



Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Computação



Pedro Paulo Libório Lima do Nascimento

Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas de
Localização para Redes Veiculares e Sistemas de
Transportes Inteligentes

CAMPINAS
2017

Pedro Paulo Libório Lima do Nascimento

**Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas de Localização para
Redes Veiculares e Sistemas de Transportes Inteligentes**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Computação da Universidade Estadual de
Campinas como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Ciência da
Computação.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Aparecido Villas
Coorientador: Prof. Dr. Daniel Ludovico Guidoni

Este exemplar corresponde à versão final da
Dissertação defendida por Pedro Paulo
Libório Lima do Nascimento e orientada
pelo Prof. Dr. Leandro Aparecido Villas.

CAMPINAS
2017

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): FUNCAMP, 519.292-1/268-15; CNPq, 132244/2016-0

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica
Ana Regina Machado - CRB 8/5467

N17d Nascimento, Pedro Paulo Libório Lima do, 1991-
Desenvolvimento e avaliação de técnicas de localização para redes veiculares e sistemas de transportes inteligentes / Pedro Paulo Libório Lima do Nascimento. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Leandro Aparecido Villas.
Coorientador: Daniel Ludovico Guidoni.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação.

1. Redes ad hoc veiculares (Redes de computadores). 2. Sistema de Posicionamento Global. 3. Sistemas de computação sem fio. 4. Sistemas inteligentes de veículos rodoviários. 5. Computação móvel. I. Villas, Leandro Aparecido, 1983-. II. Guidoni, Daniel Ludovico. III. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Development and evaluation of localization techniques for vehicular ad hoc networks and intelligent transportation systems

Palavras-chave em inglês:

Vehicular ad hoc networks (Computer networks)
Global Positioning System
Wireless telecommunication systems
Intelligent transportation systems
Mobile computing

Área de concentração: Ciência da Computação

Titulação: Mestre em Ciência da Computação

Banca examinadora:

Leandro Aparecido Villas [Orientador]
Bruno Yuji Lino Kimura
Luiz Fernando Bittencourt

Data de defesa: 26-05-2017

Programa de Pós-Graduação: Ciência da Computação



Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Computação



Pedro Paulo Libório Lima do Nascimento

Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas de Localização para Redes Veiculares e Sistemas de Transportes Inteligentes

Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Leandro Aparecido Villas
Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas
- Prof. Dr. Bruno Yuji Lino Kimura
Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo
- Prof. Dr. Luiz Fernando Bittencourt
Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros da banca encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 26 de maio de 2017

Dedicatória

A meu pai, Sr. Paulo Libório do Nascimento (*in memoriam*).

*Mentes são como pára-quedas.
Elas só funcionam quando são abertas.*

(James Dewar)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me iluminado e guiado até aqui.

Agradeço a minha família, aos meus pais Sr. Paulo Libório do Nascimento (*in memoriam*) e Sr^a Ivany Barbosa Lima por todo apoio e dedicação dispensados a mim em toda trajetória acadêmica, sem vocês jamais teria chegado até aqui.

Agradeço a minha namorada Raiana Coelho, por todo amor, apoio e dedicação. Ela sempre está disposta a me ouvir e motivar nos momentos difíceis e de recompensa e alegria. Obrigado por dividir a sua vida comigo e fazer parte da minha.

Agradeço ao Prof. Dr. Leandro Villas pela oportunidade de trabalhar em seu grupo de pesquisa. Obrigado pela paciência, apoio e dedicação nestes dois anos de trabalho. Agradeço também ao Prof. Dr. Daniel Guidoni pela paciência e orientação.

Agradeço ao Prof. Richard Pazzi pela oportunidade de colaboração científica no Canadá. Experiência muito enriquecedora, que teve forte impacto na minha vida profissional e pessoal.

Agradeço aos meus amigos, que sempre torcem muito pelo meu sucesso. Sem vocês os momentos de descanso entre uma atividade e outra não seriam os mesmos.

Agradeço aos amigos do Laboratório de Redes de Computadores - LRC, pela amizade, atenção e colaboração. Eles são responsáveis pelos momentos de descontração entre códigos, experimentos, *papers* e *deadlines*.

Também gostaria de agradecer a todos os autores dos trabalhos citados nesta dissertação. Sem a colaboração científica de cada um deles, este trabalho não seria possível.

Agradeço à UNICAMP por ter me acolhido como aluno de mestrado e ter proporcionado um ensino de qualidade e excelência.

Agradeço aos funcionários e professores do Instituto de Computação que sempre estiveram dispostos a me ajudar em diversas atividades e a resolver diversos problemas e desafios.

Por fim agradeço as instituições brasileiras de fomento, FAPESP, CNPq e ao governo canadense pelo programa ELAP.

Resumo

Devido aos diversos problemas nos sistemas de tráfego ocasionados pela evolução dos grandes centros urbanos, existe o campo de estudo dos Sistemas de Transportes Inteligentes (Intelligent Transportation Systems, ITS), que visa prover metodologias de comunicação, processamento e armazenamento de dados voltados para o segmento de transportes e comutação de pessoas nas cidades. Neste contexto, o advento das tecnologias de comunicação sem fio, sobretudo das tecnologias de comunicação sem fio dedicadas e de curto alcance, culminaram no surgimento do padrão de comunicação sem fio IEEE 802.11p para as Redes Ad Hoc Veiculares (Vehicular Ad Hoc Networks, VANETs). Nos últimos anos, uma miríade de protocolos, aplicações e serviços vêm sendo desenvolvidos com os mais diversos objetivos, variando desde conforto a segurança. Muitos destes serviços confiam em algum sistema de localização, e necessitam de diferentes níveis de acurácia para seu pleno funcionamento. A solução imediata para localização em VANETS e ITS são os Sistemas de Navegação Global via Satélite (*Global Navigation Satellite System, GNSS*). No entanto, os sistemas GNSS sofrem problemas de inacurácia e indisponibilidade em zonas urbanas densas, rodovias multinível e túneis, o que representa um desafio para os protocolos, aplicações e serviços que confiam em localização. Com esta motivação, primeiramente foi realizada uma caracterização dos problemas de inacurácia e indisponibilidade dos sistemas GPS a partir de *datasets* reais. Foram selecionadas regiões no entorno de túneis. Uma vez que os nós da rede veicular são dotados de capacidade de comunicação sem-fio, processamento e armazenamento. Foram desenvolvidas e avaliadas as técnicas de localização *Dead Reckoning* e uma abordagem *Cooperative Positioning* onde os veículos compartilham suas estimativas de localização por meio da rede veicular com o objetivo de melhorar suas estimativas de localizações. As situações de indisponibilidade caracterizadas nos *datasets* foram reproduzidas em ambiente de simulação para validação das soluções de localização propostas. Resultados de simulação apresentam um ganho médio de 60% a 80% da solução *Dead Reckoning* em termos do *Erro Médio Quadrático (Root Mean Square Error, RMSE)*, se comparados com os resultados da solução *stand alone* GPS. Os resultados da solução *Cooperative Positioning* apresentam um ganho médio entre 80% e 92% no RMSE em relação a solução GPS *stand alone*, e entre 23% a 74% em relação a solução *Dead Reckoning*. Além disso, as soluções conseguem cobrir 100% das zonas de indisponibilidade do GPS nos cenários avaliados.

Abstract

Due to the many problems in the traffic systems caused by the evolution of the large urban centers, there is the field of study of Intelligent Transportation Systems (ITS), which aims to provide communication, data processing and storage methodologies for the transport of people, assets and services in the cities. In this context, the advent of the wireless communications technologies especially the Dedicated Short Range Communications (DSRC), culminated in the development of the IEEE 802.11p standard for Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs). In recent years, a myriad of protocols, applications, and services have been developed with a wide range of objectives, ranging from comfort to security. Many of these services rely on some location system, and require different levels of accuracy for their full operation. The Global Navigation Satellite Systems (GNSSs) are an off-the-shelf solution for localization in VANETS and ITS. However, GNSS systems suffer from problems of inaccuracy and unavailability in dense urban areas, multilevel roads and tunnels, posing a challenge for protocols, applications and services that rely on localization. With this motivation, we first carried out a characterization of the problems of inaccuracy and unavailability of GPS systems from real datasets. Regions were selected around tunnels. Since the nodes of the vehicular network are endowed with wireless communication, processing and storage capabilities. A Dead Reckoning technique and a Cooperative Positioning approach were developed and evaluated. Vehicles share their location estimates using the vehicular network in order to improve their locations. The unavailability situations characterized in the data sets were reproduced in a simulation environment to validate the proposed localization solutions. Simulation results show an average gain of 60% to 80% of the Dead Reckoning solution in terms of RMSE, when compared to the results of the stand alone GPS solution. The results of the Cooperative Positioning solution show an average gain between 80% and 92% in the RMSE compared to the stand alone GPS solution, and between 23% and 74% in relation to the Dead Reckoning solution. In addition, the solutions can support 100% of the GPS unavailability zones on the evaluated scenarios.

Lista de Figuras

2.1	Padrões de comunicação em VANETs	19
2.2	Canais DSRC e suas respectivas finalidades[17].	20
2.3	Arquitetura WAVE [17].	21
2.4	Principais técnicas de localização em VANETs .[8].	22
2.5	Filtro Passa baixa para diferentes valores de α	27
2.6	Path Loss	29
2.7	RSSI	30
2.8	Multilateração (Caso Ideal).	32
2.9	Multilateração (Múltiplas Soluções).	33
2.10	Multilateração (Erro na Entrada).	33
4.1	<i>Multipath effect</i>	38
4.2	<i>Caracterização</i>	39
4.3	Caracterização de tempos e distâncias sem GPS.	40
4.4	Estimativa de Erro GPS.	41
4.5	Caracterização de Erros GPS.	42
5.1	Triângulo Elipsoidal[18].	44
5.2	Ad Hoc Local Dead Reckoning	46
5.3	PDF dos erros GPS no túnel DPT.	48
5.4	PDF dos erros GPS para todos os túneis.	48
5.5	Fluxograma Dead Reckoning	49
5.6	DMAT	51
5.7	YBT	51
5.8	RCLT	51
5.9	RIO 450	52
5.10	DPT	52
5.11	RMSE para diferentes níveis de tempo de queda em (%).	54
6.1	Cooperative Positioning	55
6.2	Estimativa de Localização e Erro por Ciclo com uso da Solução CP.	59
6.3	RMSE para diferentes níveis de tempo de queda em (%).	61

Lista de Tabelas

1.1	Acurácia de Localização para Diferentes Aplicações em VANETs e ITS [8].	15
2.1	Características de Diferentes Tipos de Redes [23].	17
3.1	Comparação dos Trabalhos Relacionados	36
4.1	Características dos Túneis	39
5.1	Parâmetros dos Veículos	47
5.2	Parâmetros GPS	49
5.3	Parâmetros Dead Reckoning	49
5.4	Ganho Médio da Solução <i>Dead Reckoning</i>	53
6.1	Parâmetros da Rede Veicular	59
6.2	Ganho Médio da Solução <i>Cooperative Positioning</i>	60

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	16
1.3	Contribuições	16
1.4	Estrutura da Dissertação	16
2	Fundamentação Teórica	17
2.1	Redes Veiculares (VANETs)	17
2.1.1	Componentes das VANETs	17
2.1.2	Tipos de Comunicação	18
2.2	Arquitetura das VANETs	19
2.2.1	Arquitetura IEEE 802.11p WAVE	20
2.3	Técnicas de Localização	21
2.3.1	Global Positioning System (GPS)	21
2.3.2	Differential Global Positioning System (DGPS)	22
2.3.3	Map Matching	22
2.3.4	Cellular Localization	23
2.3.5	Image/Video Localization	23
2.3.6	Dead Reckoning	24
2.3.7	Sensores	24
2.3.8	Giroscópio	24
2.3.9	Odômetro	25
2.3.10	Modelo de Erros	26
2.3.11	Filtro Passa Baixa	26
2.3.12	Cooperative Positioning	27
2.3.13	RSSI	28
2.3.14	Multilateração	30
2.3.15	Problemas da Geometria de Posicionamento e erros RSSI	32
2.4	Conclusões	32
3	Trabalhos Relacionados	34
4	Caracterização dos Problemas de Indisponibilidade e Erros do GPS	37
4.1	Data Sets	37
4.2	Caracterização da Indisponibilidade do GPS	38
4.3	Caracterização do Erro GPS	41
4.4	Conclusão	43

5	Solução Dead Reckoning	44
5.1	Geodesic Dead Reckoning	44
5.2	Ad Hoc Local Dead Reckoning	45
5.3	Parâmetros de Simulação	47
5.4	Resultados	49
5.5	Conclusões	53
6	Solução Cooperative Positioning	55
6.1	Disseminação da Informação de Posicionamento	56
6.2	Seleção e Filtragem dos Nós de Referência	56
6.3	Solução Proposta	57
6.4	Parâmetros de Simulação	58
6.5	Resultados	59
6.6	Conclusões	60
7	Considerações Finais e Trabalhos Futuros	62
7.1	Considerações Finais	62
7.2	Trabalhos Futuros	63
	Referências Bibliográficas	64
A	Resultados da Caracterização	68

Capítulo 1

Introdução

O advento dos grandes centros urbanos e a conseqüente evolução dos sistemas de tráfego, tem permitido a melhoria do transporte público e privado de pessoas, bens e serviços. No entanto, juntamente com esta evolução, novos problemas surgiram como os congestionamentos, gerenciamento do tráfego e controle e prevenção de acidentes. Neste contexto surgiram os Sistemas de Transportes Inteligentes (do inglês, Intelligent Transportation Systems - ITS), que visam prover metodologias de comunicação, processamento e armazenamento de dados voltados para o segmento de transportes e comutação de pessoas nas cidades.

As soluções para ITS utilizam diversas tecnologias para realizar a comunicação. O advento das tecnologias de comunicação sem fio, sobretudo das tecnologias de comunicação sem fio dedicadas e de curto alcance, culminaram no surgimento do padrão de comunicação sem fio IEEE 802.11p para as redes veiculares (do inglês, Vehicular Ad Hoc Networks - VANETs). Uma VANET é um paradigma de rede que foi desenvolvido para suprir as necessidades de mobilidade e comunicação específicas de uma rede composta por veículos. Diversos protocolos e aplicações oferecidos em ITS utilizam uma VANET para entrega de um determinado serviço.

A solução imediata de localização é embarcar um receptor de GPS (do inglês, *Global Positioning System*) em cada dispositivo. Porém, os Sistemas de Navegação Global via Satélite (do inglês, Global Navigation Satellite System, GNSS) (por exemplo, GPS, Galileo, GLONASS, BEIDU), apresentam alguns problemas indesejáveis, tais como não estar sempre disponível e sofrer atenuação devido a variados tipos de interferência/occlusão dos sinais provenientes dos satélites. Mais ainda, o erro típico de localização está entre 5 e 30 metros, o que não satisfaz os requisitos de diversas aplicações, inclusive críticas, e implica a necessidade de outras técnicas de localização.

O problema de localização de nós fixos em redes de sensores tem sido amplamente explorado na literatura [6]. No entanto, as soluções propostas para o problema de localização de nós fixos não são adequadas para redes com nós móveis, como as redes veiculares. Uma série de técnicas de localização têm sido propostas para calcular a posição dos nós móveis nomeadas como *Map Matching* [21] *Dead Reckoning* [22], *Cellular Localization* [36], *Image/Video Processing* [38][40], *GPS e Differential GPS* [41]. Todas estas técnicas têm vantagens e desvantagens, mas nenhuma delas satisfaz todos os requisitos de aplicações críticas ao mesmo tempo, tais como a disponibilidade em qualquer lugar e a qualquer

momento, com os cálculos de posição altamente precisos e confiáveis.

1.1 Motivação

Os diversos protocolos e aplicações desenvolvidos para os sistemas de transporte inteligentes e redes veiculares necessitam de diferentes níveis de localização, que variam de acordo com o grau de criticidade dos respectivos serviços oferecidos. Alguns sistemas de localização toleram erros na faixa de 30 metros, como sistemas de localização baseados em mapas, utilizados para localizar pontos ou zonas de interesse em uma cidade. Por outro lado, serviços como aplicações que envolvem a segurança dos motoristas, como os sistemas anti-colisão e as aplicações que fornecem assistência ao motorista, são dependentes de alta acurácia de localização e disponibilidade. A assistência ao motorista tem como objetivo fornecer informações das condições da via e do ambiente ao qual o veículo está trafegando (inclusive posicionamento dos veículos e pontos de referência), fornecendo maior segurança a todos os envolvidos no tráfego. Como consequência, situações catastróficas para os motoristas e o tráfego como um todo podem ser evitadas. A Tabela 1.1 sumariza as principais aplicações das redes veiculares de acordo com suas respectivas demandas de localização.

Tabela 1.1: Acurácia de Localização para Diferentes Aplicações em VANETs e ITS [8].

Técnica	Acurácia de Localização		
	Baixo	Médio	Alto
Roteamento	✓	-	-
Disseminação de Dados	✓	-	-
Localização por Mapas	✓	-	-
Controle de Cruzamento Cooperativo	-	✓	-
Controle e Segurança de Intersecções	-	✓	-
<i>Blind Crossing</i>	-	✓	-
<i>Platooning</i>	-	✓	-
Sistemas de Alerta de Colisão	-	-	✓
Melhoria de Visibilidade	-	-	✓
Estacionamento Automático	-	-	✓

A solução imediata para localização é o uso de um sistema GNSS. No entanto, em cenários como túneis, rodovias multinível e zonas urbanas densas, os sinais emitidos pelos satélites são bloqueados ou atenuados e diversos problemas ocorrem. Para os motoristas que estão em zonas desconhecidas a navegação pode ser intermitente ou falhar. Especialmente quando o veículo está saindo de um túnel, resultando em frustração, perda de tempo e de combustível. No contexto de veículos de emergência, como veículos de policiamento e vigilância, ambulâncias e carros do corpo de bombeiros, estes serviços podem ser impedidos de encontrar uma determinada localidade de uma acidente em tempo hábil. As aplicações críticas, como sistemas de alerta de colisão e outras aplicações de assistência ao motorista, necessitam de uma localização precisa e confiável.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o estudo, desenvolvimento e avaliação de técnicas de localização para Redes Veiculares e Sistemas de Transportes Inteligentes, no contexto das situações de indisponibilidade do GPS. Para isso os seguintes objetivos específicos, foram alcançados:

- Estudar as principais técnicas de localização utilizadas em VANETs e ITS.
- Caracterizar os problemas de inacurácia e indisponibilidade do Sistema GPS a partir de *datasets* reais.
- Desenvolver uma solução *Dead Reckoning* para suprir as situações de indisponibilidade dos sistemas GNSS.
- Desenvolver uma solução *Cooperative Positioning* que utilize a tecnologia WAVE 802.11p das redes veiculares, para compartilhamento de informações de posicionamento entre os veículos e melhoria de suas respectivas estimativas de localização.

1.3 Contribuições

Resultados parciais deste trabalho foram publicados nas seguintes conferências:

- Pedro P. L. L. do Nascimento, Richard W. Pazzi, Daniel L. Guidoni, and Leandro A. Villas. Characterizing GPS outages: Geodesic Dead Reckoning solution for VANETs and ITS. In *2016 IEEE 15th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA)*, pages 18–21. IEEE, oct 2016
- Pedro P. L. L. do Nascimento, Richard W. Pazzi, Daniel L. Guidoni, and Leandro A. Villas. A Geodesic Dead Reckoning Solution for Vehicular Networks. In *2016 8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, pages 1–6. IEEE, nov 2016

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos. O Capítulo 2 apresenta a Fundamentação Teórica. São apresentadas uma visão geral das VANETs (componentes, formas de comunicação e arquitetura) e um estudo das técnicas de localização existentes para VANETs e ITS. No Capítulo 3 são discutidos os trabalhos relacionados. No Capítulo 4 é definido o processo de caracterização das situações de indisponibilidade do GPS a partir de *datasets* reais. No Capítulo 5 são apresentados os detalhes e avaliação da solução *Dead Reckoning*, para suprir os problemas de indisponibilidade do GPS. No Capítulo 6, são discutidos e avaliados a performance da solução *Cooperative Positioning*. Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões desta dissertação, bem como os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Redes Veiculares (VANETs)

As redes veiculares (*Vehicular Ad Hoc Networks - VANETs*) podem ser concebidas como um caso especial das redes móveis (*Mobile Ad Hoc Networks - MANETs*). Uma VANET pode ser vista como uma rede móvel, auto organizável, composta por veículos com capacidade de comunicação sem fio, armazenamento e processamento.

