; ROSOLINO, V.; TERESA, I.; VITTORIA, C. M.; VINCENZO, P. G.; FRANCESCO, D. M. Automated Sensing System for Monitoring of Road Surface Quality by Mobile Devices. **EWGT2013 – 16th Meeting of the EURO Working Group on Transportation Automated**, v. 111, p. 242–251, 2014.

VOLAND, P.; ASCHE, H. Processing and Visualizing Floating Car Data for Human-Centered Traffic and Environment Applications: A Transdisciplinary Approach. **International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems**, v. 8, n. 2, p. 32–49, 2017.

WADE, T.; SOMMER, S. **A to Z GIS: An Illustrated Dictionary of Geographic Information Systems**. ESRI Press, 2006.

WANG, J.; NI, D.; LI, K. RFID-based vehicle positioning and its applications in connected vehicles. **Sensors**, v. 14, n. 3, p. 4225–4238, 2014.

WEGENER, A.; HELLBRÜCK, H.; WEWETZER, C.; LÜBKE, A. VANET simulation environment with feedback loop and its application to traffic light assistance. **2008 IEEE Globecom Workshops, GLOBECOM 2008**, p. 1–7, 2008.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 4, p. 467–483, 2004.

WILLIAMS, B. **Intelligent Transport Systems Standards**. Boston: Artech House, 2008.

WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. **Adjustment Computations - Statistics and Least Squares in Surveyings and GIS**. John Wiley & Sons Inc., 1996.

XIAO, W.; VALLET, B.; SCHINDLER, K.; PAPARODITIS, N. Street-side vehicle detection, classification and change detection using mobile laser scanning data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 114, p. 166–178, 2016.

YAMADA, M.; UEDA, K.; HORIBA, I.; SUGIE, N. Discrimination of the Road Condition Toward Understanding of Vehicle Driving Environments. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 2, n. 1, p. 26–31, 2001.

YAN, G.; WEN, D.; OLARIU, S.; WEIGLE, M. C. Security challenges in vehicular cloud computing. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 1, p. 284–294, 2013.

YANG, B.; FANG, L.; LI, J. Semi-automated extraction and delineation of 3D roads of street scene from mobile laser scanning point clouds. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 79, 2013.

YANG, K.; GULER, S. I.; MENENDEZ, M. A Transit Signal Priority Algorithm under Connected Vehicle Environment. **IEEE Conference on Intelligent Transportation**

Systems, Proceedings, ITSC, v. 2015–October, p. 66–70, 2015.

YI, W.; LO, K.; MAK, T.; LEUNG, K.; LEUNG, Y.; MENG, M. A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems. **Sensors**, v. 15, 2015.

ZENG, H.; PARK, H.; FONTAINE, M. D.; SMITH, B. L. Identifying Deficient Pavement Sections using an Improved Acceleration-based Metric. **Transportation Research Record**, p. 0–16, 2015a.

ZENG, Z.; ZHANG, T.; LI, Q.; WU, Z.; ZOU, H.; GAO, C. Curvedness feature constrained map matching for low-frequency probe vehicle data. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 8816, n. January 2016, p. 1–31, 2015b.

ZHU, L.; HYYPPA, J. The use of airborne and mobile laser scanning for modeling railway environments in 3D. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 3075–3100, 2014.

APÊNDICE A - QUADRO DA CLASSIFICAÇÃO DO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Neste apêndice, os artigos do levantamento bibliográfico (Capítulo 3) são listados em um quadro-síntese, que os classifica quanto ao tema principal e os caracteriza quanto à natureza das variáveis tratadas, às subfunções abordadas, à modalidade do artigo e ao modo de transporte utilizado. Além disso, o quadro realiza contagem de termos e técnicas empregados nas diferentes subfunções de um veículo-sensor.