VANETs e MANETs apresentam algumas características em comum, como baixa largura de banda, transmissão de curto alcance e broadcast omnidirecional. No entanto, as VANETs possuem características únicas, como topologia altamente dinâmica, frequentes desconexões, modelo de mobilidade, modelo de propagação e densidade variável dos nós. Essas características são desafios que todo pesquisador da área de redes veiculares deve estar ciente e considerar no projeto de suas soluções. Além disso, muitas técnicas para solução dos problemas das redes de sensores (*Wireless Sensor Networks - WSNs*) têm sido adaptados para solucionar os problemas das VANETs. No entanto adaptações precisam ser realizadas, ou novas soluções desenvolvidas, principalmente pelas diferentes características entre essas redes. A Tabela 2.1 situa uma VANET em relação aos demais tipos conhecidos de redes.

Tabela 2.1: Características de Diferentes Tipos de Redes [23].

Propriedade	MANETs	WSNs	VANETs
Tamanho da Rede	Médio	Grande	Grande
Mobilidade dos nós	Randômica	Maioria dos nós estáticos	Alta e não randômica
Limitação de Energia	Alta	Muito alto	Muito baixa
Poder Computacional	-	Muito baixo	Alto
Capacidade de Armazenamento	-	Muito baixa	Alta
Dependência de Localização	Alta	Alta	Muito Alta

2.1.1 Componentes das VANETs

Uma VANET é composta por três componentes principais a *Application Unit - AU* , a *Onboard Unit - OBU* e a *Road Side Unit - RSU* [3].

- A OBU é um dispositivo acoplado ao veículo para troca de informações com outras OBUs ou RSUs. Basicamente, este dispositivo consiste em um processador de comandos de recursos (*Resource Command Processor – RCP*). Além disto, este dispositivo inclui capacidades de leitura/escrita de memória (o que permite armazenar e recuperar informações), uma interface de usuário, uma interface específica que pode variar de OBU para OBU que permite a conexão com outras OBUs, e um dispositivo de rede equipado com a tecnologia IEEE WAVE 802.11p. É importante ressaltar que o veículo utiliza outros sensores conectados à OBU para aumentar a capacidade de produção de informações.
- A AU é um dispositivo que interage diretamente com os motoristas e passageiros do veículo. A AU utiliza as capacidades e recursos oferecidos pela OBU para estabelecer a comunicação de um veículo para outro, e para estabelecer a conexão com o provedor de recursos, internet ou RSU. A conexão entre a AU e a OBU pode ser estabelecida por uma conexão cabeada ou sem fio. Apesar de possuírem características diferentes, ambos OBU e AU podem estar contidos em um única unidade física.
- A RSU é um dispositivo fixado nas laterais das estradas, rodovias ou ruas. A RSU é equipada com um dispositivo de rede com a tecnologia IEEE WAVE 802.11p, específica para redes veiculares. A depender da implementação, outras tecnologias podem ser acrescentadas como as tecnologias sem fio 802.11 a/b/g/n. A RSU é responsável por estender o raio de comunicação da rede ad hoc redistribuindo a informação para outras RSUs de modo que mais OBUs são atendidas. Possui a capacidade de executar algumas aplicações de segurança que juntamente com sensores e as informações obtidas pelas OBUs, fornece mensagens como as de aviso de acidentes, zonas de risco, condições climáticas sendo esta uma lista não exaustiva.

2.1.2 Tipos de Comunicação

O modelo de comunicação de uma rede veicular considera a comunicação entre os veículos nas proximidades, e entre os veículos e os equipamentos fixos nas laterais das rodovias, ruas ou estradas. As diversas aplicações que são desenvolvidas para as redes veiculares consideram diferentes formas de comunicação. Os diversos trabalhos da literatura consideram três padrões de comunicação:

- **Veículo-Para-Veículo (V2V):** considera a troca direta de informações entre os veículos, desconsiderando uma infraestrutura central fixa que controle o tráfego de informações.
- **Veículos-Para-Infraestrutura (V2I):** nesta abordagem o veículo possui a capacidade de comunicação com a infraestrutura de controle da rodovia.
- **Comunicação Híbrida:** combina ambos modelos supracitados (V2V e V2I).

A Figura 2.1 apresenta uma visão geral dos componentes das VANETs e seus diferentes padrões de comunicação.

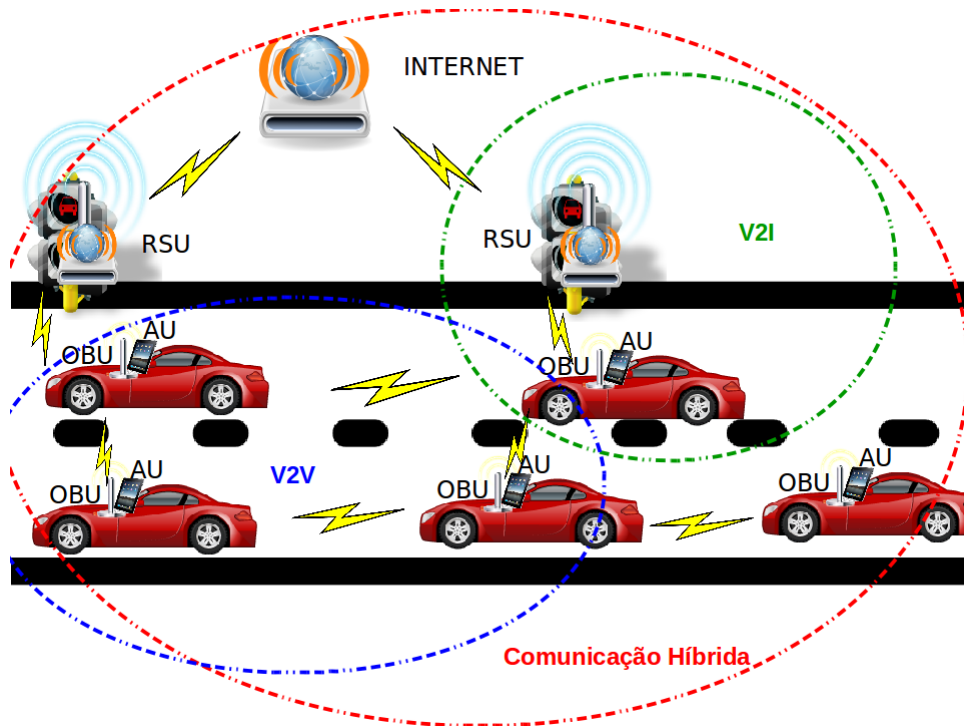


Figura 2.1: Padrões de comunicação em VANETs .

Recentes avanços e a grande disponibilidade de tecnologias de acesso sem fio são esperados para culminar na integração de diferentes redes sem fio baseada em padrões tais como o IEEE 802.11, 4G/5G e as redes de sensores sem fio para a próxima geração de redes veiculares. Nesta arquitetura, técnicas de comunicação de longa distância, como redes de celular e outras técnicas de comunicação sem fio, prometem fornecer acesso à Internet para os veículos, enquanto as técnicas de comunicação de curta distância, como o *Dedicated Short Range Communications (DSRC)* [15] fornecem comunicações de curto alcance de uma forma ad hoc. Espera-se que a próxima geração de sistemas de transportes inteligentes opere e preste melhores serviços em qualquer lugar e a qualquer momento. Assim, o sucesso da futura geração de redes veiculares, essencialmente, depende da integração de diferentes tecnologias sem fio e de como as aplicações e serviços farão uso da heterogeneidade de tais redes.

2.2 Arquitetura das VANETs

Os primeiros esforços para padronização das redes veiculares remontam ao ano de 1999. Neste ano, a *Federal Communications Commission (FCC)* reservou 75MHz do espectro de frequências, mais precisamente no escopo de 5,9 GHz, para aplicações DSRC. Ao definir o DSRC, a FCC tinha em mente prover altas taxas de transferência de dados e baixa latência de comunicação em pequenas zonas de interesse. Em 2003, a *The American Society for Testing and Materials - ASTM*¹ aprovou o padrão ASTM-DSRC, este padrão

¹ASTM é uma organização voluntária para o desenvolvimento de padrões para produtos, sistemas e serviços.

ainda era baseado no IEEE 802.11a para a camada física e o 802.11 para a camada de enlace MAC. Em 2004, a FCC publicou um relatório onde definia regras para o uso da banda DSRC.

Basicamente o espectro DSRC é livre, uma vez que a FCC não ganha pelo uso desta faixa frequências. Porém, o DSRC possui restrição para quem deseja fazer uso deste espectro. O DSRC foi dividido em 7 canais de 10MHz cada como mostra a Figura 2.2. O canal 178 foi definido para controle e deve ser utilizado por aplicações de segurança crítica, enquanto que os demais canais foram classificados entre aplicações críticas ou não críticas havendo algumas variações no raio de alcance de acordo com a potencia de sinal utilizada.

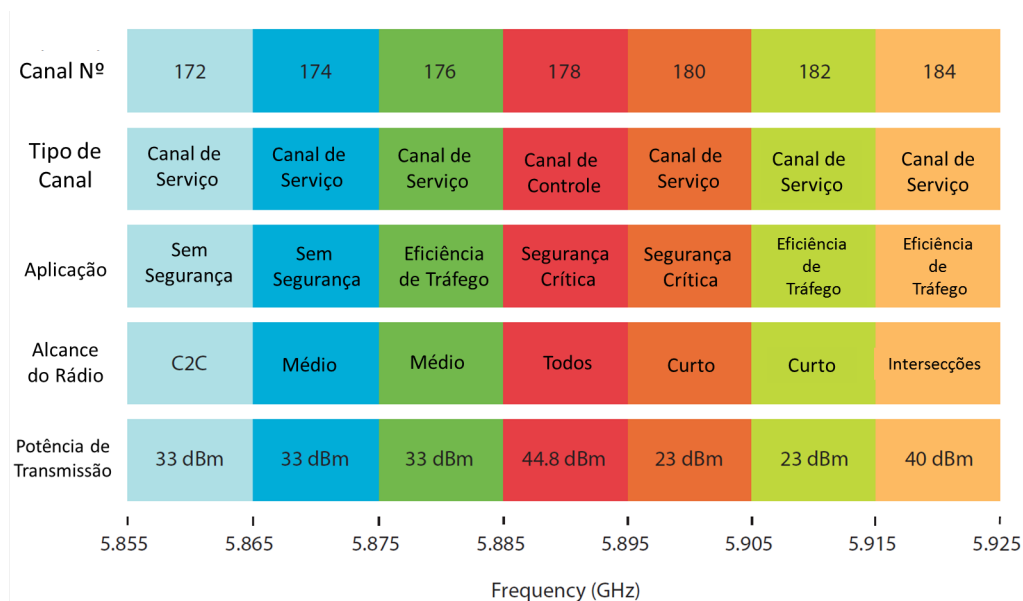


Figura 2.2: Canais DSRC e suas respectivas finalidades[17].

Posteriormente, o DSRC foi modificado para ser utilizado com um novo padrão definido pelo IEEE, o 802.11p. A motivação principal foi o fato dos padrões tradicionais da camada MAC do 802.11 sofrerem significantes sobrecargas quando utilizados em cenários de redes veiculares. Para superar essas limitações, o grupo de trabalho do DSRC alocado no ASMT2313 migrou para o grupo de padronização do IEEE onde o DSRC foi renomeado como IEEE 802.11p *Wireless Access in Vehicular Environment* (WAVE).

2.2.1 Arquitetura IEEE 802.11p WAVE

A arquitetura WAVE foi definida com base nos padrões da família IEEE 1609 e no padrão IEEE 802.11. De forma sucinta, o padrão IEEE 1609.4 fica ao lado da camada de enlace, e permite a operação das camadas superiores em múltiplos canais, sem a necessidade de qualquer conhecimento sobre os parâmetros da camada física. O IEEE 1609.3 trata das configurações e gerenciamento da conexão. O IEEE 1609.2 trata dos padrões que definem uma mensagem segura e seu processamento. Esta norma também define as circunstâncias para troca de mensagens seguras e como essas mensagens devem ser processadas após o

recebimento. Por último, mas não menos importante, está o padrão IEEE 1609.1 que define o gerenciamento de recursos com o objetivo de sincronizar a OBU com a RSU quanto ao uso de memória e processamento. A Figura 2.3 apresenta uma visão geral da arquitetura WAVE e suas camadas.

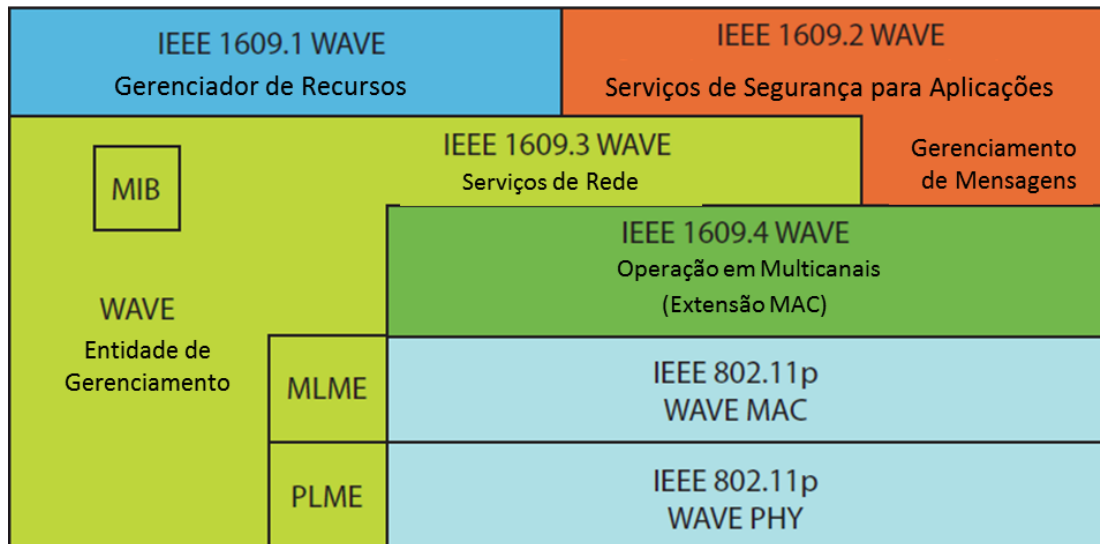


Figura 2.3: Arquitetura WAVE [17].

2.3 Técnicas de Localização

Na literatura, algumas técnicas de localização têm sido propostas para computar a posição de nós móveis. A Figura 2.4 apresenta estas técnicas: *Map Matching*, *Dead Reckoning*, *Cellular Localization*, *Image/Video Processing* e *Wifi Localization*. Todas estas técnicas possuem vantagens e desvantagens. A seguir, realizamos um estudo das principais técnicas de localização e apresentamos os prós e contras de cada técnica. O resultado deste estudo nos permitiu definir as técnicas de localização desenvolvidas e avaliadas nesta dissertação e suas respectivas justificativas.

2.3.1 Global Positioning System (GPS)

A técnica de localização mais conhecida é o *Global Positioning System (GPS)*, que é composto por 24 satélites que operam em uma órbita ao redor da terra. Cada satélite circula a terra à uma altura de 20.200 km e faz duas rotações completas a cada dia. A órbita dos satélites é definida de modo que cada região da terra consiga “visualizar” pelo menos quatro satélites. O receptor GPS propriamente dito é um equipamento capaz de receber a informação constantemente transmitida pelos satélites e usa essa informação para estimar sua distância em relação a pelo menos quatro satélites conhecidos utilizando uma técnica denominada *Time of Arrival (TOA)* [41]. Por fim, através de uma multilateração, o dispositivo é capaz de calcular sua posição. Após este processo, o receptor é capaz de saber a sua latitude, longitude e altitude.

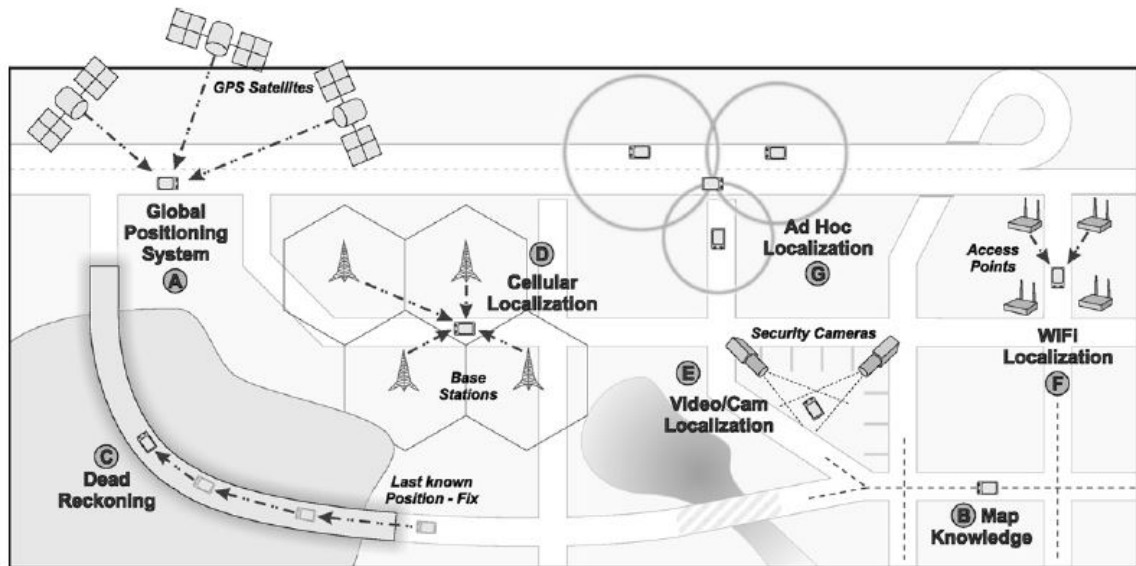


Figura 2.4: Principais técnicas de localização em VANETs .[8].

A principal solução para a localização em VANETs é o uso de um receptor GPS para cada veículo. A depender do cenário onde aplica-se o GPS, os sinais provenientes dos satélites podem ser distorcidos ou até mesmo impedidos por obstáculos como prédios, formações rochosas, interferência eletrônica, túneis, sendo esta uma lista não exaustiva. A depender do impacto de tais interferências, a solução de GPS pode perder drasticamente sua capacidade de localização tornando-se até mesmo indisponível. Os dispositivos GPS têm um erro de 5m a 30m o que pode ser aceitável para algumas aplicações, porém impreciso para aplicações críticas em VANETs [8].

2.3.2 Differential Global Positioning System (DGPS)

O *Differential GPS* é uma melhoria do GPS que utiliza a informação dos dispositivos GPS no seu entorno para melhorar a acurácia dos cálculos de sua localização, diminuindo a taxa de erro. Após o cálculo, o dispositivo de GPS propaga essa informação para os dispositivos vizinhos que melhoram a acurácia do cálculo de sua posição. Um detalhe importante é que esta técnica necessita de estações responsáveis por propagar essa informação para os demais dispositivos [27]. Esta característica do DGPS fornece uma maior acurácia no cálculo da posição do veículo, tornando a solução por GPS mais aceitável para aplicações que necessitam melhores estimativas de posicionamento em VANETs .

2.3.3 Map Matching

Os avanços nos Sistemas de Informação Geográfica (*Geographic Information Systems - GIS*) têm permitido a coleta, armazenamento e acesso a dados geográficos muito precisos, mesmo para equipamentos com pouca capacidade de processamento. Esta tecnologia é aplicada com sucesso em sistemas de localização sobre mapas para navegação em veícu-

los²³. Diversas posições obtidas em períodos de tempo regulares são usadas para criar uma trajetória estimada. Esta trajetória estimada é então comparada com dados de mapas digitais conhecidos para encontrar a geometria do caminho mais adequado no mapa que corresponde à trajetória [21]. Esta técnica é conhecida como *Map Matching*. Usando esta técnica, a informação de posição (por exemplo, a partir de GPS) pode ser representada com precisão no mapa.

2.3.4 Cellular Localization

A técnica *Cellular Localization* utiliza a infraestrutura celular móvel presente em grande parte dos centros urbanos para estimar a posição de um objeto. Algumas aplicações utilizam essa tecnologia: telefones móveis, rastreamento e posicionamento de animais domésticos e localização de veículos[36]. Estes sistemas são dependentes de uma infraestrutura que deve ser composta por estações base distribuídas em uma área de cobertura. Em termos de acurácia, a técnica *Cellular Localization* é geralmente menos precisa em relação ao GPS. O potencial de precisão é afetado principalmente pelas condições da área urbana, quantidade de estações base, algoritmo de posicionamento utilizado, sendo esta uma lista não exaustiva. O erro médio de localização varia de 90m a 250m [8].

Apesar desta inacurácia, a infraestrutura de celular geralmente possui maior disponibilidade em zonas densas urbanas e locais cuja infraestrutura pública está bem consolidada. Nesses cenários a tecnologia de GPS possui maior imprecisão e, portanto, a técnica *Cellular Localization* pode ser utilizada juntamente com outras técnicas, como *Map Matching* e/ou *Dead Reckoning* [8], para fornecer maior confiabilidade e precisão na localização dos veículos.

2.3.5 Image/Video Localization

Para os fins de localização, em alguns casos, as câmeras que já estão instaladas nos estacionamentos e no sistema viário das cidades podem ser utilizadas. As técnicas de *Image/Video Processing*, juntamente com algumas técnicas de *filtering* como o *Extended Kalman Filter* são utilizados para estimar a posição do veículo com maior acurácia. De fato, imagens e informações de vídeo são fontes reais a partir das quais podemos calcular os parâmetros de localização de um veículo. Alguns trabalhos [38][40] têm utilizado as técnicas de visão computacional para detectar os veículos e os lados das pistas utilizando imagens de vídeo. Como resultado, são estimados precisamente os parâmetros geométricos do veículo em um sistema de referência local, incluindo largura da via, curvatura lateral da via, distância do veículo a partir das laterais da via, o ângulo de direção do veículo, e o ângulo de inclinação da câmera. Além disso é possível aumentar a precisão da localização na via em que o veículo está trafegando.

²Open Source Routing Machine (OSRM): <http://project-osrm.org/>

³Mapbox: <https://www.mapbox.com/blog/map-matching/>

2.3.6 Dead Reckoning

A técnica de *Dead Reckoning* considera a última posição obtida do veículo para o cálculo de novas posições em intervalos regulares de tempo. A informação da última posição pode ser obtida através da utilização de receptores GPS ou através da localização de algum ponto de referência no entorno do veículo, como uma RSU por exemplo. Além disso, esta técnica utiliza informações como direção, velocidade, aceleração, distância, tempo e qualquer outra variável que permita aprimorar a acurácia da localização. A informação de deslocamento pode ser obtida através de um sensor como o odômetro, enquanto a direção pode ser obtida através de outros sensores, como compassos digitais e giroscópios [22]. Uma aplicação viável do *Dead Reckoning* pode ser realizada em curtos períodos de tempo de indisponibilidade do GPS, ou com reinícios periódicos. Quando esta técnica é utilizada por longos períodos de tempo, os erros podem ser acumulados. Erros na faixa de 10m a 20m podem ser obtidos em apenas 30 seg quando o veículo está a uma velocidade 100 km/h [34][8].

2.3.7 Sensores

Nas duas abordagens *Dead Reckoning* apresentadas nas seções 5.1, 5.2 o ângulo e o deslocamento do veículo são fornecidos por sensores. O deslocamento é fornecido por um odômetro. A variação angular é fornecida por um giroscópio. Além disso o veículo possui um compasso digital para fornecer a direção norte do sistema de coordenadas. Fica a cargo da aplicação utilizar um sistema de coordenadas geográficas ou locais. Sensores são desenvolvidos de diversos tipos de materiais, que devido ao tempo de uso e efeitos externos tendem a apresentar desvios nas estimativas fornecidas.

2.3.8 Giroscópio

Um giroscópio é um dispositivo que mensura a taxa de rotação sobre seu eixo sensitivo. Portanto, um giroscópio fornece uma variação angular em ($^{\circ}/seg$).

Nos dias atuais, existem três principais tipos de giroscópios: giroscópios ópticos de fibra, giroscópios de anel a laser e giroscópios microeletromecânicos (do inglês, Micro Electro Mechanical Systems - MEMS *gyroscopes*). Os dois primeiros possuem alta performance, porém são de alto custo de fabricação e são utilizados principalmente nas indústrias de aviões, barcos e robôs. Já os giroscópios microeletromecânicos são amplamente utilizados em dispositivos do dia-a-dia como *smart phones*, câmeras digitais e sistemas de navegação de veículos.

Para um dado sensor, seu desvio é calculado como a variação de curto prazo apresentada por suas estimativas quando o sensor está em repouso. As taxas de variação angular apresentadas pelo giroscópio são integradas ao tempo com o objetivo de obter a variação angular em função do tempo.

Giroscópios MEMS apresentam níveis de ruído proporcionais à frequência de rotação utilizada. Todo giroscópio em seu processo de produção é submetido a uma avaliação, que consiste em observar os valores fornecidos quando o mesmo não está realizando nenhuma rotação. Os valores mensurados são avaliados em um processo denominado *Allan*

Variance. Basicamente, as saídas do giroscópio são coletadas em diferentes frequências e com isso as fontes de erro são definidas. As principais fontes de erro de um giroscópio são apresentadas a seguir.

Um desvio constante ϵ_c . Este desvio é calculado em um processo de observação das médias dos valores fornecidos pelo giroscópio quando este não está sofrendo nenhum tipo de rotação. Esse desvio constante acrescenta um erro a estimativa final do giroscópio, e acumula-se com o tempo de uso. Considerando intervalos de tempo t , o ângulo θ é acrescido em erro pela Equação 2.1.

$$\theta(t) = \epsilon_c \cdot t \quad (2.1)$$

Um *angle random walk* (ARW) que é uma heurística para especificação do ruído inerente ao sensor, causado por variações de temperatura e variações nos componentes físicos do sensor. Este ruído flutua a uma taxa muito maior que a frequência utilizada pelo sensor e acumula-se com o tempo uso. Como resultado, as estimativas obtidas do sensor são perturbadas. Em outras palavras, considera-se que as saídas do sensor são afetadas por uma sequência de variáveis não correlatas com média (μ) zero, variância σ^2 e desvio padrão σ .

Como o objetivo é mensurar o impacto do erro na variação angular em função do tempo, segue que:

$$\sigma_\theta(t) = \sigma \cdot \sqrt{\delta t \cdot t} \quad (2.2)$$

$$ARW = \sigma_\theta(1) \quad (2.3)$$

O tempo é medido em segundos e o ruído é uma variável aleatória com média zero cujo o desvio padrão σ_θ cresce proporcionalmente à raiz do tempo. Portanto, o *ARW* é dado em unidade de $(\text{°}/\sqrt{\text{seg}})^2/\text{Hz}$. Além disso, é comum utilizar outras unidades para descrever um *ARW* como *power spectral density* (PSD) medido em $(\text{°}/\text{seg}^2)$ e *FFT noise density* de unidade $\text{°}/\text{h}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Uma última medida importante é a sensibilidade do sensor. Essa medida fornece o quão estável o giroscópio é em determinados intervalos de tempo, em relação a temperatura, tempo de uso e variações em seu eixo sensitivo. Nos *datasheets* dos fabricantes de giroscópios geralmente este valor é fornecido em $\pm\%$ proporcional a estimativa realizada pelo giroscópio.

2.3.9 Odômetro

O odômetro é um dispositivo que coleta informação sobre a distância percorrida pelo veículo. O odômetro mensura a distância a partir do número de rotações realizadas pela roda do veículo. As informações são coletadas por um *encoder* responsável por converter o total de pulsos realizados durante a revolução da roda do veículo. O total de pulsos durante um determinado intervalo de tempo é mapeado para uma estimativa da distância percorrida[34]. A distância é obtida multiplicando os pulsos por um escalar, que neste caso nada mais é do que um número que indica o raio da roda do veículo. Nos dias atuais

as informações de um odômetro podem ser facilmente obtidas a partir da porta *On-Board Diagnostics 2 - OBD2*⁴ de um veículo.

As estimativas obtidas pelo odômetro podem ser contaminadas por diversos fatores externos como temperatura, desgaste dos pneus, material, etc. Portanto o odômetro deve ser calibrado de tempos em tempos em ordem a manter determinado nível de acurácia [20]. A estimativa de erro do odômetro pode ser obtida a partir da Equação 2.4.

$$\epsilon_{odometer} = \frac{(|\delta_{actual} - \delta_{indicated}|) * 100}{\delta_{actual}} \quad (2.4)$$

Além do giroscópio e o odômetro, também é necessário um compasso digital. Um dispositivo construído de magnetômetros, responsável por prover medidas relativas ao norte magnético terrestre. Portanto, a partir de uma determinada posição do veículo e com a ajuda de um mapa em um sistema de coordenadas geográficas ou locais é possível identificar a posição do veículo em situações de indisponibilidade do GPS.

2.3.10 Modelo de Erros

A partir da especificação dos sensores e suas respectivas fontes de erro foi definido o modelo de erros a ser utilizado no simulador. O modelo de erros considera apenas os efeitos de erro do giroscópio. Estamos desconsiderando os erros do odômetro e do compasso digital. Em uma aplicação do mundo real, correções podem ser realizadas utilizando um mapa digital e pontos de referência no entorno do veículo, além de filtros avançados [34]. No entanto, diversos trabalhos apontam o drástico efeito da variação angular como principal responsável pelo aumento do erro na posição final estimada do veículo quando a técnica *Dead Reckoning* é utilizada [8] [34].

2.3.11 Filtro Passa Baixa

O filtro passa baixa é um filtro recursivo que permite a passagem de sinais de baixa frequência, porém bloqueia a passagem de sinais de alta frequência. Este filtro é utilizado para filtrar ruídos em sensores, principalmente porque na maioria dos casos o sinal a ser mensurado está em baixa frequência enquanto o ruído está em alta frequência[19]. A Equação 2.5 apresenta a formulação do filtro passa baixa de primeira ordem.

$$\bar{x}_k = \alpha \bar{x}_{k-1} + (1 - \alpha)x_k \quad (2.5)$$

Na Equação 2.5 é possível perceber que o filtro passa baixa associa um peso menor para medidas anteriores e associa um maior peso para as medidas mais recentes. Isso é feito através da constante α que deve ser definida ($0 < \alpha < 1$). Graças a esta simples formulação do filtro passa baixa, é possível realizar a filtragem do ruído, e rastrear a variação das medidas de um dado sensor. Em nossa abordagem *Dead Reckoning* implementamos o filtro passa baixa para filtrar o ruído proveniente do giroscópio e estimar a variação angular em cada instante t . A Figura 2.5 apresenta o desempenho do filtro passa baixa para diferentes valores de α .

⁴<http://www.obdii.com/>

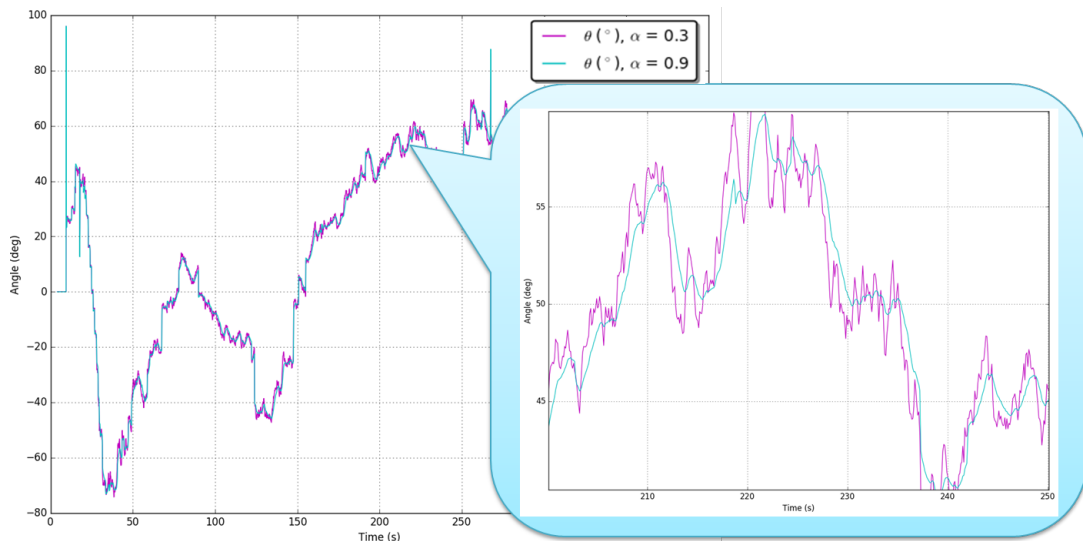


Figura 2.5: Filtro Passa baixa para diferentes valores de α .

Quando α possui um valor baixo há mais ruído na estimativa, porém quando o valor de α é maior há menos ruído, mas o rastreamento da variação angular se torna um pouco mais lento.

2.3.12 Cooperative Positioning

Cooperative Positioning - CP é uma técnica que foi inicialmente proposta para localização em redes ad-hoc e de sensores. Ao contrário das abordagens não cooperativas onde cada nó individualmente calcula/estima sua localização, a abordagem cooperativa tem como objetivo permitir que nós vizinhos trabalhem coletivamente para aumentar a acurácia de suas respectivas localizações. Uma revisão detalhada destas técnicas para cálculo de distância em CP foi investigada em [4]. Esta técnica consiste de três fases principais e essenciais para seu pleno funcionamento:

- **Fase de Mensuração:** o veículo coleta duas informações principais: dados cinemáticos, e as medidas de distância em relação a seus vizinhos em *1-hop*. Para obter as informações de velocidade, orientação e posição, são utilizados sensores e um GPS. Para as medidas de distância, técnicas de *radio-ranging* e *range-rating* e.g., *Time of Arrival* - TOA, *Time Difference of Arrival* - TDOA, *Received Signal Strength Indicator* - RSSI ou *Round Trip Time* - RTT, podem ser exploradas. O resultado desta fase é um *Range Vector (RV)* que é uma coleção de distâncias de um dado veículo em relação aos seus vizinhos.
- **Fase de Troca de Informações:** os veículos trocam os RV's obtidos na fase de mensuração via *beacons* por meio da tecnologia de comunicação IEEE WAVE 802.11p. Os veículos constantemente disseminam essa informação a seus vizinhos via broadcast.
- **Fase de Localização:** um algoritmo distribuído é empregado com base nas informações da fase de mensuração. Com estas informações, os veículos criam um

cluster. Um cluster neste contexto é um conjunto de veículos vizinhos no qual todas as distâncias entre eles são conhecidas. Cada veículo no cluster emprega princípios de multilateração e trilateração. Como resultado, uma matriz preenchida com as distâncias entre os veículos no cluster é obtida.

A idéia do uso de CP para localização é bastante promissora em VANETs devido ao seu potencial de aumento de acurácia de localização em cenários onde há uma alta densidade de veículos. Ainda assim, a alta velocidade dos veículos, a topologia de rede altamente dinâmica, a fragmentação da rede, e o curto tempo de vida dos links criam desafios para o emprego do CP.

2.3.13 RSSI

A técnica de *radio ranging* Received Signal Strength Indicator (RSSI) utiliza a potência de sinal recebida para mensurar a distância entre um emissor e receptor. Esta técnica é amplamente utilizada em redes com nós estáticos. Porém a dinamicidade das redes veiculares não garantem o mesmo desempenho observado em redes estáticas como as redes de sensores por exemplo. Principalmente porque os veículos podem percorrer regiões diferentes (com diferentes aspectos físicos que afetam a propagação do sinal) em um curto espaço de tempo o que acarreta em uma mudança no comportamento do sinal a depender do ambiente.

A vantagem no uso de RSSI é que esta técnica não precisa de nenhum hardware especializado, por outro lado, a depender do modelo utilizado a acurácia de localização pode não ser tão precisa [25]. Dados uma potência de transmissão (P_{TX}) é possível prever a potência de recepção (P_{RX}) em função da distância entre nó emissor e receptor. A atenuação do sinal entre emissor e receptor é conhecida na literatura como *path loss* (PL). Independente do modelo de propagação do sinal o *path loss* (dB) é definido a partir da Equação 2.6.

$$PL(\delta) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{TX}}{P_{RX}} \right) \quad (2.6)$$

O *modelo de propagação de Friss* [16] também conhecido como *free space propagation model* [30] [35], considera uma situação em que há uma linha de visada (*line of sight*) sem oclusões entre o nó transmissor e receptor. Considerando antenas isotrópicas e que os nós estão localizados em um plano de coordenadas (x, y) , este modelo representa o *raio de comunicação como um círculo cujo centro é o nó que transmite o sinal*. A Equação 2.7 define o modelo de Friss:

$$P_{RX} = \left(\frac{P_{TX} * G_{TX} * G_{RX} * \lambda^2}{(4\pi)^2 * \delta^2 * L} \right) \quad (2.7)$$

Aqui $\lambda = \frac{c}{f}$, onde $c = 299792458.0$ (m/s) é a constante da velocidade da luz no vácuo e f é a frequência (Hz) do canal utilizado para transmissão do sinal. G_{RX} e G_{TX} são os ganhos das antenas do receptor e transmissor. $L \geq 1$ é a perda do sistema a nível de circuito eletrônico. P_{RX} e P_{TX} são medidos em W ou mW . A partir desta formulação fica claro que o *path loss* aumenta de acordo com o quadrado da distância.

De modo geral, este modelo não é capaz de capturar as diferentes características condicionadas pelos diferentes ambientes no qual o RSSI é medido. O que acontece na prática é que adaptações empíricas são realizadas de modo a obter uma melhor aproximação. Considerando condições não ideais uma constante α é definida a partir de um processo de calibração[30]. Denominada expoente *path-loss*, esta constante é dependente do ambiente no qual o sinal é propagado. O valor de α pode variar entre 2 (para espaços abertos com poucas obstruções) e 4 (locais com maiores obstruções e atenuações entre emissor e receptor)[5]. Assim o *path loss* assume a forma da Equação 2.8. A Figura 2.6 apresenta o path loss para diferentes valores de α .

$$PL = PL_1 + 10\log_{10}(\delta)^\alpha \quad (2.8)$$

$$PL_1 = 10\log_{10}\left(\frac{16\pi^2}{\lambda^2}\right) \quad (2.9)$$

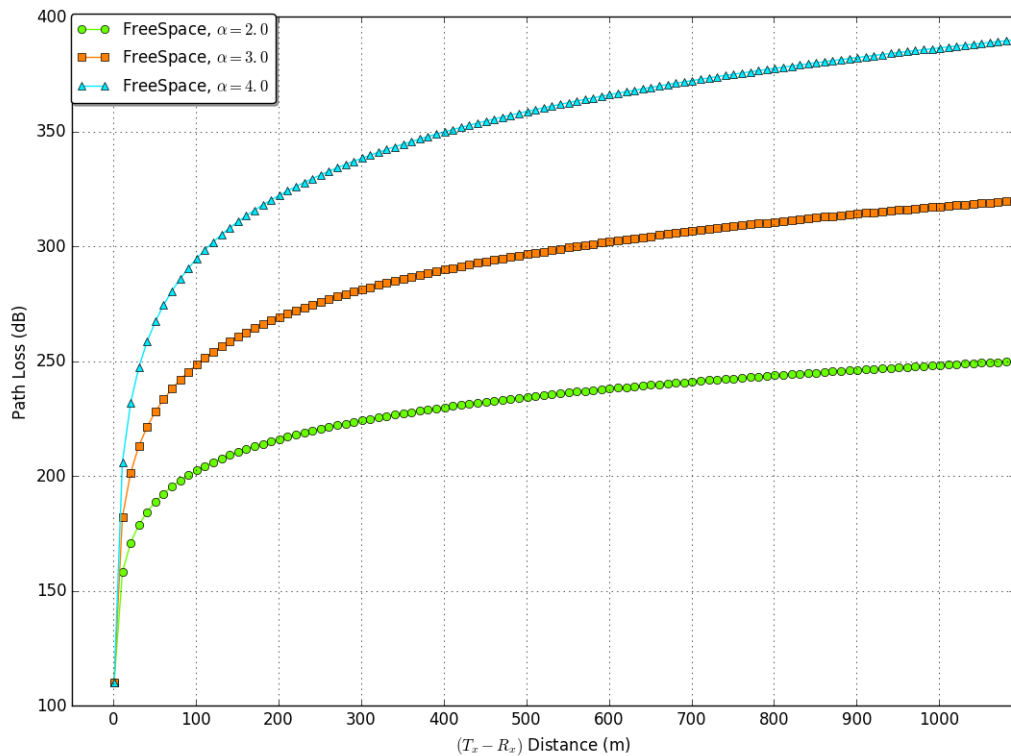


Figura 2.6: Path Loss

E portanto, o RSSI pode ser definido a partir da Equação 2.10:

$$RSSI = P_{TX} - PL \quad (2.10)$$

Onde, P_{TX} é a potência de transmissão em dBm e PL é o modelo de perda de potência do sinal definido anteriormente também em dBm. A Figura 2.7 apresenta a relação entre

RSSI e distância.