ARTIGO	AUTORES	PUBLICAÇÃO	KEYWORDS	PALAVRAS-CHAVE	
ARTIGOS AGRUPOADOS POR TEMA					
Artigos principais					
1	Efficient Data Harvesting in Mobile Sensor Platforms	Lee, U.; Maglietta, E.; Zhou, B.; Gerla, M.; Belavista, O.; Corrad, A.	2006	Proceedings 4th Annual IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications	Vehicle Sensor Network (VSN); storage architectures
2	Analysis of Vehicle Positioning Accuracy Requirements for Communication-Based Cooperative Collision Warning	Shladover, S. E.; Tang, Y.	2006	Journal of Intelligent Transportation Systems	Collision Warning; Cooperative ITS Systems; GPS; LIDAR; RADAR; ultrasonic sensors
3	CarTel: A Distributed Mobile Sensor Computing System	Hult, B.; Bjorkhovius, V.; Zhang, Y.; Chen, K.; Gonczar, M.; Miu, A.; Shih, E.; Bakshianfar, H.; Maden, S.	2006	4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems	Sensor networks; query processing; data visualization; data storage
4	MoSense: Smart Mobs for Urban Monitoring with a Vehicular Sensor Network	Lee, U.; Zhou, B.; Gerla, M.; Maglietta, E.; Belavista, O.; Corrad, A.	2006	IEEE Wireless Communications Magazine	Vehicle Sensor Network (VSN); opportunistic communication
5	Vehicular Ad Hoc and Sensor Networks: Principles and Challenges	Priam, M.; Murthy, G.; Babu, G.	2011	International Journal of Ad Hoc Sensor & Ubiquitous Computing	Vehicle Sensor Network (VSN); VANET; VASNET
6	Total GPS-free localization protocol for vehicular ad hoc sensor networks (VASNET)	Priam, M.; Murthy, G.; Babu, G.; Ahvar, E.	2011	Proceedings CSMIS 2011 - 3rd International Conference on Computational Intelligence, Modeling and Simulation	VASNET; VSN; radio localization
7	Vehicle as a Mobile Sensor	Abdelhamid, S.; Hassanein, H.; Taharha, G.	2014	The 18th International Conference on Future Networks and Communications	Vehicle as a Mobile Sensor; V2V; V2I; V2X
8	Precise vehicle location as a fundamental parameter for intelligent emergency real-time road-maintenance systems	Durazo Cardenas, I.; Stan, A.; Tzouras, A.; Belavista, M.; Monrose, J.; Rodriguez-Hernandez, M. C.	2014	Procedia CIRP - 3rd International Conference on Topical Issues in Engineering Services	Precise location; railway applications
9	A Review of the Role of Sensors in Mobile Context-Aware Recommendation Systems	Ibarri, I.; Hermoso, R.; Trillo-Lado, R.; Rodriguez-Hernandez, M. C.	2017	International Journal of Distributed Sensor Networks	Context-Aware Recommendation Systems; event detection; in-network processing; sensors embedded in vehicles; VANET; V2X
10	Processing and Visualizing Floating Car Data for Human-Centered Traffic and Environment Applications: A Translational Approach to Connected Vehicles	Voland, P.; Asche, H.	2017	International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems	Automotive electronics; Big Data; Geoinformation Science; Geovisualization; process modeling; spatiotemporal sensor data
Redes veiculares e comunicação veicular					
11	VIPT: An Information Transfer Protocol for Vehicular Computing	Dhakavak, M.; Ibbal, S.; Nadeem, T.; Iftode, L.	2005	VANET'05: Proceedings 2nd ACM International Conference on VANET	Location-based services; VANET; vehicular computing
12	Spatio-Temporal Variations of Vehicle Trajectories in VANETs: Detection, Approximation and Challenges	Bai, F.; Chen, Y.; Wang, Y.	2009	Proceedings 6th ACM International Conference on Vehicular Ad-Hoc Networks	VANET; information dissemination; spatio-temporal variability
13	Wireless Communication Technologies for ITS Applications	Kar, K.; Bachchan, M.; Gabe, J.; Weck, M.; Lorenz, P.	2010	IEEE Communications Magazine	ITS services; wireless communication
14	Exploiting the Wisdom of the Crowd: Localized, Distributed Information Censor VANETs	Bai, F.; Krishnamachari, B.	2010	IEEE Communications Magazine	VANET; information-centric networking on wheels (ICNw); network architecture; vehicle-to-vehicle (V2V)
15	Delay-bounded data gathering in urban vehicular sensor networks	Palazzi, C.; Pezzori, F.; Ruiz, P.	2012	Pervasive and Mobile Computing	Data gathering; Vehicle Sensor Network (VSN)
16	Security challenges in vehicular ad hoc computing	Yan, G.; Wen, D.; Charu, S.; Weigl, M. C.	2013	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	Cloud computing; Vehicular Cloud; privacy
17	Cognitive radio for vehicular ad hoc networks (CR-VANET): Approaches and challenges	Singh, R. K.; Rawat, P.; Bonnin, J. J.	2014	LURASIP Journal on Wireless Communications and Networking	Cognitive radio; VANET; dynamic spectrum allocation; vehicular communication; V2X
18	Clustering and sensing with decentralized detection in localization for heterogeneous sensing vehicle selection method	Gorran, A.; Marabou, M.; Bounissi, S.; Farni, G.	2014	Ad Hoc Networks	Decentralized detection; VANET; VSN
19	Trust management in vehicular ad hoc network: a systematic review	Soleymani, S.; Alshabari, A.H.; Hassan, W.; Arif, M.H.; Oudatos, S.; Rezaeezadeh-Vand, M.; Mendis, S.	2015	LURASIP Journal on Wireless Communications and Networking	VANET; trust metric
20	On Road Caching Assistance for Ubiquitous Vehicle-based Information Services	Abdelhamid, S.; Hassanein, H.; S.; Takamura, G.	2015	IEEE Transactions on Vehicular Technology	VSN; ubiquitous computing; cache memory
21	Geo-localized content availability in VANETs	Shiva, A. F.; Bouache, A.; Braga Silva, P. M.; Ruiz, P.; E. Lourenco, A. F.	2015	Ad Hoc Networks	Vehicular ad-hoc networks; content replication; content availability
22	Providing Vehicular Services and Communications Based on a Bluetooth Sensor Network Deployment	De Cerro, D. P.; Valenzuela, J. L.	2015	Sensors	V2V; V2V; Bluetooth
23	Position Based Routing in Crowd Sensing Vehicular Networks	Bazzi, A.; Zanella, A.	2015	Ad Hoc Networks	V2N; position-based routing
24	Optimization and control of cyber-physical vehicle systems	Bradley, J. M.; Atkins, E. M.	2015	Sensors	Cyber-physical systems; optimal control
25	Data communication in VANETs: Protocols, applications and challenges	Qunha, F.; Vilas, L.; Bouache, A.; Zanella, B.; Maia, G.; Viana, A.	2016	Ad Hoc Networks	VANET; protocols; VANET applications
26	Comprehensive tempo-spatial data collection in crowd sensing using a heterogeneous sensing vehicle selection method	Uu, Y.; Niu, J.; Xu, X.	2016	Personal and Ubiquitous Computing	Vehicular sensing; comprehensive tempo-spatial data coverage
27	Detecting Road Events Using Distributed Data Fusion: Experimental Evaluation for the Rio de Janeiro Case	Radda, J.; Ducourtbi, B.; Cherfaoui, V.; Bonnet, S.	2016	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	VANET; V2V and V2I communication; event detection; road events
Posicionamento veicular					
28	Urban road transport navigation: Performance of the global positioning system after selective availability	Osching, W. Y.; Sauer, K.	2002	Transportation Research Part C	GPS; accuracy; availability; integrity
29	An Active RFID System for Railway Vehicle Identification and Positioning	Lee, L. T.; Tsang, K. F.	2008	International Conference on Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age 2008, ICRE 2008	RFID; vehicle identification
30	In-Car Positioning and Navigation Technologies - A Survey	Skog, I.; Handeli, P.	2009	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	Vehicle navigation; dead reckoning; inertial navigation; GNSS; information fusion
31	Train localization and parking detection using data fusion	Acharya, A.; Sadhu, S.; Ghoshal, T. K.	2011	Transportation Research Part C	Localization; train parking; fusion filter; probabilistic hidden Markov models; GPS
32	RFID assisted vehicle positioning in VANETs	Lee, E. K.; Cho, S. Y.; Gierla, M.	2012	Pervasive and Mobile Computing	RFID; positioning; VANET
33	Tight integration of GNSS and a 3D City Model for Robust Positioning in Urban Environments	Bourdeau, A.; Sahnoudi, M.; Tourment, J.	2012	ION GPS International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation	DEM; localization; GNSS
34	Simulation-based Evaluation of Dependability and Safety Technologies for Railway Localization	Bugun, J.; Marais, J.	2012	Transportation Research Part C	GNSS-based localization; RAMS; railway applications
35	Intelligent Urban Positioning Using Multi-Constellation GNSS with 3D Mapping and NLOS Signal Detection	Groves, P. D.; Jiang, Z.; Wang, L.; Zebari, M. K.	2012	IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems	GNSS; 3D mapping; dead reckoning; shadow matching
36	Cooperative positioning in vehicular networks: Facts and future	Alam, N.; Dempsey, A. G.	2013	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	Cooperative positioning; VANET; GNSS; RTK
37	The Complexity Problem in Future Multisensor Navigation and Positioning Systems: A Modular Solution	Groves, P. D.	2013	The Journal of Navigation	Integrated navigation; modular navigation; multisensor navigation; multisensor navigation
38	High accuracy tightly-coupled integrity monitoring algorithm for map-matching	Li, L.; Qudus, M.; Zhao, L.	2013	Transportation Research Part C	Kalman filter; integrity; vehicle navigation; map matching; RAM
39	An RFID Supported Train Tracking System for Train Line Localization	Luftu, A.; Melin, K.; Dagli, M. A.; Kubra, O.	2013	IFAC Workshop on Advances in Control and Automation Theory for Transportation Applications	RFID; train monitoring
40	Towards accurate localization in guided transport: RFID and data fusion and mapping	Mearas, J.; Moura, C.; Alfa, D.; Ruckewitz, P.; Parizquier, A.	2014	Transportation Research Part C	Image processing; localization; GNSS
41	RFID-Based Vehicle Positioning and Its Applications in Connected Vehicles	Hwang, R. B.; Li, D. L. K.	2014	Sensors	RFID; positioning; VANET
42	Conceptual issues regarding the development of integrated railway localization systems	Wang, J.; Kim, C.; Chen, W.	2015	IGPRS International Journal of Geo-Information	Mobile Laser Scanning (MLS); underground railway; positioning
43	Passive Sensor Integration for Vehicle Self-Localization in Urban Traffic Environment	Gu, Y.; Hu, L. T.; Kamjo, S.	2015	Sensors	Sensor integration; 3D map; INS; GNSS; lane detection; onboard cameras
44	Pinpoint Lane Positions of Vehicles	Chen, L.; Shi, H.	2015	IEEE Vehicular Technology Magazine	Lane positioning; Vehicle Sensor Network (VSN); infrastructure-less Cooperative Lane Positioning (CLP); V2V; image processing
45	A Train Localization Algorithm for Train Protection Systems of the Future	Sauer, M.; Stein, D.	2015	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	Train-borne vehicle localization; GNSS; digital train map; early current sensor; map matching; virtual balise
46	Localizing Ground Penetrating Radar: a step toward robust autonomous ground vehicle localization	Combs, M.; Koehneing, J.; Stanley, B.; Zhang, B.	2015	Journal of Field Robotics	Acoustic positioning; Localizing Ground Penetrating Radar (LGPR); map-based vehicle localization; GNSS; INS; sensor integration
47	Eddy current sensor based vehicle velocity and distance estimation	Marinor, M.; Hensel, S.; Straus, T.	2015	IET Science, Measurement & Technology	Eddy current sensor; rail vehicle positioning
48	Curvedness feature constrained map matching for low-frequency probe vehicle data	Zeng, Z.; Zhang, T.; Li, Q.; Wu, Z.; Zou, H.; Gao, C.	2015	International Journal of Geographical Information Science	GPS; map-matching; probe vehicle
49	Stereo visual odometry in urban environments based on feature matching	De La Escalera, A.; Izquierdo, E.; Martin, D.; Garcia, B.; Garcia, F.; Arriaga, J.	2016	Robotics and Autonomous Systems	Autonomous vehicles; Kalman filter; Visual odometry; feature matching
50	Accurate lateral positioning from map data and road marking detection	Gruyer, D.; Belarouci, R.; Revilout, M.	2016	Expert Systems with Applications	GPS; inertial measurement; Lane marking detection; Map matching
51	A fusion strategy for reliable vehicle positioning utilizing RFID and map data	Song, X.-K.; Li, X.; Tang, W.; Zhang, W.	2016	Information Fusion	RFID; Sensor fusion; Vehicle positioning
Sistemas sensores e tratamento dos dados sensores					
52	The Generation of Synthetic O-D Demands from Real-Time Vehicle Probe Data - Potential and Limitations	Aerde, M. V.; Mackinnon, G.; Helfinga, B.	1991	Vehicle Navigation and Information Systems Conference	Probe vehicle; O-D demands
53	Measurement of railway profiles using GPS integrated with other sensors	Leahy, F.; Judd, M.; Shortall, M.	1993	Proceedings of the IEEE-IEEE Vehicle Navigation and Information Systems Conference	Rail track profiles; DGPS; IMU
54	Probe vehicle sample sizes for real-time information: the location experience	Turner, S. M.; Holdener, D. J.	1995	Pacific Rim Trans-Tech Conference: Vehicle and ITS Systems Conference Proceedings	Probe vehicle; time travel
55	Extended floating-car data for the analysis of traffic information	Huber, W.; Lüdke, M.; Ogger, R.	1999	Proceedings of 6th World Congress on Information and Transport Systems (ITS)	Extended floating-car data; traffic management
56	Discrimination of a Road Condition Toward Understanding of Vehicle Driving Environments	Yamada, M.; Ueda, K.; Horiba, U.; Saito, Y.	2001	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	Imaging; multivariate analysis; road condition; wet road; road condition; road condition
57	VANET simulation environment with feedback loop and its application to traffic light assistance	Wegman, A.; Heidrich, H.; Wuestner, C.; Lobe, A.	2006	IEEE IEEE Globecom Workshops	Traffic Control; VANET
58	Mobile LIDAR Mapping for Urban Data Capture	Haas, N.; Peter, M.; Cretau, A.; Kremer, J.	2008	VISM 2008 - 2008 IEEE Virtual Systems and Multimedia Dedicated to Digital Heritage	Mobile Laser Scanning (MLS); 3D modeling; urban environment
59	The Probe Path: Using a Mobile Sensor Network to Detect Road Surface Conditions	Eriksson, J.; Gredal, L.; Hall, B.; Zeman, R.; Sjöström, S.; Bakshianfar, H.	2008	Proceedings 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services	Road conditions; accelerometer
60	Intelligent extended floating car data collection	Messersch, S.; Koenig, M.; Navi, M.; Zeman, R.; Sjöström, S.; Bakshianfar, H.	2008	Expert Systems with Applications	Image analysis; floating car data; intelligent vehicle; telematic service; traffic monitoring
61	A real-time 3D scanning system for pavement detection inspection	Li, Q.; Yao, M.; Yang, X.; Chen, F.	2009	Measurement Science and Technology	Pavement inspection; 3D pavement profile; laser scanning
62	On the Diagnostic of Road Pathway Visibility	Charbonnier, P.; Joly, J.; Goulette, F.	2010	Transport Research Arena Europe	LIDAR; visibility distance
63	Condition Monitoring of Railway Track Using In-service Vehicle	Mori, N.; Tsurumai, H.; Kajima, T.; Matsuno, A.; Mizuma, T.	2010	Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics	Road conditions; microphone; in-service vehicles as mobile sensors
64	Characterization of pavement profile using accelerometer readings and a combinatorial optimisation algorithm	Karim, K. A.; Kozma, A.; Oren, E. J.; McGeehin, J.	2011	Journal of Sound and Vibration	Inertial sensors; road conditions; road profile
65	Pothole detection in asphalt pavement images	Koch, C.; Blanks, I.	2011	Advanced Engineering Informatics	Pothole detection; visual sensing; image processing
66	Measuring air quality in cities by vehicular wireless sensor networks	Hu, S. C.; Wang, J. C.; Huang, C. Y.; Tang, Y. C.	2011	Journal of Systems and Software	Micro-climate monitoring; opportunistic communication; Vehicular Sensor network (VSN)
67	Probe Vehicles Used to Measure Road Ride Quality	Fitzsim, G. W.; Vayns, S. Z.; Kachira, S.; Wajsb, E.; Medina-Fitzsim, A.	2012	Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board	Accelerometer; road condition monitoring
68	Pothole Properties Measurement through Visual 2D Recognition and 3D Reconstruction	Jug, G. M.; Koch, C.; Gollapudi-Fard, M.; Blanks, I.	2012	Computing in Civil Engineering	Pothole detection; visual sensing; image processing; 3D reconstruction
69	Extended floating car data (eFCD): level of service, deterioration	Vinagre Dela, J.; Fernández Llorca, D.; González, R.; Miranda, R.; Llanusa, S.; Sotelo, M.	2012	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	Extended floating car data (eFCD); level of service; deterioration
70	Embedded solution for Road Condition Monitoring using Vehicular Sensor Networks	Medina, A.; Elías, A.; Salazar, L.	2012	6th International Conference on Application of Information Systems in Transportation	Road conditions; potholes; Vehicular Sensor Network (VSN); microphone; accelerometer
71	A Mixed Filtering Approach for Road Condition Monitoring Using Accelerometers on the Axle Box and Bogie	Lee, J. S.; Choi, S.; Kim, S. S.; Park, C.; Kim, Y. G.	2012	IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements	Track conditions monitoring; accelerometer; axle box; mixed filter