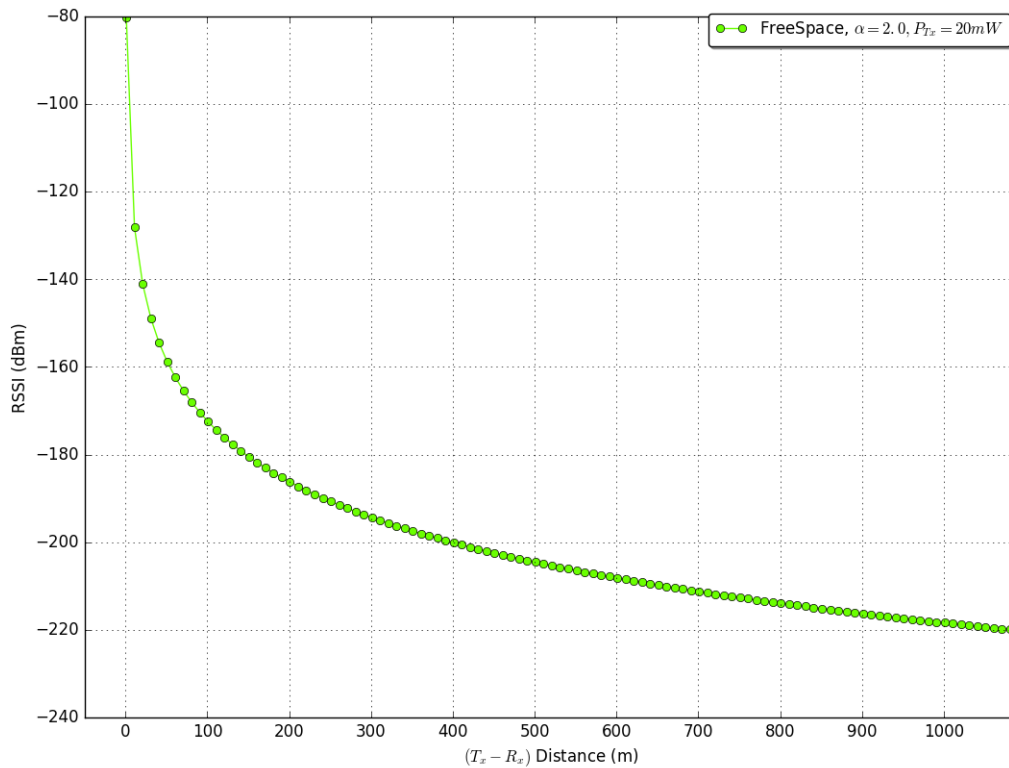


Figura 2.7: RSSI

Após um processo de *fitting* de diversas medidas RSSI com a curva da Equação 2.10 e as respectivas diferentes distâncias obtidas o valor de α é fixado. Portanto o RSSI pode ser medido a um distância arbitrária δ utilizando o RSSI a uma distância de referência δ_0 , quando emissor e receptor estão próximos. Para redes veiculares geralmente os valores δ_0 são $1m$ ou $10m$ [30]. Deste modo é possível mensurar o RSSI a partir da Equação 2.11 (este modelo é conhecido como *log-distance*).

$$RSSI = P_{RX}(\delta_0) - 10\alpha \log_{10} \left(\frac{\delta}{\delta_0} \right) \quad (2.11)$$

2.3.14 Multilateração

A técnica de radio multilateração utiliza conceitos geométricos e as informações sobre o modelo de propagação do sinal para obter uma estimativa de localização. O nó que deseja descobrir sua localização utiliza as posições fornecidas pelos nós vizinhos e a informação da estimativa de distância, obtida via RSSI ou outras técnicas como TOA, TDOA ou AOA.

Suponha um círculo com raio r , e centro de coordenadas (x_c, y_c) . A equação genérica do círculo permite recuperar qualquer coordenada (x_i, y_i) na circunferência a partir da Equação 2.12:

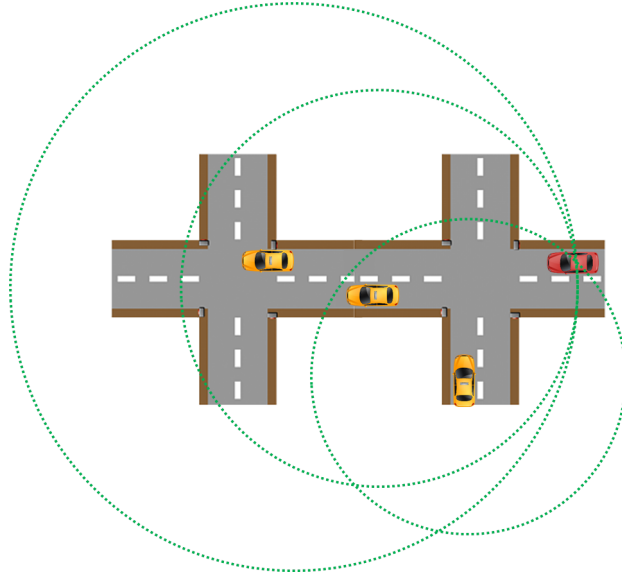


Figura 2.8: Multilateração (Caso Ideal).

2.3.15 Problemas da Geometria de Posicionamento e erros RSSI

Devido a erros inerentes na estimativa de distância via RSSI, e erros nas posições dos nós âncoras, um erro ϵ é acrescido a estimativa. Portanto a Equação 2.13 assume a forma da Equação 2.18.

$$(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 = r_i^2 - \epsilon \quad (2.18)$$

De modo geral, qualquer solução que utiliza sistemas lineares deve ser considerada uma solução aproximada, principalmente devido a erros de arredondamento. No contexto das redes veiculares, devido a geometria dos veículos e acúmulo de erros no processo de multilateração situações como as das Figuras 2.9 e 2.10 ocorrem. O que muitas vezes resultam em um *mau condicionamento* da matriz A (Equação 2.17), e casos em que pequenas alterações nos valores de entrada resultam em uma estimativa de localização com erros muito altos[31].

2.4 Conclusões

O estudo das técnicas de localização aponta quais técnicas podem prover melhor robustez e acurácia em um sistema de localização para VANETs e ITS. Em [8] os autores realizaram uma caracterização das técnicas de localização em termos de sincronização, infraestrutura, disponibilidade e acurácia. Nos dias atuais, o sistema GPS é uma solução básica que já vem embarcada na maioria dos veículos. Ainda assim, veículos mais antigos frequentemente utilizam um sistema GPS a partir de um celular do usuário ou um receptor GPS de baixo custo. Por essa razão, é viável considerar um sistema GPS como aliado no processo de localização de um veículo, ainda que o sistema utilize de outras técnicas de localização.

A técnica de localização *Dead Reckoning* possui uma vantagem principalmente nas situações de indisponibilidade do GPS. Esta é uma técnica independente que não necessita

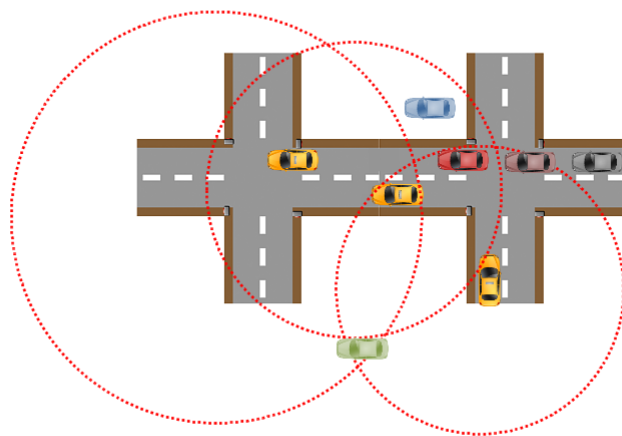


Figura 2.9: Multilateração (Múltiplas Soluções).

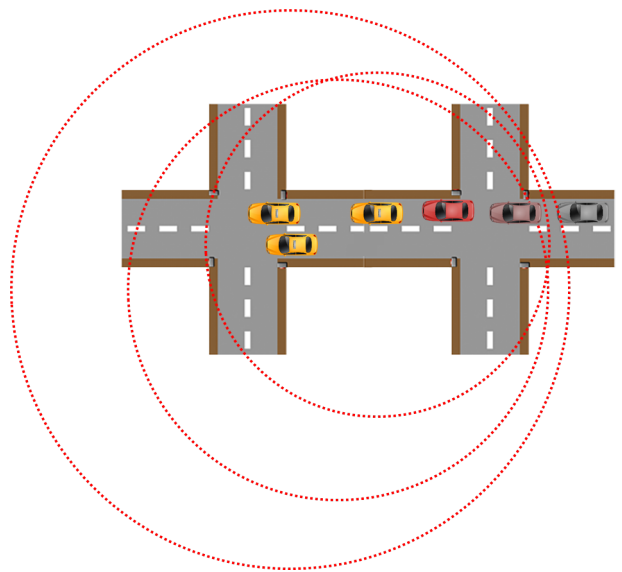


Figura 2.10: Multilateração (Erro na Entrada).

de nenhum tipo de sincronização e infraestrutura. Enquanto a técnica *map matching* com o uso de mapas digitais pode ser utilizada para restringir o erro das soluções GPS e *Dead Reckoning* às vias de tráfego do veículo. Por fim, a técnica *cooperative positioning* apresenta potencial para reduzir o erro de posicionamento em uma determinada região através da colaboração entre os veículos.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

As soluções de localização propostas na literatura para VANETs e ITS podem ser divididas em duas categorias: soluções que utilizam a rede veicular para assistir os sistemas GNSS e soluções que não utilizam sistemas GNSS.

Na primeira categoria, as soluções propostas [5][13] [25] [29] combinam as informações fornecidas por receptores GNSS com as informações cinemáticas dos veículos. Além disso, são utilizadas técnicas de *radio ranging* como TOA, RSSI ou RTT. Estes trabalhos tem reportado acurácia na faixa de (3-5) metros.

Na segunda categoria, as soluções são propostas sem o uso de um sistema GNSS. Estas soluções confiam no uso da tecnologia de radio e/ou RSUs [39] [37] [7] para substituir o GNSS. No entanto, como reportado por [4], as características inerentes das redes veiculares impõem diversos desafios para abordagens não assistidas por GNSS. Além disso, as soluções possuem alguns pontos negativos, como por exemplo, o uso de cenários de avaliação onde a topologia das ruas/rodovias são retilíneas o que facilita o rastreamento do veículo na situação de indisponibilidade.

Nos dias atuais, os receptores GNSS podem ser facilmente encontrados, seja em micro chips ou como solução embarcada em micro dispositivos. No entanto, localização em VANETs e ITS ainda é um desafio em aberto. Principalmente quando soluções que necessitam de maior acurácia de localização são consideradas. Erros de posicionamento na faixa de 3 a 5 metros causam um impacto negativo em aplicações de segurança e assistência ao motorista por exemplo. Mais ainda, diversas soluções tem sido propostas nos últimos anos porém muitas destas soluções não levam em conta a indisponibilidade dos sistemas GNSS.

Em [25], os autores introduziram um algoritmo baseado no *Root Mean Square Error - RMSE*. O algoritmo possui duas etapas, incluindo uma inicialização e um refinamento. Na inicialização, uma estimativa da posição de todos veículos é realizada através da troca de informações de GPS e uma trilateração usando três veículos que são equipados com GPS (trilateração AdHoc). Na fase de refinamento, cada veículo usa a informação dos demais veículos para corrigir sua estimativa de localização via RSSI. Além disso, é utilizado uma versão estendida do *Kalman-Filter*. O processo de fusão de dados é aplicado com o intuito de associar as informações de velocidade e direção com as informações obtidas por GPS. Consequentemente, uma melhor estimativa de localização é obtida.

Uma desvantagem da abordagem apresentada por [25] é o fato dos autores conside-

rarem que as informações de posição das laterais das vias podem ser disseminadas por RSUs, e no cenário de simulação apenas acrescentam as restrições sem simular o processo de troca de informações entre as RSUs e os veículos. Além disso, os dados de GPS são gerados sinteticamente através de um ruído baseado em uma distribuição Gaussiana randômica.

Em [7], os autores desenvolveram um algoritmo utilizando a técnica *Relative Distributed Ad-Hoc Localization* denominado *RECOP*. Em suma, a abordagem apresentada não faz uso de uma infraestrutura fixa, ou nós fixos no processo de estimativa de posição dos veículos, tão pouco faz uso do GPS. *RECOP* utiliza as informações de medidas de distância, *Angle of Arrival* - *AOA* e informações cinemáticas do veículo, como direção e velocidade (obtidas por sensores onboard), para criar um mapa de posicionamento relativo. Este mapa é então trocado entre os veículos através de um processo de clusterização. Deste modo, cada veículo consegue estimar sua posição e saber a posição dos veículos vizinhos. A avaliação do algoritmo foi realizada em termos de escalabilidade, densidade dos nós e capacidade de transmissão da rede.

A abordagem utilizada por [7] apresenta algumas desvantagens. Quando a quantidade de veículos cresce, a quantidade de mapas relativos cresce drasticamente. Como a topologia da rede varia rapidamente, diversas trocas de mapas são necessárias. Se os veículos trafegam a velocidades mais altas, o erro de localização cresce proporcionalmente. Se a taxa de transmissão aumenta, *RECOP* diminui a quantidade de mapas relativos. Por outro lado, é pouco provável que em um cenário com vários veículos a taxa de transmissão aumente. O uso de RSUs poderia minimizar este problema, uma vez que as RSUs possuem maior taxa de transmissão.

Em [5] foi proposto uma abordagem CP que considera o uso constante de DGPS e um processo de *Data Fusion* para aumentar a acurácia da localização. Os autores consideram o uso de DGPS e retiram a responsabilidade de correção das informações de posicionamentos das estações base DGPS. A responsabilidade de correção fica a cargo dos veículos que trocam as informações de posicionamento via tecnologia IEEE WAVE 802.11p. Os autores conseguiram um RMSE na faixa de 5 metros na estimativa de posicionamento dos veículos, contra 10 metros via DGPS. No entanto, a abordagem possui a desvantagem de necessitar de mais banda de comunicação do que a provida pela tecnologia DSRC. Em cenários com alta densidade de nós (muitos veículos), a qualidade de serviço (*Quality of Service* - *QoS*) do sistema cai drasticamente.

O trabalho mais recente foi desenvolvido por [29], onde os autores propõem uma abordagem CP distribuída que permite a um dado veículo incorporar sua estimativa de posição obtida por GPS com as estimativas de posicionamento dos veículos vizinhos (estimativa de GPS e vetor de distâncias entre os veículos). Basicamente, o método proposto funciona como um pré filtro para as estimativas de GPS. Para realizar a fusão entre as estimativas foi utilizado uma versão estendida do *Kalman Filter*. Por fim, os autores comparam a abordagem proposta com o uso do GPS *stand-alone*, a abordagem proposta sem o *Kalman Filter*, e a abordagem proposta com o *Kalman Filter*. Em resultados de simulações os autores conseguiram diminuir o erro na estimativa de posicionamento em 3.3 metros contra 6 metros quando somente o GPS é utilizado. Os autores apontam como trabalhos futuros o uso de *Map Matching* para reduzir a estimativa de localização às vias de tráfego

dos veículos.

Dada as considerações realizadas até aqui, a Tabela 3.1 apresenta as principais características dos trabalhos relacionados, e as características da solução desenvolvida.

Tabela 3.1: Comparação dos Trabalhos Relacionados

Trabalho	Infraestrutura	Técnicas de Localização	Fusão de Dados	Ferramentas de Simulação	Acurácia	Disponibilidade
Parker e Valee [25]	Sim	GPS e CP via RSSI	Extended Kalman Filter	Corridor Simulator e MATLAB	$\pm 3m$	Considera situações de indisponibilidade de GPS.
Alotaib et al [7]	Não	RDAL, Informações Cinemáticas e AOA	Não utiliza.	Sumo e NS2	$\pm 3m$	Não faz uso de GPS.
Alam et al [5]	Sim	DGPS e CP	Extended Kalman Filter	Teste Real	$\pm 5m$	Necessita de uso constante de GPS.
Rohani et al [29]	Sim	CP, GPS, e TOA.	Extended Kalman Filter	Pro Sivic, GPSSoft e MATLAB	$\pm 3.3m$	Necessita de uso constante de GPS.
Solução Desenvolvida	Sim	GPS/DGPS, Dead Reckoning e CP	–	SUMO, OMNET++, Veins, OpenStreetMaps, Data Sets reais de GPS.	–	Considera situações de indisponibilidade de GPS.

Capítulo 4

Caracterização dos Problemas de Indisponibilidade e Erros do GPS

Neste trabalho, foram utilizados *datasets* de dispositivos GPS reais. As informações contidas nos *datasets* representam rotas de mobilidade reais de táxis e ônibus.

Os veículos foram equipados com receptores GPS que enviam as informações de posicionamento para uma estação de coleta e armazenamento de dados. Uma vez que táxis e ônibus são veículos de uso público, é mais fácil superar a questão da privacidade de localização encontrada em veículos privados. Dentre os diversos *data sets* GPS disponíveis, nós selecionamos os de Dublin - Irlanda, São Francisco - EUA e Rio de Janeiro - Brasil.

4.1 Data Sets

O *data set* de Dublin [9] contém dados GPS de 978 ônibus durante um período de 55 dias entre os dias 6 e 30 de Novembro de 2012 e 1 de Janeiro a 31 de Janeiro de 2013. Cada ônibus contribui com uma média de 75.000 posições.

O *data set* de São Francisco [26] contém coordenadas GPS de aproximadamente 500 táxis coletadas durante 30 dias na região da Baía de São Francisco. Cada táxi foi equipado com um receptor GPS que envia atualizações de suas informações de posicionamento para um servidor central. Cada táxi contribui com uma média de aproximadamente 20.930 posições.

O *data set* do Rio de Janeiro [10], contém dados GPS de cerca de 705 ônibus. Os dados foram coletados durante 47 dias na cidade do Rio de Janeiro. Cada ônibus foi equipado com um receptor GPS que envia periodicamente suas informações para um servidor central. O servidor disponibiliza os dados dos ônibus em tempo real por meio de um arquivo *json*. Diferente dos *data sets* anteriores, foi necessário desenvolver um *script* para coleta dos dados em tempo real. Cada ônibus contribui com aproximadamente 35.000 posições.

4.2 Caracterização da Indisponibilidade do GPS

Os sistemas GPS sofrem de problemas de indisponibilidade em zonas densas urbanas, zonas com vasta vegetação, rodovias multinível e túneis. No cenário dos túneis o sistema GPS apresenta sua pior performance devido à oclusão da linha de visada dos sinais provenientes dos satélites. A Figura 4.1 apresenta este problema que é conhecido na literatura como *multipath effect*.