72	Automated visual inspection of railroad tracks	Resendez, J.; Kim, M. J.; Ahuja, N.	2012	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	Railroad track inspection; computer vision
73	RailsLAM - Localization of rail vehicles and mapping of geometric railway tracks	Heinrich, O.; Robertson, P.; Strang, T.	2013	Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation	GNSS; IMU; Kalman filter; SLAM
74	Semi-automated extraction and delineation of 3D roads of street scene from laser scanning point cloud	Yang, B.; Feng, L.; Li, J.	2013	IGPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing	3D road extraction; curb detection; MLS
75	Rail Component Detection: Optimization and Assessment for Automatic Rail Track Inspection	Li, Y.; Trinh, H.; Haas, N.; Otto, C.; Parkkari, S.	2013	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	Railroad track inspection; computer vision
76	Rail track detection and modeling in Mobile Laser Scanning (MLS) data	Elberich, S. O.; Roshchekhin, K.; Astasova, M.; Benito, D. D.	2013	IGPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences	Classification; railway track modeling; Mobile Laser Scanning (MLS); microphone; accelerometer
77	Pavement Condition Monitoring with Crowdsourced Connected Vehicle Data	Denne, E. P.; Hong, D.; Wallace, R.; Lerner, J. M.; Smith, M.	2013	Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board	Pavement condition; crowdsourcing
78	Roadside A Road Pavement Monitoring System for Annual Detection Using Smart Phones	Jiang, F.; Wang, M.; Li, D.; Liu, A.; Lu, S.; Haddad, P.	2014	Big Data Analytics in the Social and Ubiquitous Context	Smartphone; road bumps; road anomalies; machine learning
79	Automated parking surveys from a LIDAR equipped vehicle	Thomson, D. T.; Ravindra, K.; Colman, B.	2014	Transportation Research Part C	Parking survey; probe vehicle; LIDAR
80	Automated Sensing System for Monitoring of Road Surface Quality by Mobile Devices	Vittorio, A.; Roscino, V.; Tereza, I.; Vittorio, C.; Mollino, P. G. G.	2014	EWG2013 - 16th Meeting of the EURO Working Group on Transportation Automation	Road pavement; potholes; vertical acceleration; accelerometer; GPS
81	Using connected vehicle technology to improve the efficiency of emergency response	Gu, J. S.; Menendez, M.; Meier, L.	2014	Transportation Research Part C	Connected vehicle; Traffic control
82	The Use of Airborne and Mobile Laser Scanning for Modeling Railway Environment	Zhu, L.; Hyslop, S.; Rao, K. A.	2014	Remote Sensing	Airborne and Mobile Laser Scanning (MLS and MSL); 3D modeling; railway environment
83	Automatic Detection of Squares in Railway Infrastructure	Moldova, M.; Nufre, A.; Li, Z.; Dolovirt, R.	2015	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	Railway defects; axle box acceleration (ABA); railway monitoring and maintenance; accelerometer
84	Kalman Filter based railway tracking from mobile LIDAR data	Jwa, Y.; Sorli, G.	2015	IGPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences	Kalman filter; railway track modeling; Mobile Laser Scanning (MLS)
85	Identifying Defective Pavement Sections using In-service Acceleration-based Metrics	Zeng, H.; Park, H.; Fontaine, M. D.; Smith, B.	2015	Transportation Research Record	Parking condition; pseudo IR; accelerometer
86	The potential impact of vehicle to vehicle and sensor-to-vehicle communication in urban parking	Tasseron, O.; Martens, K.; Van Der Heijden, R.	2015	IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine	Parking survey; V2X communication; VANET
87	Estimation of flow and density using probe vehicles with onboard measurement equipment	Sato, T.; Kusabeke, T.; Asakura, Y.	2015	Transportation Research Part C	ADAS; probe vehicle; traffic flow
88	Improvement in Axle Box Acceleration Measurements for the Detection of Light Spikes in Railway Infrastructure	Li, Z.; Moldova, M.; Nufre, A.; Dolovirt, R.	2015	IEEE Transactions on Industrial Electronics	Railway defects (axle); axle box acceleration (ABA); railway monitoring and maintenance; accelerometer
89	Effective Urban Traffic Monitoring by Vehicular Sensor Networks	Du, R.; Chen, C.; Yang, B.; Lu, N.; Qian, X.; Jiang, Y.	2015	IEEE Transactions on Vehicular Technology	Vehicular Sensor Network (VSN); traffic flow; probe vehicles; floating car data
90	Pothole Detection System Using a Black-Box Camera	Jo, Y.; Ryu, S.	2015	Sensors	Road condition; pothole detection; black-box camera
91	A Survey of Wireless Sensor Network-Based Air Pollution Monitoring	Yi, W. Y.; Li, K. M.; Mak, T.; Leung, S. K.	2015	Sensors	Air pollution monitoring; Wireless Sensor Network; Sensor Network; mobile air pollution monitoring
92	Automatic detection and notification of potholes and bumps on roads to aid drivers	Asadi, R.; Heber, S.; Patten, P.; Golla, V.	2015	IEEE Sensors Journal	Android application; GPS; GSM; Ultrasonic sensor
93	Deriving high-resolution urban air pollution maps using mobile sensor networks	Muller, M. D.; Haszpratt, D.; Siegel, M.; Fier, M.; Hugi, G.	2015	Pervasive and Mobile Computing	Pollution maps; mobile air pollution monitoring system; land-use regression; temporal resolution; Vehicular Sensor Network (VSN)
94	Sensing Traffic Density Combining V2V and V2I Wireless Communications	Sargueta, A. A.; Banchicha, J.; Bague, M.; Jaurri, P.; Medina, F. Y.; Beldia, J. C.; Calafate, C.; Manzoni, P.	2015	Sensors	RFID; traffic density estimation; roads side unit (RSU); floating car data (FCD)
95	A Travel Sign Priority Algorithm under Connected Vehicles	Yang, Y.; Chen, S. J.; Menendez, M.	2015	IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems	Connected vehicles; signal priority
96	Image-Based Approach for Road Profile Analysis	Han, J. Y.; Qiu, A. K.; Li, Y. T.	2016	Journal of Surveying Engineering	Laser sensor; profile; image technique; road conditions; road profile
97	Characterization of road bumps using smartphones	Maherjee, A.; Majhi, S.	2016	European Transport Research Review	Smartphone; road bumps; dynamic response; accelerometer; pass filter
98	Precision enhancement of vehicular ranging localization with connected vehicles	Kim, S.; Kim, H.; Huang, Y.; Zhang, Z.; Deng, F.	2016	Measurement Science and Technology	Accelerometer; connected vehicles; GPS; precision ranging localization
99	Sensor Fusion Algorithm Design in Vehicular Sensor Network and Street View	Kim, S.; Bredel, R.; Hu, Y.; Wu, H. K.; Lee, S.	2016	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	Sensor fusion; laser scanner; stereovision; Kalman filter; ADAS
100	Toward Community Sensing of Road Anomalies Using Unmanned Aerial Vehicles	Chen, H. T.; Lai, C. Y.; Shin, C. A.	2016	IEEE Sensors Journal	Community sensing; computer vision; ADAS; vehicle-to-vehicle; intelligent vehicle; road anomaly
101	Assessing the effectiveness of probe vehicle acceleration measurements in estimating road roughness	Kalicha, S. W.; El Khoury, J.; Fitzsim, G.	2016	International Journal of Pavement Engineering	Pavement monitoring; pavement roughness; probe vehicle; accelerometer
102	Urban Street Lighting Information Monitoring Using a Mobile Sensor Network	Kumar, S.; Deshpande, A.; Li, S. S. K.; Li, S. S. K.	2016	IEEE Sensors Journal	Urban sensing; mobile sensing; image computation
103	A Study on the Influence of Sensor on Road Roughness Sensing: The SmartRoadSense Case	Alessandro, G.; Carra, A.; Lattari, E.; Freschi, V.; Boglietti, A.	2017	Sensors	Collaborative monitoring; road roughness index
104	Model Activity Based Stochastic Model for Estimating Vehicle Trajectories from Sparse Mobile Sensor Data	Park, P.; Borbournsmin, K.; Kim, Y.; Barth, M. J.	2017	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	Stochastic model; sparse GPS data; trajectory estimation; model activity
105	A discussion on the merits and limitations of using driver information to detect localized damage in a bridge	Jester, D.; Gonzalez, A.	2017	Mechanical Systems and Signal Processing	Bridges; moving load; damage detection; accelerometer
106	Track monitoring from the dynamic response of an inertial sensor network	Edwards, G.; Chen, S.; Gennel, J.; Quirk, P.; Mahfouz, F. Y.; Beldia, J. C.; Calafate, C.; Manzoni, P.	2017	Mechanical Systems and Signal Processing	Rail maintenance; signal processing; change detection; vehicle-based inspection; position uncertainty
107	Vehicle Collision Reconstruction With 3-D Inertial Navigation and GNSS	Tadic, S.; Stanic, R.; Saranovic, L. V.; Iwanis, P. B.	2017	IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements	Accident analysis; GNSS; gyroscopes; vehicle collision reconstruction

[illegible][illegible]

APÊNDICE B - LISTA DOS ARTIGOS DO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Neste apêndice, são apresentadas apenas as referências levantadas para o mapeamento do estado da arte no domínio de pesquisa dos veículos-sensores, descritas no capítulo referente ao levantamento bibliográfico (Capítulo 3). Segue-se o agrupamento em temas principais proposto no Capítulo 3 e ordem cronológica em cada grupo, como feito no quadro do Apêndice A.

Artigos principais

1. LEE, U.; MAGISTRETTI, E.; ZHOU, B.; GERLA, M.; BELLAVISTA, P.; CORRADI, A. Efficient Data Harvesting in Mobile Sensor Platforms. **Proceedings of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops**, 2006a.
2. SHLADOVER, S. E.; TAN, S. Analysis of Vehicle Positioning Accuracy Requirements for Communication-Based Cooperative Collision Warning. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, v. 10, n. 3, p. 131–140, 2006.
3. 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. **The 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems**, p. 125–138, 2006.
4. LEE, U.; ZHOU, B.; GERLA, M.; MAGISTRETTI, E.; BELLAVISTA, P.; CORRADI, A. Mobeyes: Smart mobs for urban monitoring with a vehicular sensor network. **IEEE Wireless Communications**, v. 13, n. 5, p. 52–57, 2006b.
5. PIRAN, M. J.; MURTHY, G. R.; BABU, G. P. Vehicular Ad Hoc and Sensor Networks: Principles and Challenges. **International Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing (IJASUC)**, v. 2, n. 2, p. 38–49, 2011.
6. PIRAN, M. J.; MURTHY, G. R.; BABU, G. P.; AHVAR, E. Total GPS-free localization protocol for vehicular ad hoc and sensor networks (VASNET). **Proceedings - CIMSIm 2011: 3rd International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation**, p. 388–393, 2011.
7. ABDELHAMID, S.; HASSANEIN, H. S.; TAKAHARA, G. Vehicle as a mobile sensor. **The 9th International Conference on Future Networks and Communications**, v. 34, p. 286–295, 2014.
8. DURAZO-CARDENAS, I.; STARR, A.; TSOURDOS, A.; BEVILACQUA, M.; MORINEAU, J. Precise Vehicle Location as a Fundamental Parameter for Intelligent Self-aware Rail-track Maintenance Systems. **Procedia CIRP: 3rd International Conference on Through-life Engineering Services**, v. 22, p. 219–224, 2014.
9. ILARRI, S.; HERMOSO, R.; TRILLO-LADO, R.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, M. C. A Review of the Role of Sensors in Mobile Context-Aware Recommendation Systems. **International Journal of Distributed Sensor**

Networks, v. 2015, 2015.

10. VOLAND, P.; ASCHE, H. Processing and Visualizing Floating Car Data for Human-Centered Traffic and Environment Applications: A Transdisciplinary Approach. **International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems**, v. 8, n. 2, p. 32–49, 2017.