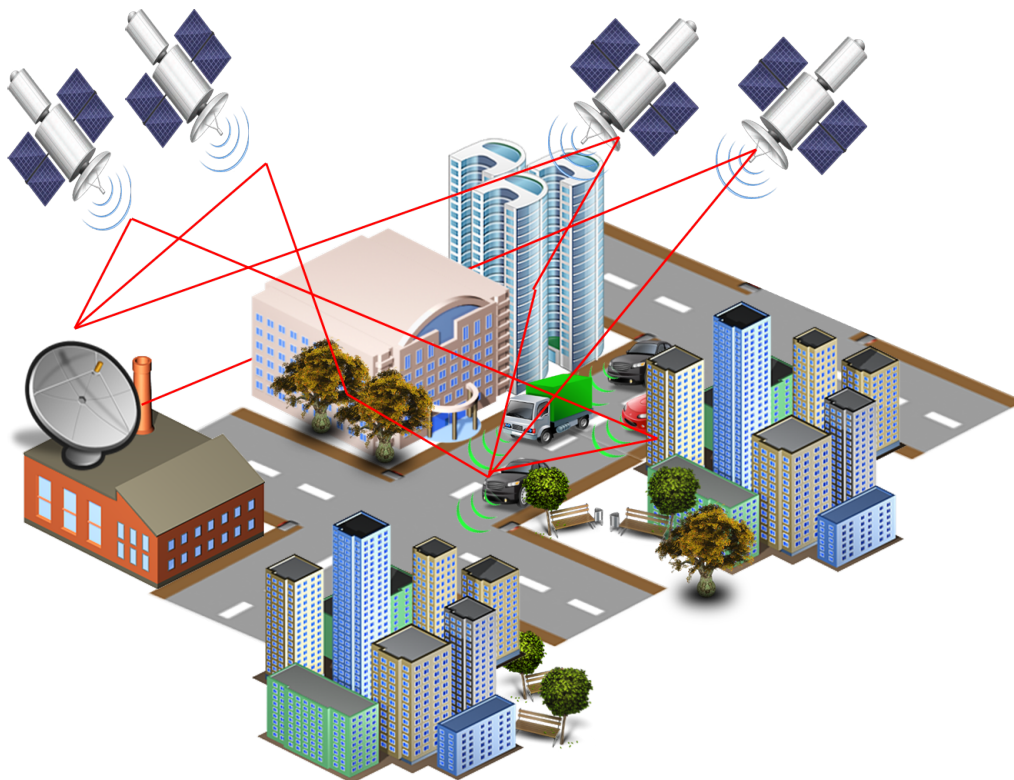


Figura 4.1: *Multipath effect*.

Com o objetivo de caracterizar este problema, nós selecionamos alguns túneis das cidades a partir das quais os *datasets* foram obtidos. A partir das informações de mapas digitais obtidos a partir do Open Street Map [24] foi possível coletar informações da área de interesse (AOI) para a caracterização. É notório que diversas variáveis afetam o tempo que um veículo demanda para atravessar um túnel. Dentre os diversos fatores podemos destacar, congestionamento no tráfego e possíveis semáforos nas regiões de entrada e saída do túnel. A Tabela 4.1 apresenta informações relevantes da região dos túneis utilizados para a caracterização.

Geralmente, os túneis possuem duas pistas de sentidos opostos. Por este motivo, foi necessário desenvolver um mecanismo para diferenciar as quedas de GPS registradas em cada pista. Para este objetivo, utilizamos o conceito de *bounding box*.

Dado um conjunto de coordenadas de latitude ϕ , e longitude λ , um *bounding box* é definido pelo par $[(\phi_{min}, \lambda_{min}), (\phi_{max}, \lambda_{max})]$. Ou seja, um *bounding box* consiste de um conjunto de pontos dentro de uma área de interesse. Em ordem à caracterizar as situações de indisponibilidade GPS, definimos dois *bounding box*, um na área de entrada do túnel e

Tabela 4.1: Características dos Túneis

Nome	Abv.	Tipo	Dist. (m)	Pistas	Vias	Vel. (km/h)	T. Min. (s)	T. Max. (s)
Rio 450	RIO450	Urbano	1,480	1	3	60.00	44.40	888.00
Dublin Port	DPT	Rodoviário	4,600	2	2	80.00	103.50	2070.00
R. C. Levy	RCLT	Urbano	600	2	2	64.00	16.88	337.50
Yerba Buena	YBT	Rodoviário	160	2	5	80.00	3.60	72.00
Mc. Arthur	DMAT	Rodoviário	400	2	2	72.40	9.94	198.90

outro na área de saída do túnel.

Foram utilizados os *timestamps* das leituras GPS. Dado dois *timestamps* consecutivos, é possível definir um vetor que representa o sentido do veículo e, portanto, a pista em que o mesmo estava trafegando no momento da leitura GPS. É importante ressaltar que a direção dos vetores é a mesma para ambas as pistas do túnel, porém o sentido é contrário. Após a extração das coordenadas GPS de ambas as pistas de cada túnel, as rotas dos veículos foram reconstruídas a partir dos pontos de queda e recuperação do GPS. As rotas também foram limitadas a AOI definida no processo de construção dos *bounding boxes*. A Figura 4.2 ilustra esta abordagem. Detalhes da caracterização estão no Algoritmo 1.

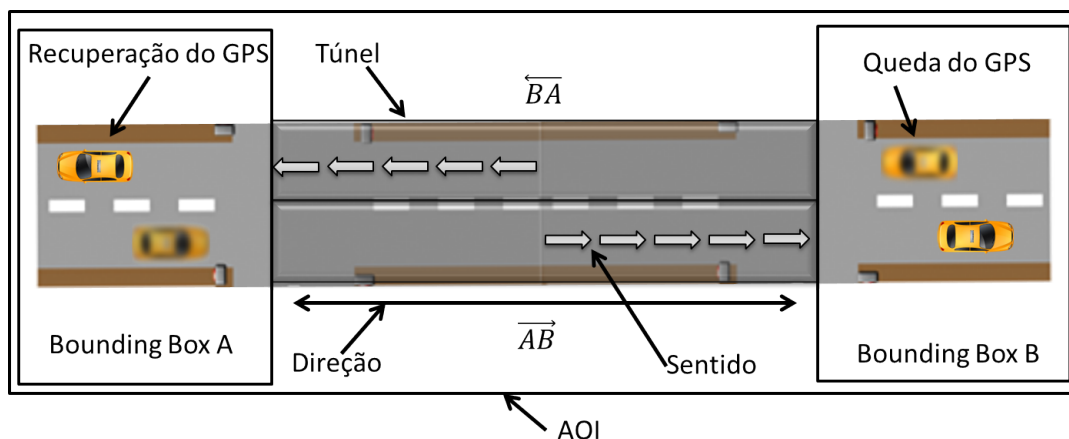


Figura 4.2: Caracterização.

As linhas 1 e 2 inicializam os tempos mínimo e máximo que um veículo atravessa o túnel a partir das informações da Tabela 4.1. A linha 3 define o tamanho do *data set*. As linhas 6-9 inicializam duas coordenadas candidatas a pontos de queda e recuperação do GPS. A linha 10 computa o tempo de queda a partir da diferença entre dois *timestamps* consecutivos. A linha 11 permite inferir, a partir do tempo de queda, se as coordenadas são de fato de queda e recuperação. As linhas 12-19 permitem validar as coordenadas verificando se respeitam os *bounding boxes* e a AOI. Finalmente, a linha 22 retorna dois conjuntos de quedas do GPS, associados a cada pista do túnel. Este algoritmo é aplicado em todos os túneis e seus respectivos *datasets*.

O resultado deste processo nos permitiu associar os pontos GPS a cada pista dos túneis além de definir os tempos e distâncias que os veículos percorreram com indisponibilidade do GPS. No Apêndice A apresentamos todos os pontos de queda e recuperação associados a cada pista dos túneis.

Algorithm 1: Algoritmo de Caracterização da Indisponibilidade do GPS

Input : $boundingBoxA, boundingBoxB, dataSet$

Output: Two sets named $outagesWay1, outagesWay2$ with pairs of λ, ϕ points.

```

1  $minTime = tunnelDistance / (maxVelTunnel * 2);$ 
2  $maxTime = tunnelDistance / (maxVelTunnel * 0.1);$ 
3  $lengthDataSet \leftarrow length(dataSet);$ 
4  $i \leftarrow 0;$ 
5 while ( $i < lengthDataSet$ ) do
6    $\lambda_i \leftarrow dataSet[i].\lambda;$ 
7    $\alpha_i \leftarrow dataSet[i].\phi;$ 
8    $\lambda_j \leftarrow dataSet[i + 1].\lambda;$ 
9    $\alpha_j \leftarrow dataSet[i + 1].\phi;$ 
10   $timeOut = dataSet[i + 1].timestamp - dataSet[i].timestamp;$ 
11  if ( $(minTime < timeOut)$  and ( $timeOut < maxTime$ )) then
12    if ( $ValidateAOI(boundingBoxA, boundingBoxB)$ ) then
13       $outagesWay1 \leftarrow (\lambda_i, \phi_i, \lambda_j, \phi_j);$ 
14    end
15    else
16      if ( $ValidateAOI(boundingBoxB, boundingBoxA)$ ) then
17         $outagesWay2 \leftarrow (\lambda_i, \phi_i, \lambda_j, \phi_j);$ 
18      end
19    end
20  end
21 end
22 return  $outagesWay1, outagesWay2$ 

```

A Figura 4.3 apresenta os resultados da caracterização. Considerando 50% dos dados mais representativos (em torno da média), podemos observar que os tempos de queda resultantes da caracterização para os túneis RIO450, DBPT, RCLT, YBT e DMAT são respectivamente [98, 219], [49, 275], [52, 63], [54, 61] e [48, 72] segundos. A distância total que os veículos percorrem sem GPS é diretamente proporcional ao tempo de queda. O tempo e a distância são proporcionais aos tamanhos dos túneis.

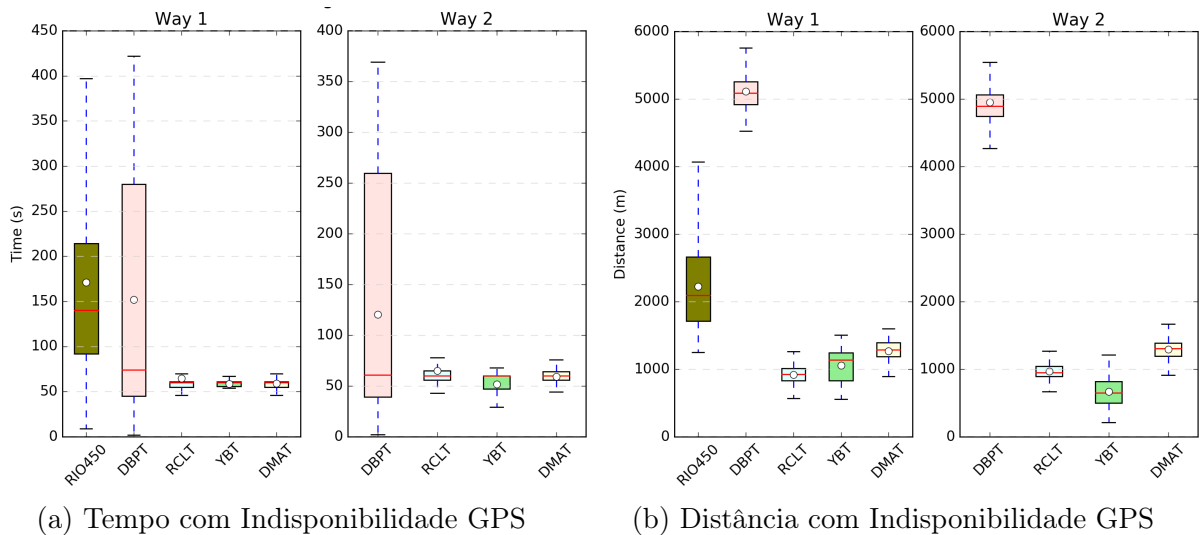


Figura 4.3: Caracterização de tempos e distâncias sem GPS.

Além disso, após este passo é possível obter uma estimativa do erro GPS na AOI de cada túnel. Processo este ilustrado na Seção 4.3.

4.3 Caracterização do Erro GPS

A partir dos *data sets*, não é possível mensurar com precisão exata qual foi o real erro do GPS no momento de registro de uma determinada leitura. Porém, é possível afirmar que os veículos estavam trafegando em uma das vias das pistas (para o caso de pistas com mais de uma via).

Para mensurar o erro GPS foram utilizadas as informações do mapa digital, e foi definido um grafo $G(V, E)$ a partir do conjunto de pontos que formam as pistas dos túneis no mapa digital. As informações do mapa e do GPS são fornecidas em coordenadas geográficas. Portanto, nós realizamos uma conversão para o sistema de coordenadas UTM [41] com o auxílio da biblioteca *proj4* [14] e realizamos os cálculos neste sistema de coordenadas. A conversão para o sistema de coordenadas UTM é necessária porque o simulador de mobilidade e tráfego a ser utilizado na solução *dead reckoning* também utiliza este mesmo sistema de coordenadas.

Em cada vértice do grafo foi armazenada a informação de uma coordenada $(x, y) \leftrightarrow (\lambda, \phi)$ que, no mapa digital, representa as coordenadas da via mais central de uma determinada pista. Dada uma coordenada GPS (x, y) , no sistema de coordenadas UTM, a estimativa de erro do GPS é realizada como descrito a seguir.

Sejam o par de vértices $(P, Q) \in E$ do grafo, com coordenadas $P(x_1, y_1)$, $Q(x_2, y_2)$ e um ponto GPS $P_{GPS}(x_3, y_3)$.

A equação da reta que passa por (P, Q) é definida por:

$$R = P + u(Q - P) \tag{4.1}$$

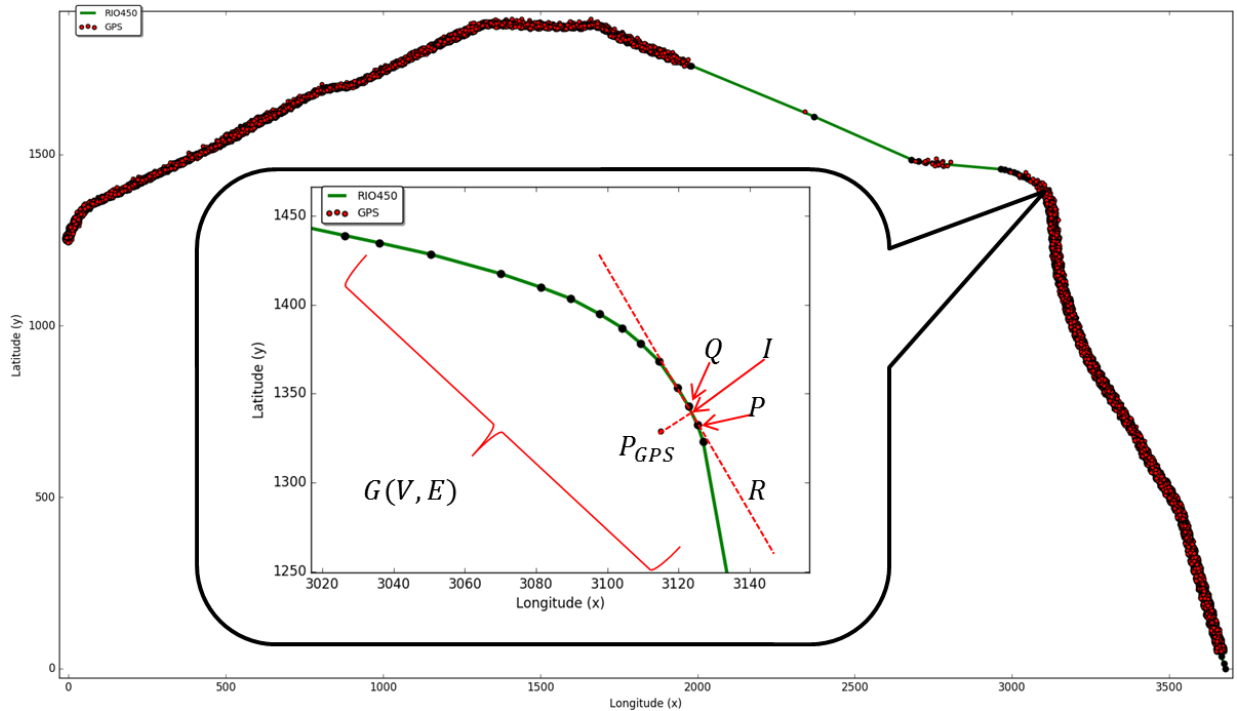


Figura 4.4: Estimativa de Erro GPS.

Na Figura 4.4 o ponto P_{GPS} é mais próximo à reta R exatamente em sua tangente. Ou seja, o produto interno da tangente e a reta é 0, e portanto:

$$(P_{GPS} - R) \cdot (Q - P) = 0 \quad (4.2)$$

Substituindo a Equação 4.2 temos:

$$[P_{GPS} - P - u(Q - P)] \cdot (Q - P) = 0 \quad (4.3)$$

Resolvendo a Equação 4.3, obtemos o valor de u :

$$u = \frac{(x_3 - x_1)(x_2 - x_1) + (y_3 - y_1)(y_2 - y_1)}{\|Q - P\|^2} \quad (4.4)$$

Substituindo u na equação da reta obtemos o ponto de intersecção de coordenadas no ponto $I(x, y)$ da tangente:

$$x = x_1 + u(x_2 - x_1) \quad (4.5)$$

$$y = y_1 + u(y_2 - y_1) \quad (4.6)$$

A distância entre P_{GPS} e a reta R é portanto a distância entre $P_{GPS}(x_3, y_3)$ e $I(x, y)$. Para o caso em que o denominador da Equação 4.4 é igual a zero, P e Q são o mesmo ponto e portanto não existe solução. Se u possui valor no intervalo $(0, 1]$ então existe solução. Caso contrário, não existe um ponto tangente ao ponto P_{GPS} entre os pontos P, Q .

Com o objetivo de encontrar uma estimativa GPS, esse processo é aplicado em todos os pares consecutivos (P, Q) do grafo até encontrar uma solução que satisfaça as condições mencionadas anteriormente. O resultado deste processo é apresentado na Figura 4.5.

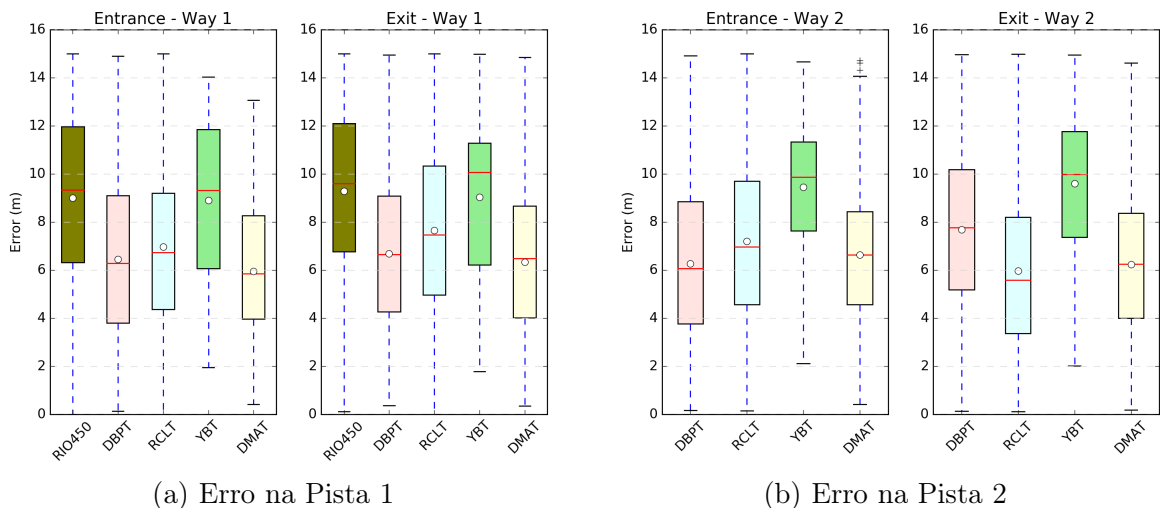


Figura 4.5: Caracterização de Erros GPS.

Como mostrado na Figura 4.5, os erros na faixa de 10 a 30 metros reportados em [34] [8] foram minimizados à faixa de 5 a 15 metros. Recentes avanços nos sistemas GNSS, tem permitido melhorias consideráveis, principalmente graças à implementação

de diversos sistemas de aumento (Satellite Based Augmentation Systems - SBAS) [33] [32] [41]. Ainda assim, para determinadas classes de aplicações, esta faixa de erro é inaceitável para um pleno funcionamento. Para superar estes problemas é possível utilizar a informação contextual do veículo como deslocamento, direção e informações da pista onde o veículo trafega para melhorar a acurácia de localização.