Artigos centrados nas redes veiculares e na comunicação veicular

11. DIKAIKOS, M. D.; IQBAL, S.; NADEEM, T.; IFTODE, L. VITP: an information transfer protocol for vehicular computing. **VANET '05: Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks**, p. 30–39, 2005.
12. BAI, F.; KRISHNAMACHARI, B. Spatio-Temporal Variations of Vehicle Traffic in VANETs: Facts and Implications. **Proceedings of the sixth ACM International Conference on Vehicular Ad Hoc Networks**, p. 43–52, 2009.
13. DAR, K.; BAKHOUYA, M.; GABER, J.; WACK, M.; LORENZ, P. Wireless communication technologies for ITS applications. **IEEE Communications Magazine**, v. 48, n. May, p. 156–162, 2010.
14. BAI, F.; KRISHNAMACHARI, B. Exploiting the wisdom of the crowd: Localized, distributed information-centric VANETs. **IEEE Communications Magazine**, v. 48, n. 5, p. 138–146, 2010.
15. PALAZZI, C. E.; PEZZONI, F.; RUIZ, P. M. Delay-bounded data gathering in urban vehicular sensor networks. **Pervasive and Mobile Computing**, v. 8, n. 2, p. 180–193, 2012.
16. YAN, G.; WEN, D.; OLARIU, S.; WEIGLE, M. C. Security challenges in vehicular cloud computing. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 1, p. 284–294, 2013.
17. SINGH, K.; RAWAT, P.; BONNIN, J.-M. Cognitive radio for vehicular ad hoc networks (CR-VANETs): approaches and challenges. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2014, n. 1, p. 49, 2014.
18. GORRIERI, A.; MARTALÒ, M.; BUSANELLI, S.; FERRARI, G. Clustering and sensing with decentralized detection in vehicular ad hoc networks. **Ad Hoc Networks**, v. 36, p. 450–464, 2014.
19. SOLEYMANI, S. A.; ABDULLAH, A. H.; HASSAN, W. H.; ANISI, M. H.; GOUDARZI, S.; REZAZADEH BAEI, M. A.; MANDALA, S. Trust management in vehicular ad hoc network: a systematic review. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2015, n. 1, p. 146, 2015.
20. ABDELHAMID, S.; HASSANEIN, H. S.; TAKAHARA, G. On-Road Caching Assistance for Ubiquitous Vehicle-Based Information Services. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 64, n. 12, p. 5477–5492, 2015.
21. SILVA, F. A.; BOUKERCHE, A.; BRAGA SILVA, T. R. M.; RUIZ, L. B.; LOUREIRO, A. A. F. Geo-localized content availability in VANETs. **Ad Hoc Networks**, v. 36, 2015.
22. DE CERIO, D.; VALENZUELA, J. Provisioning Vehicular Services and Communications Based on a Bluetooth Sensor Network Deployment. **Sensors**,

- v. 15, n. 6, p. 12765–12781, 2015.
23. BAZZI, A.; ZANELLA, A. Position Based Routing in Crowd Sensing Vehicular Networks. **Ad Hoc Networks**, v. 36, p. 409–424, 2015.
 24. BRADLEY, J. M.; ATKINS, E. M. Optimization and control of cyber-physical vehicle systems. **Sensors**, v. 15, n. 9, p. 23020–23049, 2015.
 25. CUNHA, F.; VILLAS, L.; BOUKERCHE, A.; MAIA, G.; VIANA, A.; MINI, R. A. F.; LOUREIRO, A. A. F. Data communication in VANETs: Protocols, applications and challenges. **Ad Hoc Networks**, v. 44, p. 90–103, 2016.
 26. LIU, Y.; NIU, J.; LIU, X. Comprehensive tempo-spatial data collection in crowd sensing using a heterogeneous sensing vehicle selection method. **Personal and Ubiquitous Computing**, v. 20, n. 3, p. 397–411, 2016.
 27. RADAK, J.; DUCOURTHIAL, B.; CHERFAOUI, V.; BONNET, S. Detecting Road Events Using Distributed Data Fusion: Experimental Evaluation for the Icy Roads Case. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 1, p. 184–194, 2016.

Artigos centrados no posicionamento veicular

28. OCHIENG, W. Y.; SAUER, K. Urban road transport navigation: Performance of the global positioning system after selective availability. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 10, n. 3, p. 171–187, 2002.
29. LEE, L. T.; TSANG, K. F. An Active RFID System for Railway Vehicle Identification and Positioning. **International Conference on Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age**, 2008.
30. SKOG, I.; HANDEL, P. In-Car Positioning and Navigation Technologies - A Survey. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 10, n. 1, p. 4–21, 2009.
31. ACHARYA, A.; SADHU, S.; GHOSHAL, T. K. Train localization and parting detection using data fusion. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 19, n. 1, p. 75–84, 2011.
32. LEE, E. K.; OH, S. Y.; GERLA, M. RFID assisted vehicle positioning in VANETs. **Pervasive and Mobile Computing**, v. 8, n. 2, p. 167–179, 2012.
33. BOURDEAU, A.; SAHMOUDI, M.; TOURNERET, J. Tight integration of GNSS and a 3D city model for robust positioning in urban canyons. **ION GPS: International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation**, v. 2012, p. 1263–1269, 2012.
34. BEUGIN, J.; MARAIS, J. Simulation-based evaluation of dependability and safety properties of satellite technologies for railway localization. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 22, p. 42–57, 2012.
35. GROVES, P. D.; JIANG, Z.; WANG, L.; ZIEBART, M. K. Intelligent Urban Positioning using Multi- Constellation GNSS with 3D Mapping and NLOS Signal Detection. **IEEE Transactions On Aerospace**, p. 458–472, 2012.

36. ALAM, N.; DEMPSTER, A. G. Cooperative positioning for vehicular networks: Facts and future. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 4, p. 1708–1717, 2013.
37. GROVES, P. D. The Complexity Problem in Future Multisensor Navigation and Positioning Systems: A Modular Solution. **The Journal of Navigation**, v. 67, n. 2, p. 311–326, 2013.
38. LI, L.; QUDDUS, M.; ZHAO, L. High accuracy tightly-coupled integrity monitoring algorithm for map-matching. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 36, p. 13–26, 2013.
39. LUTFU, A.; METIN, K.; DAGLI, M. A.; KUBRA, O. An RFID Supported Train Tracking System for Tram Lines. **IFAC Workshop on Advances in Control and Automation Theory for Transportation Applications**, v. 46, n. 25, p. 129–132, 2013.
40. MARAIS, J.; MEURIE, C.; ATTIA, D.; RUICHEK, Y.; FLANCQUART, A. Toward accurate localization in guided transport: Combining GNSS data and imaging information. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 43, p. 188–197, 2014.
41. WANG, J.; NI, D.; LI, K. RFID-based vehicle positioning and its applications in connected vehicles. **Sensors**, v. 14, n. 3, p. 4225–4238, 2014.
42. HUNG, R.; KING, B.; CHEN, W. Conceptual Issues Regarding the Development of Underground Railway Laser Scanning Systems. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 1, p. 185–198, 2015.
43. GU, Y.; HSU, L. T.; KAMIJO, S. Passive sensor integration for vehicle self-localization in urban traffic environment. **Sensors**, v. 15, n. 12, p. 30199–30220, 2015.
44. CHEN, L. W.; SHIH, H. W. Finding Lane Positions of Vehicles. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, n. December, p. 70–80, 2015.
45. LAUER, M.; STEIN, D. A Train Localization Algorithm for Train Protection Systems of the Future. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 16, n. 2, p. 970–979, 2015.
46. CORNICK, M.; KOECHLING, J.; STANLEY, B.; ZHANG, B. Localizing Ground Penetrating RADAR: A Step Toward Robust Autonomous Ground Vehicle Localization. **Journal of Field Robotics**, 2015.
47. MARINOV, M.; HENSEL, S.; STRAUS, T. Eddy current sensor based velocity and distance estimation in rail vehicles. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 9, n. 7, p. 875–881, 2015.
48. ZENG, Z.; ZHANG, T.; LI, Q.; WU, Z.; ZOU, H.; GAO, C. Curvedness feature constrained map matching for low-frequency probe vehicle data. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 8816, n. January 2016, p. 1–31, 2015b.
49. DE LA ESCALERA, A.; IZQUIERDO, E.; MARTIN, D.; MUSLEH, B.; GARCIA, F.; ARMINGOL, J. M. Stereo visual odometry in urban environments based on detecting ground features. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 80, p. 1–10, 2016.