4.4 Conclusão

Neste Capítulo realizamos a caracterização dos problemas de indisponibilidade e inacurácia apresentados pelos sistemas GNSS. Por meio de *datasets* reais obtidos a partir de dispositivos GPS acoplados em veículos de diferentes regiões do mundo, apresentamos tempos de indisponibilidade e faixas de erro dos sistemas GPS. Seleccionamos áreas no entorno de túneis onde os problemas de indisponibilidade frequentemente ocorrem. Os resultados deste Capítulo serão utilizados para avaliação da solução *dead reckoning* detalhada no Capítulo 5 a seguir.

Capítulo 5

Solução Dead Reckoning

Neste trabalho desenvolvemos uma solução *Dead Reckoning* híbrida que utiliza cálculos de geodésia no sistemas de coordenadas geográficas, e cálculos trigonométricos no sistema de coordenadas UTM para superar os problemas de indisponibilidade do GPS.

5.1 Geodesic Dead Reckoning

Geodésia é a ciência que estuda a forma da terra e suas representações. Um dos principais problemas da geodésia está em calcular uma *geodésica* definida como o menor arco entre duas coordenadas de latitude e longitude (ϕ, λ) . Resolver uma geodésica implica necessariamente em resolver o triângulo elipsoidal NAB . Onde, N é o norte. NAF e NBH são os meridianos, e AB é a geodésica de comprimento s_{12} . As latitudes e longitudes de A e B são, respectivamente, (ϕ_1, λ_1) e (ϕ_2, λ_2) . A longitude de B relativa a A é $\lambda_{12} = \lambda_2 - \lambda_1$. EFH é a linha do equador com E intersectando a extensão da geodésica AB . α_0, α_1 e α_2 são os ângulos da geodésica em E, A e B [18]. A ilustração do problema da geodésica e seus parâmetros são apresentados na Figura 5.1.

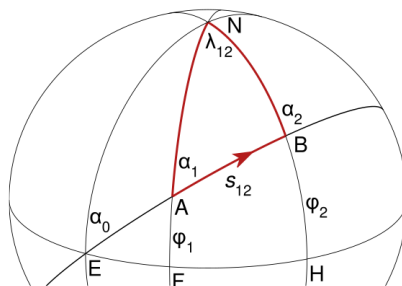


Figura 5.1: Triângulo Elipsoidal[18].

Existem dois métodos para obter uma geodésica: *geodésica direta* e *geodésica inversa*. O método da geodésica direta recebe três parâmetros $\phi_1, \lambda_1, \alpha_1$ e s_{12} para computar os parâmetros ϕ_2, λ_2 e α_2 . O método da geodésica inversa recebe $\phi_1, \lambda_1, \phi_2, \lambda_2$ para determinar os parâmetros $s_{12}, \alpha_1, \alpha_2$. Neste caso $\lambda_{12} = \lambda_2 - \lambda_1$.

Recentes avanços no campo da geodésia tem permitido o cálculo de uma geodésica em qualquer ponto do elipsóide de referência. Antes das contribuições de [18], o método

mais eficiente foi o de *Vincenty*. No entanto, este último falha para casos específicos de geodésica, por exemplo, quando a geodésica está localizada nos pólos do elipsoide [18] [41].

Com base nos métodos de geodésia propomos uma abordagem *Dead Reckoning* nomeada *Geodesic Dead Reckoning* para computar a posição do veículo nos momentos de falha do GPS. Dada uma coordenada geográfica fornecida via GPS de latitude e longitude (ϕ_0, λ_0) , onde ϕ_0 e λ_0 representam a posição inicial do veículo no tempo t_0 . E sejam s_i , α_i , respectivamente, a geodésica e o ângulo relativo no tempo t_i . A coordenada (ϕ_i, λ_i) é fornecida pela Equação 5.1. O Algoritmo 2 sumariza a solução Geodesic Dead Reckoning.

$$\phi_i, \lambda_i = \text{GeodesicDirect}(\phi_{i-1}, \lambda_{i-1}, \alpha_i, s_i) \quad (5.1)$$

Algorithm 2: Geodesic Dead Reckoning Algorithm

Input : Estimated GPS position ϕ_i, λ_i , the true north azimuth α_i and the traveled distance s_{ij} .
Output: Estimated GPS + GDR position: ϕ_j, λ_j

```

1 gpsOutage ← GPSIsUnavailabe();
2 while gpsOutage do
3   |  $\alpha_i, s_{ij}$  ← VehicleKinematics();
4   |  $\phi_j, \lambda_j$  ← GeodesicDirect( $\phi_i, \lambda_i, \alpha_i, s_{ij}$ );
5 end
```

A linha 1 determina quando o GPS está indisponível. O *loop* das linhas 2 a 4 mantém a solução GDR enquanto o GPS está indisponível. α é o ângulo (azimuth) em relação a última posição conhecida e o norte verdadeiro, s_{ij} é a distância percorrida pelo veículo entre duas leituras consecutivas. Na linha 4 a última posição conhecida (ϕ_i, λ_i) , o ângulo α_i e s_{ij} são fornecidos como parâmetros para o método *Geodesic Direct*. Como resultado, a nova posição (ϕ_j, λ_j) é obtida.

5.2 Ad Hoc Local Dead Reckoning

No sistema de coordenadas locais a solução *Dead Reckoning* é obtida através de cálculos trigonométricos, ou conversões entre o sistema de coordenadas locais e um sistema de coordenadas polares, para obtenção das estimativas de mudança de direção do veículo.

Suponha um sistema de coordenadas (x, y) de origem em $(0, 0)$ com um dado ponto se deslocando a uma frequência f , com intervalos de tempo t . A solução *Dead Reckoning* é dada pela duas equações em x, y a seguir. Uma ilustração da abordagem é apresentada na Figura 5.2.

$$x_k = x_0 + \sum_{i=0}^{k-1} s_i \cos \theta_i; \quad (5.2)$$

$$y_k = y_0 + \sum_{i=0}^{k-1} s_i \sin \theta_i \quad (5.3)$$

Nas equações acima, (x_0, y_0) representam a posição inicial do veículo, fornecida via GPS, no tempo t_0 . s_i, θ_i no tempo t_i são respectivamente, a distância (*shortest path*) e

a variação angular percorrida pelo veículo a partir do ponto (x_{i-1}, y_{i-1}) no tempo t_{i-1} . A variação angular relativa (*bearing*) é definida a partir da diferença entre duas leituras *Dead Reckoning* consecutivas e aqui é denotada por δ_i . Dadas várias variações angulares relativas δ_i nos instantes t_1, t_2, \dots, t_k , o ângulo absoluto θ_k no tempo t_k é obtido a partir da Equação 5.4.

$$\theta_k = \sum_{i=0}^k \delta_i \quad (5.4)$$

A distância s_i é obtida através da distância euclidiana.

$$s_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (5.5)$$

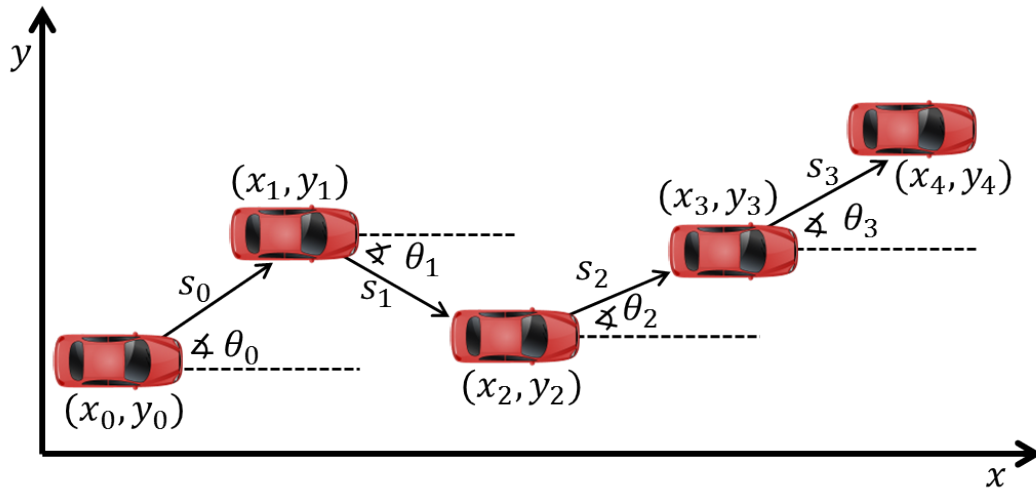


Figura 5.2: Ad Hoc Local Dead Reckoning

Algorithm 3: Ad Hoc Local Dead Reckoning Algorithm

Input : Estimated GPS position x_0, y_0 , the true north angle θ_i and the traveled distance s_{ij} .

Output: Estimated GPS + GDR position: x_j, y_j

```

1 gpsOutage ← GPSIsUnavailabe();
2 while gpsOutage do
3    $s_{ij} \leftarrow \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}(\text{odometer});$ 
4    $\theta_k \leftarrow \sum_{i=0}^k \delta_i(\text{gyro} + \text{compass});$ 
5    $x_j \leftarrow x_0 + \sum_{i=0}^{k-1} s_i \cos \theta_i;$ 
6    $y_j \leftarrow y_0 + \sum_{i=0}^{k-1} s_i \sin \theta_i;$ 
7 end
```

A linha 1 estabelece se o GPS está indisponível. O *loop* das linhas 2 a 7 é executado enquanto o GPS está indisponível. Na linha 3 a distância s_{ij} é obtida a partir do odômetro. Na linha 4 o ângulo absoluto θ_k é obtido a partir das estimativas δ_i fornecidas pelo

giroscópio (Equação 5.4). Nas linhas 5 e 6 a coordenada (x_j, y_j) é obtida pelas Equações 5.2 5.3.

5.3 Parâmetros de Simulação

Para as simulações de comportamento dos veículos utilizamos o simulador SUMO, versão 0.27. Para cada queda de GPS registrada no processo de caracterização do Capítulo 4, foi adicionado um veículo no ambiente de simulação que reproduz a situação de indisponibilidade do GPS e utiliza o *Dead Reckoning*.

O modelo de mobilidade *Krauß Model* foi utilizado nas simulações, no qual os veículos foram configurados com 50% de imperfeição[30]. Isto significa que os veículos vão possuir diferentes comportamentos quanto a aceleração, desaceleração e escolha das vias para trefegarem. Os veículos possuem velocidades que variam entre os valores médio e máximo da via. Estes valores estão na Tabela 4.1 e foram obtidos na caracterização dos cenários dos túneis. Este e os demais parâmetros dos veículos estão definidos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros dos Veículos

Modelo de Mobilidade	<i>Krauß Model</i>
Comprimento	3.5(m)
Aceleração	1.0(m/s ²)
Velocidade	<i>Velocidade média da via. (Tabela 4.1)</i>
Imperfeição	0.5

Como os *datasets* possuem intervalos muito longos entre as leituras GPS (entre 10 e 30 segundos), modelamos os erros do GPS como uma distribuição normal com média μ , desvio padrão σ e variância σ^2 a partir dos valores obtidos da caracterização. A Figura 5.3 apresenta a função densidade de probabilidade (Equação 5.6) (probability density function - PDF) da distribuição normal obtida a partir dos dados GPS do túnel DPT. A Figura 5.4 apresenta todas as distribuições obtidas.

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.6)$$

Com esses dados podemos gerar pontos GPS respeitando os valores de erros observados nos *datasets* porém com diferentes frequências. A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros do GPS para cada túnel.

Os parâmetros do giroscópio para a abordagem *Dead Reckoning* foram obtidos com base no *datasheet* de um giroscópio automotivo desenvolvido pela *Bosch* [28] e estão descritos na Tabela 5.3.

A implementação do sistema *Dead Reckoning* foi realizada sobre o simulador OMNET++. Nós estendemos o framework *Veins* e implementamos os módulos de localização. A Figura 5.5 apresenta o fluxo das informações entre os módulos que implementamos no simulador.

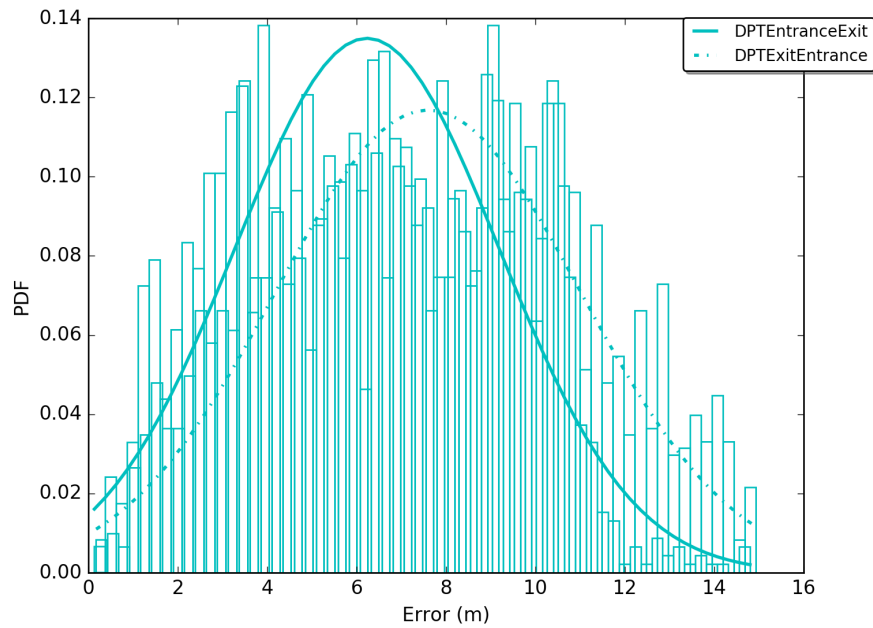


Figura 5.3: PDF dos erros GPS no túnel DPT.

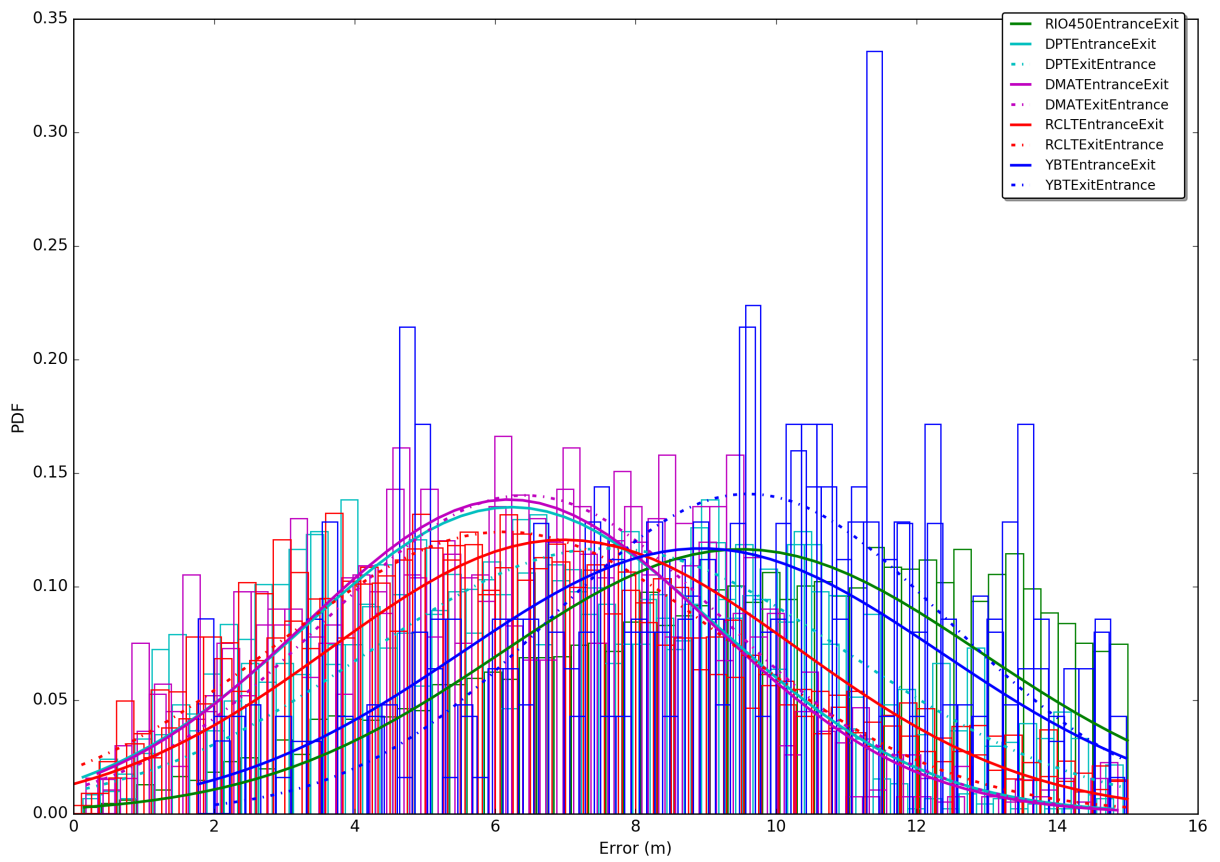


Figura 5.4: PDF dos erros GPS para todos os túneis.

Tabela 5.2: Parâmetros GPS

Error Entrance - Way 1		Error Exit - Way 2	
$\mu_{DMAT} = 6.1914$	$\sigma_{DMAT} = 2.8845$	$\mu_{DMAT} = 6.4231$	$\sigma_{DMAT} = 2.8452$
$\mu_{YBT} = 8.9335$	$\sigma_{YBT} = 3.4163$	$\mu_{YBT} = 9.5998$	$\sigma_{YBT} = 2.8330$
$\mu_{RCLT} = 6.9790$	$\sigma_{RCLT} = 3.3086$	$\mu_{RCLT} = 6.1356$	$\sigma_{RCLT} = 3.2144$
$\mu_{RIO450} = 9.5033$	$\sigma_{RIO450} = 3.4273$	-	-
$\mu_{DPT} = 6.2319$	$\sigma_{DPT} = 2.9560$	$\mu_{DPT} = 7.5976$	$\sigma_{DPT} = 3.4150$
Frequência			
$10Hz$			

Tabela 5.3: Parâmetros Dead Reckoning

Gyro ARW	$0.063245^\circ/s/\sqrt{Hz}$
Gyro Sensitivity	$\pm 2\%$
Frequência	$10Hz$

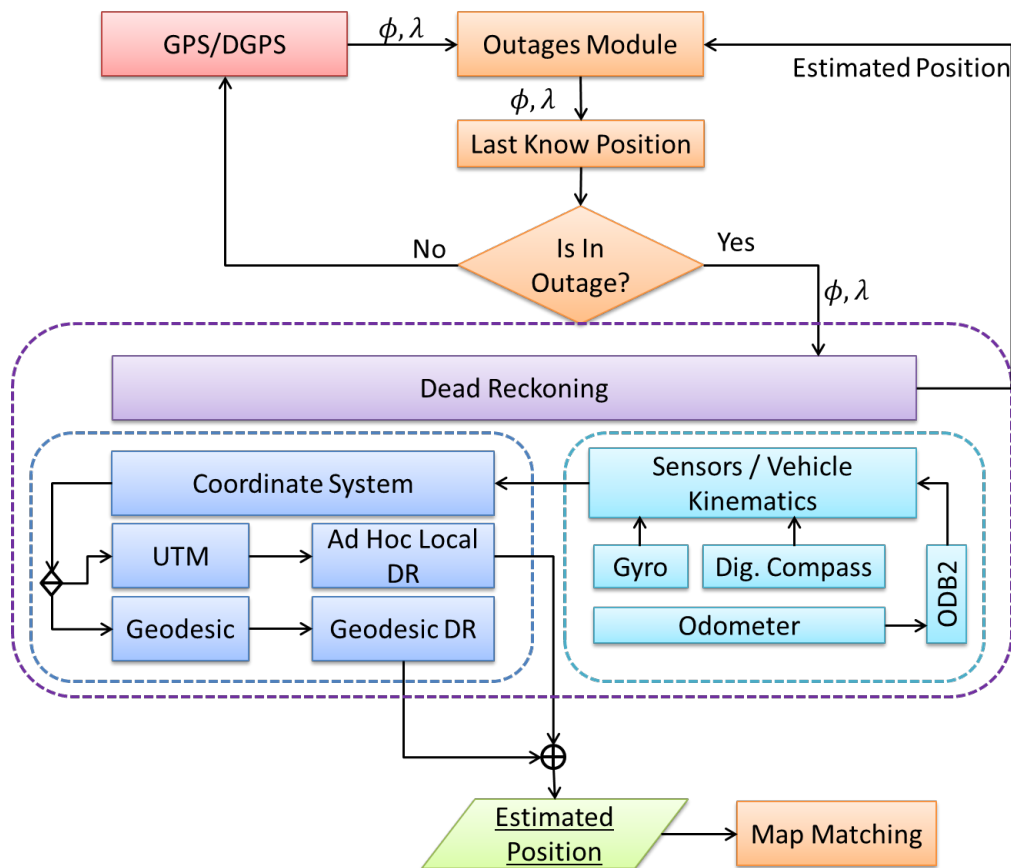


Figura 5.5: Fluxograma Dead Reckoning

5.4 Resultados

Todos os resultados apresentados nesta Seção foram obtidos a partir de uma distribuição T Student com intervalo de confiança de 95%. As Figuras [5.6 - 5.10] apresentam os resultados das reproduções das quedas de GPS e utilização do sistema *Dead Reckoning*.

Nós selecionamos uma queda arbitrária de cada túnel para avaliar o impacto das características de cada cenário na solução proposta. São apresentados os resultados da *trajetória*, *variação angular* e *erro de posicionamento* a cada *ciclo de leitura*.

Como discutido no Capítulo 3 alguns trabalhos [13] [39] [37] utilizam ruas/rodovias retilíneas para avaliação de suas respectivas soluções, o que acaba por favorecer o desempenho da solução de localização proposta. Com o objetivo de mostrar este fato, realizamos a marcação de pontos nas trajetórias e nos picos do gráfico de erro por ciclo (erro a cada ciclo de leitura). Uma vez que o GPS entra em estado de indisponibilidade, a medida de erro por ciclo do GPS é a distância entre o ponto de queda e o ponto onde o veículo se encontra na trajetória.

Na Figura 5.6, entre os 50 e 80 segundos do tempo de trajetória há uma transposição entre a estimativa DR e topologia da pista no ponto A, conseqüentemente, há uma queda no erro por ciclo e um aumento contínuo logo em seguida. O erro do GPS atinge 1277 metros contra 331 metros da solução DR. Além disso, é possível observar uma variação de aproximadamente 60° entre o ponto de queda e recuperação do GPS.

Na Figura 5.7, uma pequena variação angular causa um pequeno pico no erro por ciclo no ponto B, porém de modo geral devido ao tamanho do túnel e sua topologia, o erro por ciclo é menor. Em um intervalo de 40 segundos ([146,185] segundos da trajetória), a solução GPS atinge um erro de 846 metros contra 87 metros da solução DR e uma variação angular menor de aproximadamente 27° .

Na Figura 5.8, há um pico devido à variação angular no ponto C, o que causa um erro por ciclo de 83 metros. No entanto, o erro final da solução *Dead Reckoning* é de apenas de 30 metros contra 906 metros da solução GPS em apenas 40 segundos de indisponibilidade, entre os 69.62 e 99.92 segundos do tempo de trajetória.

Na Figura 5.9, demarcamos os pontos D, E e F para caracterizar o impacto da variação angular na trajetória e no erro por ciclo. É visível que a alta variação angular de cerca de 110° entre os pontos de queda e recuperação do GPS, influenciam nos picos de erro por ciclo. Além disso por ser o segundo túnel mais longo há um tempo considerável de indisponibilidade (cerca de 202 segundos). Por fim, a solução DR atinge um erro máximo de 775 metros contra 2428 metros da solução GPS. O efeito no túnel DPT (pontos G e H da Figura 5.10) é similar porém como o tempo de indisponibilidade é o dobro do observado no túnel RIO450, a solução GPS atinge um erro de 5821.26 contra 2174.40 da solução DR em 297.48 segundos.

De modo geral podemos perceber que a topologia do cenário de avaliação influencia drasticamente na solução *Dead Reckoning* principalmente devido a alta variação angular causada no giroscópio (em cenários com muitas curvas) e conseqüentemente nos cálculos de posicionamento. Por outro lado, é possível observar que o efeito *random walk* do giroscópio contribui significativamente para a discrepância na estimativa *Dead Reckoning* em situações de indisponibilidade do GPS. De modo geral, o tempo de uso do *Dead Reckoning* sem nenhuma fonte de reinicialização acarreta em um evolução rápida do erro por ciclo. Para demonstrar este fato realizamos a análise exploratória a seguir.

A Figura 5.11 apresenta o erro da solução *Dead Reckoning* em termos do RMSE, métrica comumente utilizada na literatura para avaliar o erro das soluções de localização. O RMSE é calculado utilizando a Equação 5.7.

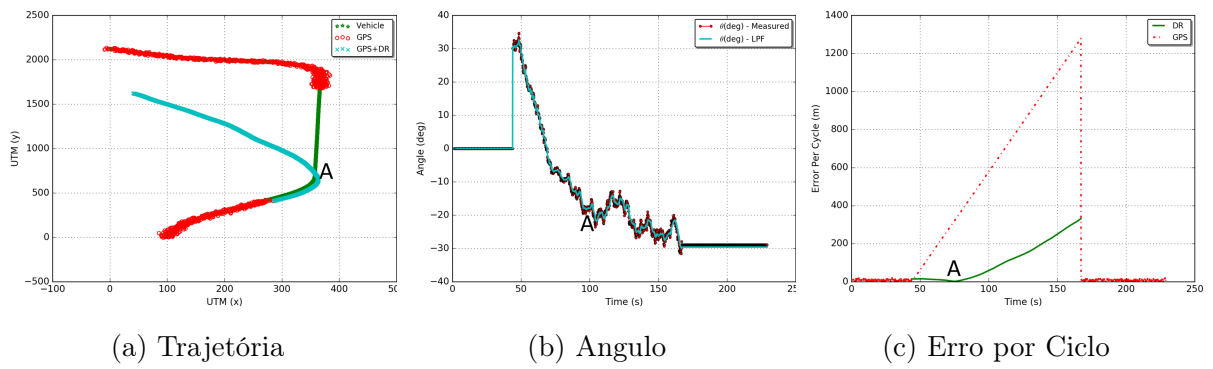


Figura 5.6: DMAT

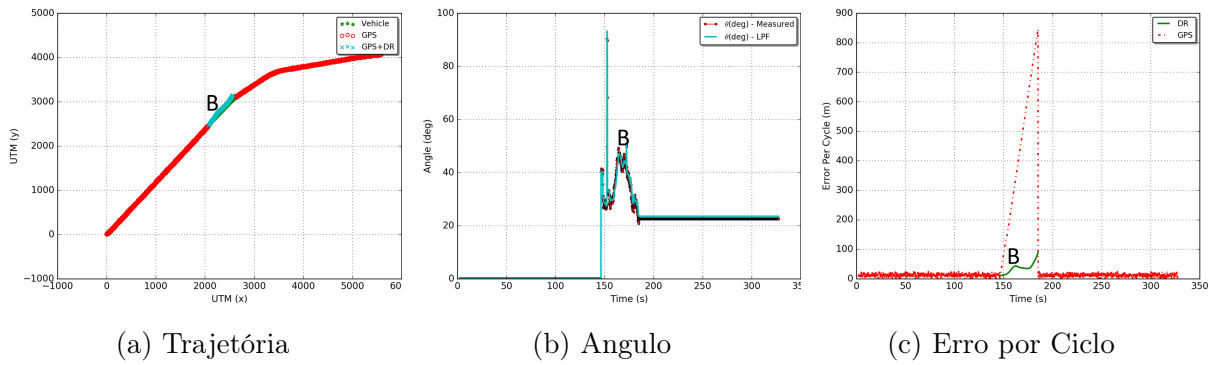


Figura 5.7: YBT

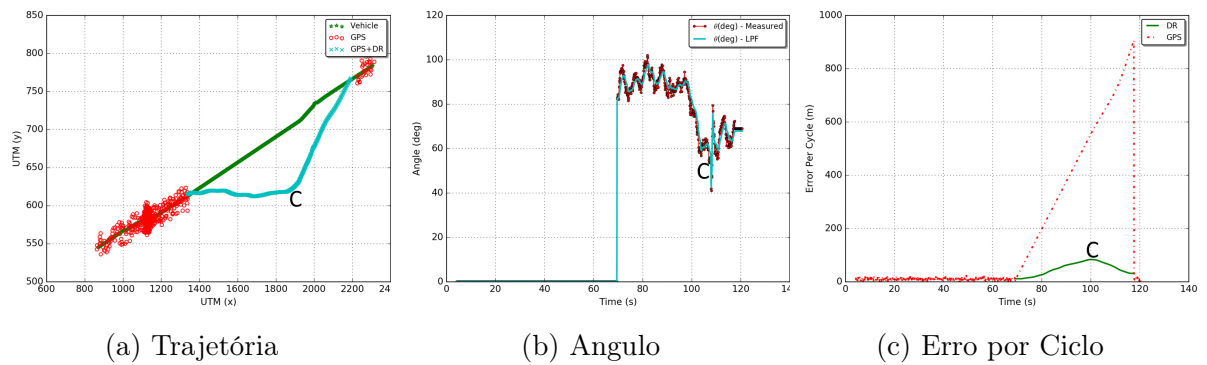


Figura 5.8: RCLT

$$RMSE = \frac{1}{n} * \sum_{i=0}^n \sqrt{(x_{i-veh} - x_{i-est})^2 + (y_{i-veh} - y_{i-est})^2} \quad (5.7)$$

As variáveis (x_{i-veh}, y_{i-veh}) e (x_{i-est}, y_{i-est}) representam a posição do veículo e a estimada via GPS ou GPS+DR. O principal objetivo é mostrar que a viabilidade do *Dead*

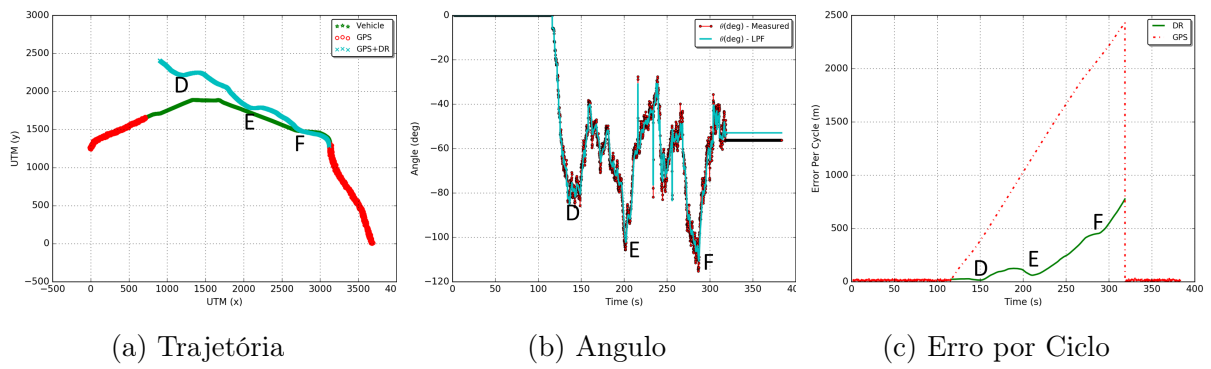


Figura 5.9: RIO 450

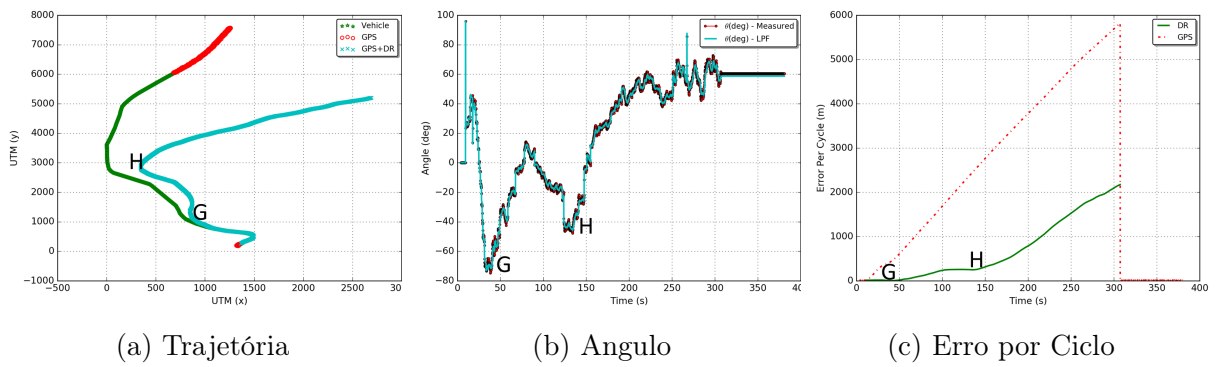


Figura 5.10: DPT

Reckoning está nos primeiros segundos após a queda do sistema GPS. Para mostrar o impacto do tempo no erro da solução, dividimos os tempos de queda de cada veículo em níveis de tempos de indisponibilidade do GPS. Tempos variando de 10% a 100% do tempo total de queda foram relacionados com o RMSE.

Para os túneis DMAT, YBT, RCLT, DPT e RIO450, considerando os primeiros 10% do tempo total de queda, a solução DR apresenta os RMSE de 14, 13, 18, 47 e 13 metros respectivamente, contra 63, 41,96, 218 e 57 da solução GPS. Para os demais níveis, o RMSE cresce proporcionalmente ao tempo de queda. Utilizando a Equação 5.8 é possível estabelecer o ganho médio da solução DR sobre a solução GPS, cujo os resultados são apresentados na Tabela 5.4 a seguir.

$$Ganho_Medio = \frac{1}{10} * \sum_{t=10(\%)}^{100\%} \left(\left(1 - \frac{RMSE_{DR}(t)}{RMSE_{GPS}(t)} \right) * 100 \right) \quad (5.8)$$

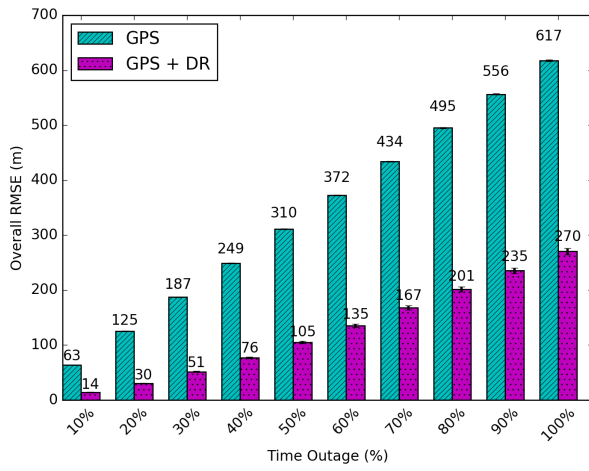
Tabela 5.4: Ganho Médio da Solução *Dead Reckoning*.

Túnel	Ganho Médio)
DMAT	65.91%
YBT	78.74%
RCLT	67.59%
RIO450	76.76%
DPT	57.60%

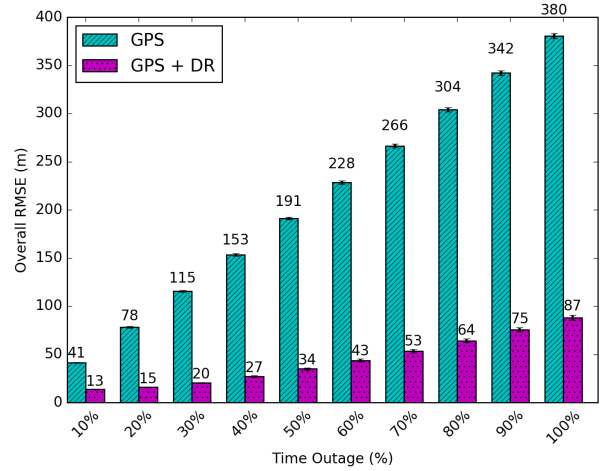
5.5 Conclusões

Neste Capítulo apresentamos o desenvolvimento e avaliação da técnica de localização *Dead Reckoning*. Implementamos uma técnica *Dead Reckoning* híbrida que pode realizar cálculos de posicionamento nos sistemas de coordenadas geográficas e no sistema de coordenadas locais UTM. A técnica que utiliza o sistema de coordenadas locais foi denominada *Ad Hoc Local Dead Reckoning* e utiliza equações trigonométricas, enquanto a geográfica foi nomeada *Geodesic Dead Reckoning* e utiliza cálculos de Geodésia. Para mostrar a viabilidade do uso do *Dead Reckoning* em situações de indisponibilidade de GPS realizamos simulações utilizando informações do mundo real obtidas através de mapas e *data sets* de dispositivos GPS. Reproduzimos no ambiente de simulação as situações de indisponibilidade do GPS caracterizadas no Capítulo 4.

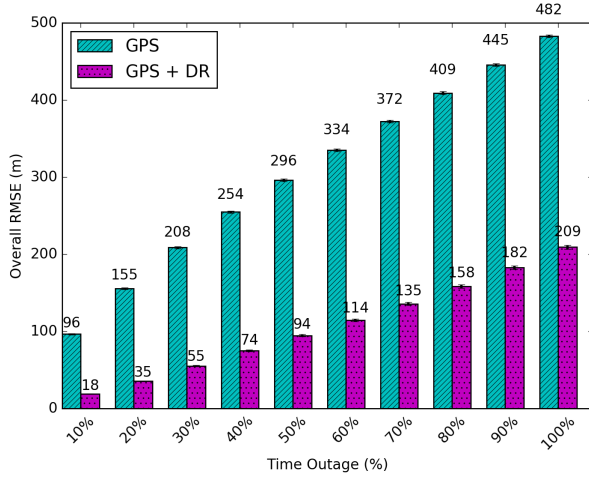
Os resultados da simulação mostram a viabilidade da solução *Dead Reckoning* nos primeiros segundos de indisponibilidade do GPS, ganhos médios de 60% a 80% no RMSE foram obtidos quando comparados com os resultados da solução *stand alone* GPS. Estes resultados apontam a viabilidade do *Dead Reckoning*, principalmente se aliado com outra técnica de localização para realizar seu reinício periódico. Mais ainda, se restringirmos os cálculos de posicionamento as vias onde os veículos trafegam via *map matching* é possível uma acurácia ainda maior do que a caracterizada via GPS.



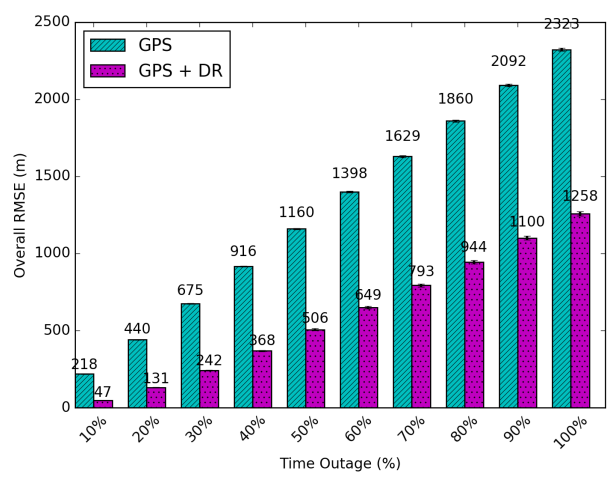
(a) DMAT



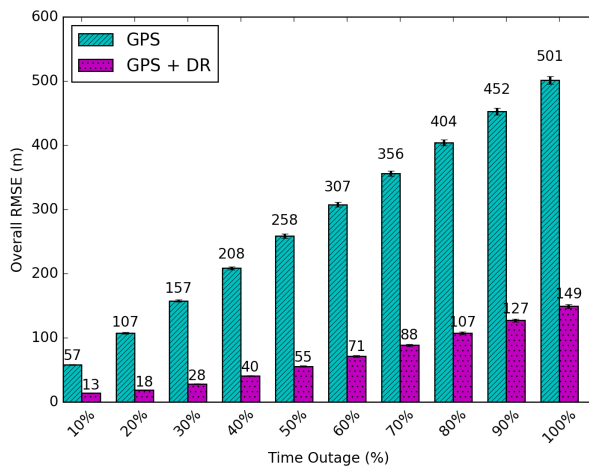
(b) YBT



(c) RCLT



(d) DPT



(e) RIO 450

Figura 5.11: RMSE para diferentes níveis de tempo de queda em (%).