50. GRUYER, D.; BELAROUSSI, R.; REVILLOU, M. Accurate lateral positioning from map data and road marking detection. **Expert Systems with Applications**, v. 43, p. 1–8, 2016.
51. SONG, X.; LI, X.; TANG, W.; ZHANG, W. A fusion strategy for reliable vehicle positioning utilizing RFID and in-vehicle sensors. **Information Fusion**, v. 31, p. 76–86, 2016.

Artigos centrados nos sistemas sensores e tratamento dos dados sensorizados

52. AERDE, M. V.; MACKINNON, G.; HELLINGA, B. The Generation of Synthetic O-D Demands from Real-Time Vehicle Probe Data : Potential and Limitations. **Vehicle Navigation and Information Systems Conference**, 1991.
53. LEAHY, F.; JUDD, M.; SHORTIS, M. Measurement of railway profiles using GPS integrated with other sensors. **Proceedings of the IEEE-IEE Vehicle Navigation and Informations Systems Conference**, p. 706–709, 1993.
54. TURNER, S. M.; HOLDENER, D. J. Probe vehicle sample sizes for real-time information: the Houston experience. **Pacific Rim TransTech Conference. 1995 Vehicle Navigation and Information Systems Conference Proceedings**, p. 3–10, 1995.
55. HUBER, W.; LÄDKE, M.; OGGER, R. Extended floating-car data for the acquisition of traffic information. **Proceedings of 6th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS)**, p. 1–9, 1999.
56. YAMADA, M.; UEDA, K.; HORIBA, I.; SUGIE, N. Discrimination of the Road Condition Toward Understanding of Vehicle Driving Environments. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 2, n. 1, p. 26–31, 2001.
57. WEGENER, A.; HELLBRÜCK, H.; WEWETZER, C.; LÜBKE, A. VANET simulation environment with feedback loop and its application to traffic light assistance. **2008 IEEE Globecom Workshops, GLOBECOM 2008**, p. 1–7, 2008.
58. HAALA, N.; PETER, M.; CEFALU, A.; KREMER, J. Mobile LIDAR Mapping for Urban Data Capture. **VSM 2008 Conference on Virtual Systems and MultiMedia Dedicated to Digital Heritage**, p. 101–106, 2008.
59. ERIKSSON, J.; GIROD, L.; HULL, B.; NEWTON, R.; MADDEN, S.; BALAKRISHNAN, H. The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring. **Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services**, p. 29–39, 2008.
60. MESSELODI, S.; MODENA, C. M.; ZANIN, M.; DE NATALE, F. G. B.; GRANELLI, F.; BETTERLE, E.; GUARISE, A. Intelligent extended floating car data collection. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 3 PART 1, p. 4213–4227, 2009.
61. LI, Q.; YAO, M.; YAO, X.; XU, B. A real-time 3D scanning system for pavement distortion inspection. **Measurement Science and Technology**, v. 21, p. 15702, 2009.

62. CHARBONNIER, P.; TAREL, J.; GOULETTE, F. On the Diagnostic of Road Pathway Visibility. **Transport Research Arena Europe**, n. 1, 2010.
63. MORI, H.; TSUNASHIMA, H.; KOJIMA, T.; MATSUMOTO, A.; MIZUMA, T. Condition Monitoring of Railway Track Using In-service Vehicle. **Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics**, v. 3, n. 1, p. 154–165, 2010.
64. HARRIS, N. K.; GONZALEZ, A.; OBRIEN, E. J.; MCGETRICK, P. Characterisation of pavement profile heights using accelerometer readings and a combinatorial optimisation technique. **Journal of Sound and Vibration**, v. 329, n. 5, p. 497–508, 2010.
65. KOCH, C.; BRILAKIS, I. Pothole detection in asphalt pavement images. **Advanced Engineering Informatics**, v. 25, n. 3, p. 507–515, 2011.
66. HU, S. C.; WANG, Y. C.; HUANG, C. Y.; TSENG, Y. C. Measuring air quality in city areas by vehicular wireless sensor networks. **Journal of Systems and Software**, v. 84, n. 11, p. 2005–2012, 2011.
67. FLINTSCH, G. W.; VALERI, S. M.; KATICH, S. W.; IZEPPI, E. D. de L.; MEDINA-FLINTSCH, A. Probe Vehicles Used to Measure Road Ride Quality. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2304, n. 1, p. 158–165, 2012.
68. JOG, G. M.; KOCH, C.; GOLPARVAR-FARD, M.; BRILAKIS, I. Pothole Properties Measurement through Visual 2D Recognition and 3D Reconstruction. **Computing in Civil Engineering**, 2012.
69. VINAGRE DÍAZ, J. J.; FERNÁNDEZ LLORCA, D.; RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, A. B.; QUINTERO MÍNGUEZ, R.; LLAMAZARES, Á.; SOTELO, M. Á. Extended floating car data system: Experimental results and application for a hybrid route level of service. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 13, n. 1, p. 25–35, 2012.
70. MEDNIS, A.; ELSTS, A.; SELAVO, L. Embedded solution for road condition monitoring using vehicular sensor networks. **2012 6th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2012 - Proceedings**, p. 0–4, 2012.
71. LEE, J. S.; CHOI, S.; KIM, S. S.; PARK, C.; KIM, Y. G. A mixed filtering approach for track condition monitoring using accelerometers on the axle box and bogie. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 61, n. 3, p. 749–758, 2012.
72. RESENDIZ, E.; HART, J. M.; AHUJA, N. Automated visual inspection of railroad tracks. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 2, p. 751–760, 2013.
73. HEIRICH, O.; ROBERTSON, P.; STRANG, T. RailSLAM - Localization of rail vehicles and mapping of geometric railway tracks. **Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation**, p. 5212–5219, 2013.
74. YANG, B.; FANG, L.; LI, J. Semi-automated extraction and delineation of 3D roads of street scene from mobile laser scanning point clouds. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 79, 2013.

75. LI, Y.; TRINH, H.; HAAS, N.; OTTO, C.; PANKANTI, S. Rail Component Detection, Optimization, and Assessment for Automatic Rail Track Inspection. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 15, n. 2, p. 760–770, 2013.
76. ELBERINK, S.; KHOSHELHAM, K.; ARASTOUNIA, M.; DIAZ BENITO, D. Rail Track Detection and Modelling in Mobile Laser Scanner Data. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. II-5/W2, n. November, p. 223–228, 2013.
77. DENNIS, E. P.; HONG, Q.; WALLACE, R.; TANSIL, W.; SMITH, M. Pavement Condition Monitoring with Crowdsourced Connected Vehicle Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2460, n. 1, p. 31–38, 2014.
78. SERAJ, F.; VAN DER ZWAAG, B. J.; DILO, A.; LUARASI, T.; HAVINGA, P. RoADS: A Road Pavement Monitoring System for Anomaly Detection Using Smart Phones. **Big Data Analytics in the Social and Ubiquitous Context**, p. 128–146, 2014.
79. THORNTON, D. A.; REDMILL, K.; COIFMAN, B. Automated parking surveys from a LIDAR equipped vehicle. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 39, n. 2014, p. 23–35, 2014.
80. VITTORIO, A.; ROSOLINO, V.; TERESA, I.; VITTORIA, C. M.; VINCENZO, P. G.; FRANCESCO, D. M. Automated Sensing System for Monitoring of Road Surface Quality by Mobile Devices. **EWGT2013 – 16th Meeting of the EURO Working Group on Transportation Automated**, v. 111, p. 242–251, 2014.
81. GULER, S. I.; MENENDEZ, M.; MEIER, L. Using connected vehicle technology to improve the efficiency of intersections. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 46, p. 121–131, 2014.
82. ZHU, L.; HYYPPA, J. The use of airborne and mobile laser scanning for modeling railway environments in 3D. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 3075–3100, 2014.
83. MOLODOVA, M.; LI, Z.; NÚÑEZ, A.; DOLLEVOET, R. Automatic Detection of Squats in Railway Infrastructure. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 18, n. 1, p. 1980–1990, 2014.
84. JWA, Y.; SONH, G. Kalman Filter Based Railway Tracking From Mobile Lidar Data. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. II-3/W5, p. 159–164, 2015.
85. ZENG, H.; PARK, H.; FONTAINE, M. D.; SMITH, B. L. Identifying Deficient Pavement Sections using an Improved Acceleration-based Metric. **Transportation Research Record**, p. 0–16, 2015a.
86. TASSERON, G.; MARTENS, K.; VAN DER HEIJDEN, R. The potential impact of vehicle-to-vehicle and sensor-to-vehicle communication in urban parking. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 7, n. 2, p. 22–33, 2015.
87. SEO, T.; KUSAKABE, T.; ASAKURA, Y. Estimation of flow and density using probe vehicles with spacing measurement equipment. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 53, p. 134–150, 2015.

88. LI, Z.; MOLODOVA, M.; NUNEZ, A.; DOLLEVOET, R. Improvements in Axle Box Acceleration Measurements for the Detection of Light Squats in Railway Infrastructure. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 7, p. 4385–4397, 2015.
89. DU, R.; CHEN, C.; YANG, B.; LU, N.; GUAN, X.; SHEN, X. Effective urban traffic monitoring by vehicular sensor networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 64, n. 1, p. 273–286, 2015.
90. JO, Y.; RYU, S. Pothole Detection System Using a Black-box Camera. **Sensors**, v. 15, n. 12, p. 29316–29331, 2015.
91. YI, W.; LO, K.; MAK, T.; LEUNG, K.; LEUNG, Y.; MENG, M. A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems. **Sensors**, v. 15, 2015.
92. MADLI, R.; HEBBAR, S.; PATTAR, P.; GOLLA, V. Automatic detection and notification of potholes and humps on roads to aid drivers. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 8, p. 4313–4318, 2015.
93. MUELLER, M. D.; HASENFRATZ, D.; SAUKH, O.; FIERZ, M.; HUEGLIN, C. Statistical modelling of particle number concentration in Zurich at high spatio-temporal resolution utilizing data from a mobile sensor network. **Atmospheric Environment**, v. 126, p. 171–181, 2016.
94. SANGUESA, J.; BARRACHINA, J.; FOGUE, M.; GARRIDO, P.; MARTINEZ, F.; CANO, J.-C.; CALAFATE, C.; MANZONI, P. Sensing Traffic Density Combining V2V and V2I Wireless Communications. **Sensors**, v. 15, n. 12, p. 31794–31810, 2015.
95. YANG, K.; GULER, S. I.; MENENDEZ, M. A Transit Signal Priority Algorithm under Connected Vehicle Environment. **IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC**, v. 2015, p. 66–70, 2015.
96. HAN, J.; CHEN, A.; LIN, Y. Image-Based Approach for Road Profile Analyses. **Journal of Surveying Engineering**, v. 142, n. 1, p. 1–9, 2016.
97. MUKHERJEE, A.; MAJHI, S. Characterisation of road bumps using smartphones. **European Transport Research Review**, v. 8, n. 2, p. 1–12, 2016.
98. BRIDGELALL, R.; HUANG, Y.; ZHANG, Z.; DENG, F. Precision enhancement of pavement roughness localization with connected vehicles. **Measurement Science and Technology**, v. 27, n. 2, p. 25012, 2016.
99. KIM, S.; KIM, H.; YOO, W.; HUH, K. Sensor Fusion Algorithm Design in Vehicles Using Laser Scanner and Stereo Vision. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 4, p. 1–13, 2016.
100. CHEN, H.; LAI, C.; SHIH, C. Toward Community Sensing of Road Anomalies Using Monocular Vision. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 8, p. 2380–2388, 2016.
101. KATICHA, S. W.; EL KHOURY, J.; FLINTSCH, G. W. Assessing the effectiveness of probe vehicle acceleration measurements in estimating road roughness. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 17, n. 8, p. 698–708, 2016.

102. KUMAR, S.; DESHPANDE, A.; HO, S. S.; KU, J. S.; SARMA, S. E. Urban Street Lighting Infrastructure Monitoring Using a Mobile Sensor Platform. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 12, p. 4981–4994, 2016.
103. ALESSANDRONI, G.; CARINI, A.; LATTANZI, E.; FRESCHI, V.; BOGLIOLO, A. A Study on the Influence of Speed on Road Roughness Sensing: The SmartRoadSense Case. **Sensors**, v. 17, n. 2, 2017.
104. HAO, P.; BORIBOONSOMSIN, K.; WU, G.; BARTH, M. J. Modal Activity-Based Stochastic Model for Estimating Vehicle Trajectories from Sparse Mobile Sensor Data. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 18, n. 3, p. 701–711, 2017.
105. HESTER, D.; GONZALEZ, A. A discussion on the merits and limitations of using drive-by monitoring to detect localised damage in a bridge. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 90, p. 234–253, 2017.
106. LEDERMAN, G.; CHEN, S.; GARRETT, J.; KOVACEVIC, J.; NOH, H. Y.; BIELAK, J. Track-monitoring from the dynamic response of an operational train. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 87, n. A, p. 1–16, 2017.
107. TADIC, S.; STANCIC, R.; SARANOVAC, L. V.; IVANIS, P. N. Vehicle Collision Reconstruction With 3-D Inertial Navigation and GNSS. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 66, n. 1, p. 14–23, 2017.