Capítulo 6

Solução Cooperative Positioning

A solução cooperativa proposta utiliza os conceitos da Seção 2.3.12 e conceitos de multilateração e *radio-ranging*. Aqui a idéia principal é utilizar toda e qualquer informação advinda dos veículos vizinhos e ou RSUs para melhorar a acurácia de localização. Novamente são utilizados como cenário de avaliação as mesmas regiões dos túneis obtidos a partir dos *datasets* reais de GPS e caracterizados na Seção 4.

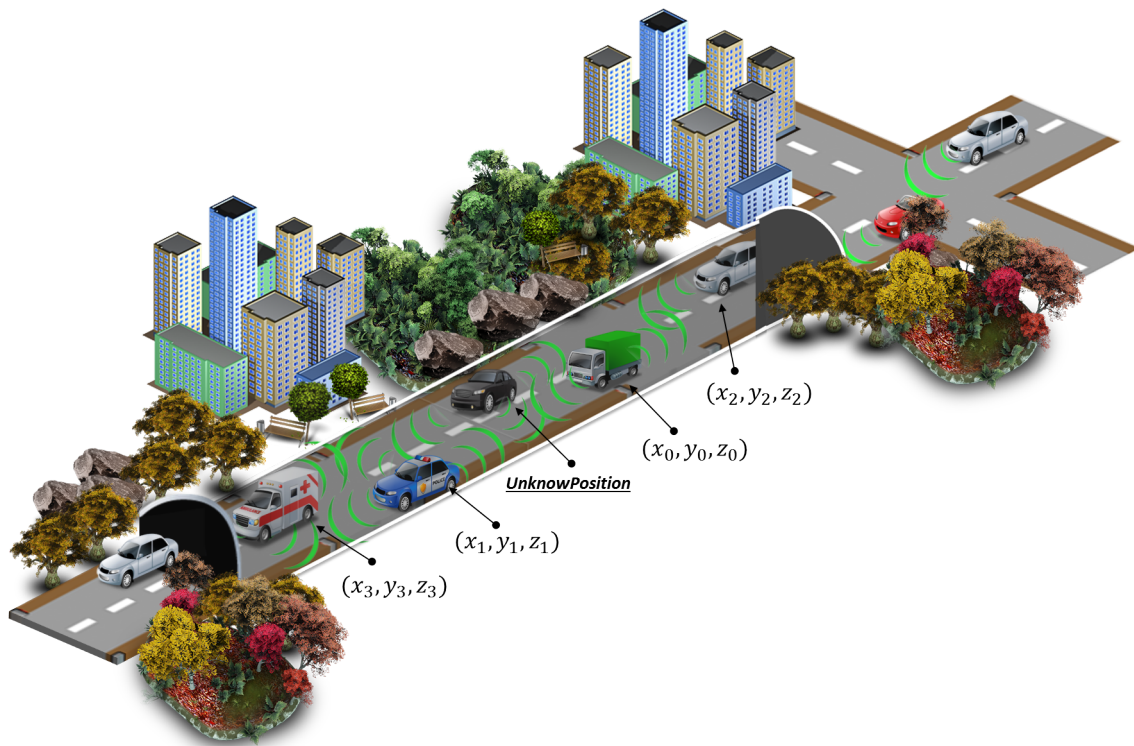


Figura 6.1: Cooperative Positioning

6.1 Disseminação da Informação de Posicionamento

Nesta fase os veículos disseminam constantemente suas informações cinemáticas via *beacons*. Fatores que vão influenciar o raio de alcance da disseminação estão diretamente ligados a potência de transmissão utilizada para disseminação da informação. Segundo o padrão das redes veiculares detalhado na Seção 2.2 do Capítulo 2, o canal 178 de controle (*CCH*) é utilizado para este fim. Diferentes potências podem ser utilizadas para um maior ou menor raio de alcance da informação disseminada. A frequência de disseminação da informação geralmente varia entre o valor mínimo suportado por uma rede veicular de $10Hz$ e um valor máximo a depender da aplicação.

6.2 Seleção e Filtragem dos Nós de Referência

Esta fase compreende a coleta das informações cinemáticas advindas dos veículos vizinhos. Devido aos problemas inerentes ao processo de multilateração é necessário realizar a seleção e filtragem de nós vizinhos que possivelmente contribuem para uma melhor estimativa de localização. E descarte das posições de nós vizinhos que aumentarão o erro no processo de localização, principalmente devido aos problemas apresentados na Subseção 2.3.15. Adicionalmente, *beacons* com informações antigas de posicionamento precisam ser descartadas.

Neste trabalho utilizamos uma abordagem conhecida em redes de sensores [6] para obter um valor residual de cada nó de referência.

$$residual(x_{est}, y_{est}) = \sum_{i=1}^n (\sqrt{(x_i - x_{est})^2 + (y_i - y_{est})^2} - r_i)^2 \quad (6.1)$$

Onde (x_{est}, y_{est}) é a posição obtida via multilateração, e δ_i e (x_i, y_i) são respectivamente a estimativa via RSSI e a coordenada do i -ésimo nó de referência. Em suma, o valor residual é a soma dos quadrados das diferenças entre as distâncias a partir da posição obtida via multilateração e as distâncias estimadas via RSSI.

Outro ponto importante é o descarte de *beacons* antigos. Devido a dinamicidade da rede veicular e a velocidade dos veículos, o nó que busca estimar sua posição necessita descartar periodicamente estes *beacons*.

Como exemplo, suponha um veículo se deslocando a uma velocidade média de $15m/s$ e uma frequência de *beaconing* de $1Hz$. Em um intervalo de tempo de apenas 3 segundos o veículo se deslocou cerca de $45m$ sendo que o primeiro, segundo e terceiro *beacons* foram obtidos a uma distância de 15, 30 e 45 metros respectivamente da posição atual do veículo que necessita estimar sua posição. Por estes motivos, para diminuir a incerteza e aumentar a instantaneidade da estimativa de localização é necessário que o veículo utilize apenas os *beacons* mais recentes além de uma frequência de *beacons* suficiente para contornar estes problemas.

6.3 Solução Proposta

O Algoritmo 4 apresenta a solução para descarte de *beacons* antigos. Como entrada o algoritmo recebe um tempo máximo de permanência das informações de um *beacon* na lista de *anchor nodes*. A linha 1 faz a iteração por todos os *anchor nodes* contidos na lista de *anchor nodes*. A linha 2 calcula um valor delta que corresponde a diferença entre o tempo atual e o tempo em que o beacon foi enviado (*timestamp*). Na linha 3 é verificado se o *beacon* ultrapassou o tempo máximo para descarte. Em caso afirmativo, a linha 4 remove o *beacon* associado ao seu respectivo *anchor node*. Após a iteração por todos os *anchor nodes* têm-se a lista de *anchor nodes* atualizada.

Algorithm 4: Verificação e descarte de *beacons*.

Input : Tempo máximo para descarte de beacons: *maxTimeToDiscard*
 Lista de *anchor nodes*: *anchorNodes*

Output: Lista de *anchor nodes* atualizada: *anchorNodes*

```

1 for each anchor node do
2    $\Delta \leftarrow actual\_time - anchorNode.timestamp;$ 
3   if  $\Delta < maxTimeToDiscard$  then
4      $anchorNodes \leftarrow EraseAnchorNode(anchorNode, anchorNodes);$ 
5   end
6 end
```

O Algoritmo 5 realiza o cálculo dos resíduos para remoção dos nós que afetam os resultados da multilateração. A linha 0 inicializa a soma residual. A linha 2 faz iteração por todos os *anchor nodes*. A linha 3 calcula a distância entre a posição estimada via multilateração e a posição recebida por um dado *anchor node*. Na linha 4 o resíduo para um dado *anchor node* é computado. A linha 5 acrescenta o resíduo a soma residual. Como resulta têm-se a soma residual.

Algorithm 5: Calculo de resíduos para melhoria de localização.

Input : Lista de *anchor nodes*: *anchorNodes*

Output: Soma dos resíduos dos *anchor nodes*: *residual*

```

1 residual  $\leftarrow 0;$ 
2 for each anchor node do
3    $distance = \sqrt{(CPPos.x - anchorNode.x)^2 + (CPPos.y - anchorNode.y)^2};$ 
4    $anchorNode.residual = (distance - anchorNode.distRSSI)^2;$ 
5    $residual += anchorNode.residual;$ 
6 end
```

O Algoritmo 6 apresenta o algoritmo da solução *Cooperative Positioning*. A linha 1 realiza o descarte de *beacons* antigos. A linha 2 verifica se a quantidade de *anchor nodes* é suficiente para realizar uma multilateração 2D. Na linha 3 é realizada uma multilateração e obtida uma estimativa de posicionamento¹. Na linha 4 é calculada a soma residual. O *loop* da linha 5 permite realizar sucessivas iterações enquanto a quantidade de *anchor nodes* é suficiente para uma multilateração 2D. As linhas 6 e 7 fazem a seleção e remoção do nó ancora de maior resíduo na lista de *anchor nodes*. A linha 8 realiza uma nova

¹Para fins de simplificação é omitido o caso em que a decomposição QR não retorna uma solução [31], e a multilateração não retorna uma estimativa de posição. Nestes casos, simplesmente a multilateração é abortada, a última estimativa CP é mantida e o nó aguarda novos *beacons* para uma nova estimativa de posição.

estimativa de posição via multilateração. Na linha 9 um novo resíduo é calculado. Se de fato houve uma redução na soma residual (linha 10), então a soma residual e a estimativa CP é atualizada. Caso contrário, o *anchor node* removido é devolvido à lista de *anchor nodes* (linhas 15 e 16).

Por fim, as linhas 20 a 24 reiniciam o sistema *Dead Reckoning* com a estimativa CP.

Algorithm 6: Cooperative Positioning

```

Input : Lista de anchor nodes: anchorNodes
Output: Estimativa de Localização: CPPos
1 DiscardOldBeacons();(Algoritmo 4)
2 if anchorNodes.size()  $\geq$  3 then
3   CPPos  $\leftarrow$  Multilateration(anchorNodes);
4   residual  $\leftarrow$  SetResidual(); (Algoritmo 5)
5   while anchorNodes.size()  $\geq$  3 do
6     anchorNodeMaxResidual  $\leftarrow$  getMaxResidual(anchorNodes);
7     Remove(anchorNodeMaxResidual, anchorNodes);
8     improvedCPPos  $\leftarrow$  Multilateration(anchorNodes);
9     localResidual  $\leftarrow$  SetResidual();
10    if localResidual < residual then
11      residual  $\leftarrow$  localResidual;
12      CPPos  $\leftarrow$  improvedCPPos;
13    end if
14    else
15      PushBack(anchorNodeMaxResidual, anchorNodes);
16      break;
17    end
18  end while
19 end if
20 if IsInOutage(outageModule) and errorCP < errorDR then
21   ReinitializeSensors(drModule);
22   drModule.SetLastKnowPosUTM(CPPos);
23   drModule.SetErrorUTM(errorCP);
24 end if

```

6.4 Parâmetros de Simulação

Os parâmetros de simulação da mobilidade dos veículos, as soluções *Dead Reckoning*, GPS e os cenários de avaliação são os mesmos descritos na Seção 5.3. Para cada queda de GPS registrada no processo de caracterização do Capítulo 4, foi adicionado um veículo no ambiente de simulação que reproduz a situação de indisponibilidade do GPS e utiliza a solução *Cooperative Positioning*. A solução *Cooperative Positioning* foi implementada sobre o simulador OMNET++ [1], onde o framework Veins [2] foi estendido.

Os parâmetros de simulação da rede estão definidos na Tabela 6.1. Os veículos foram configurados com uma potência de transmissão de 20mW, o que permite um alcance de cerca de 900 metros, os nós da rede disseminam *beacons* a uma frequência de 10Hz. Todos os *beacons* são enviados através do canal de controle (CCH) a uma taxa de 18Mbits/s. O modelo *path loss* utilizado foi configurado com um valor $\alpha = 2.0$, a uma sensibilidade de $-216dBm$, ou seja, *beacons* com valores RSSI menores do que este não são processados. Somente os veículos fora do túnel disseminam *beacons* com o intuito de cooperar com os veículos sem GPS e que fazem uso do *Dead Reckoning*.

Tabela 6.1: Parâmetros da Rede Veicular

Parâmetros	Valores
Tecnologia Sem fio	WAVE IEEE 802.11p
Frequência WAVE	5.89GHz
Canal WAVE	Canal de Controle (CCH)
Potência de Transmissão (P_{TX})	20mW
Alcance de Transmissão	900m
Taxa de Transmissão	18Mbit/s
Path Loss (α)	2.0
Erro RSSI	10%
Sensitivity Threshold	-216dBm
Tamanho da mensagem	56bytes
Tipo de Comunicação	V2V
Frequência de Transmissão	10Hz

6.5 Resultados

Todos os resultados apresentados nesta Seção foram obtidos a partir de uma distribuição T Student com intervalo de confiança de 95%.

A Figura 6.2 apresenta os resultados da melhoria na estimativa de posicionamento e consequentemente no erro por ciclo, para uma queda arbitrária do túnel RCLT. Na Figura 6.2a é possível perceber melhorias consideráveis nas estimativas de posicionamento da solução *Dead Reckoning*. Devido aos reinícios providos pela solução *Cooperative Positioning*, as estimativas de posicionamento estão bem mais próximas da trajetória real do veículo. Na Figura 6.2b os erros são mantidos abaixo de 20 metros na maior parte do tempo. Apenas por volta dos 160 segundos da trajetória o erro atinge um pico de 40 metros, mas é corrigido logo em seguida.

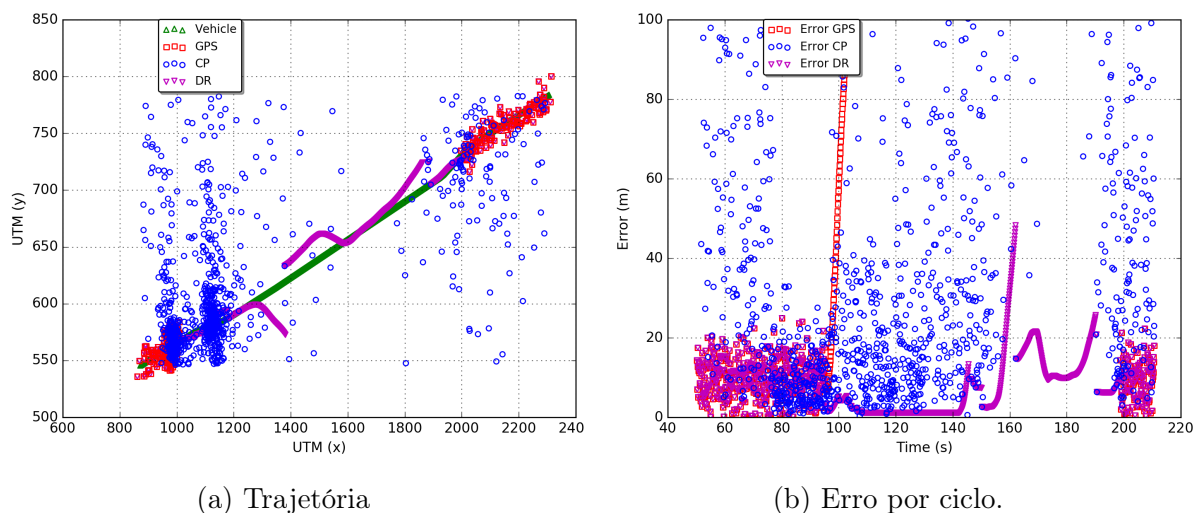


Figura 6.2: Estimativa de Localização e Erro por Ciclo com uso da Solução CP.

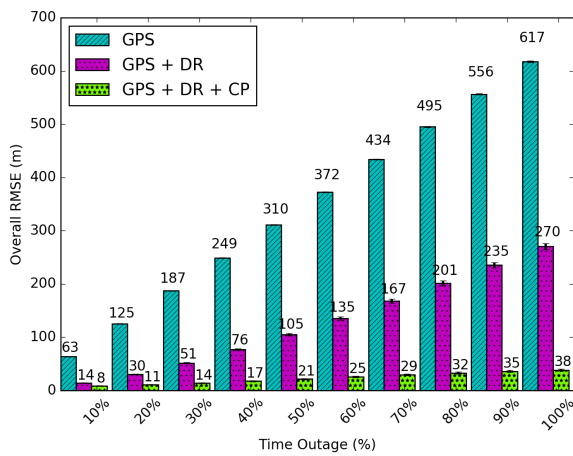
Os resultados da Figura 6.3 apresentam o RMSE (Equação 5.7) das soluções GPS (*stand alone*), GPS + DR, e GPS + DR + CP para todas as quedas reproduzidas no ambiente de simulação. Para os túneis DMAT, YBT, RCLT, DPT e RIO450, considerando os primeiros 10% do tempo total de queda, a solução GPS+DR+CP apresenta os RMSE de 8, 13, 7, 40 e 10 metros respectivamente, contra 63, 41,96, 218 e 57 metros da solução GPS, e 14, 13, 18, 47 e 13 da solução GPS+DR. Para os demais níveis, o RMSE das soluções crescem proporcionais ao tempo de queda, porém a solução GPS+DR+CP possui um fator de crescimento muito menor em relação as demais soluções. Este fato é visível ao se comparar a diferença RMSE das soluções com 10% e 100% do tempo total de queda respectivamente. A Tabela 6.2 apresenta o ganho médio das solução GPS+DR+CP em relação as soluções GPS e GPS+DR.

Tabela 6.2: Ganho Médio da Solução *Cooperative Positioning*.

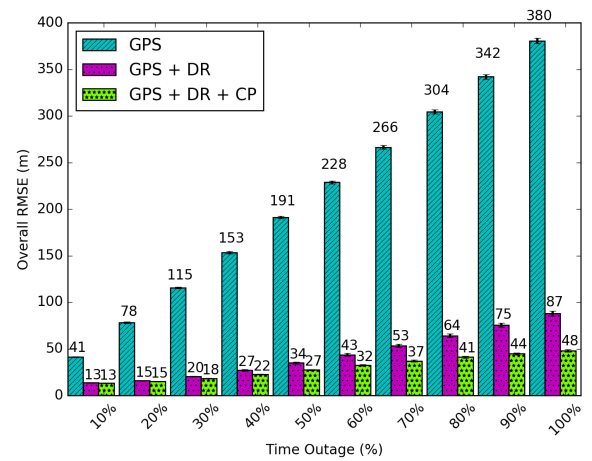
Túnel	Ganho Médio (GPS)	Ganho Médio (GPS+DR)
DMAT	92.24%	74.76%
YBT	83.64%	23.58%
RCLT	93.32%	77.96%
RIO450	92.35%	65.16%
DPT	80.64%	50.23%

6.6 Conclusões

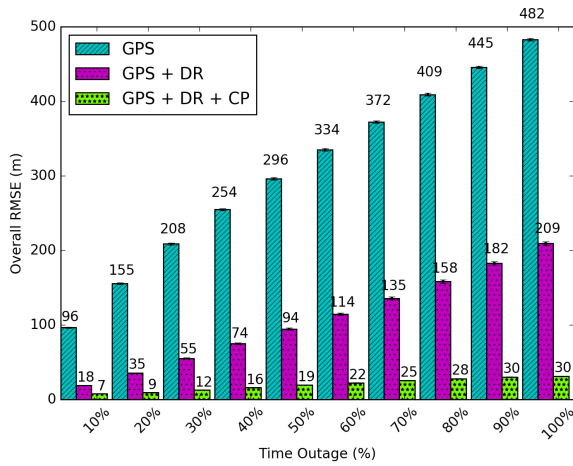
Neste Capítulo apresentamos uma solução *Cooperative Positioning* que faz uso de uma rede veicular para comunicação entre veículos. Através de estimativas RSSI os veículos são capazes de mensurar a distância entre si e cooperar para melhoria de suas respectivas localizações através da técnica de multilateração. Adicionalmente, os veículos reiniciam periodicamente o sistema Dead Reckoning proposto no Capítulo 5. Resultados de simulação mostram a viabilidade da solução proposta que cobre em 100% o tempo de indisponibilidade do GPS. Adicionalmente, conseguimos reduzir o RMSE da solução GPS *stand alone* entre 80% e 92%, e o RMSE da solução Dead Reckoning entre 23% a 74%.



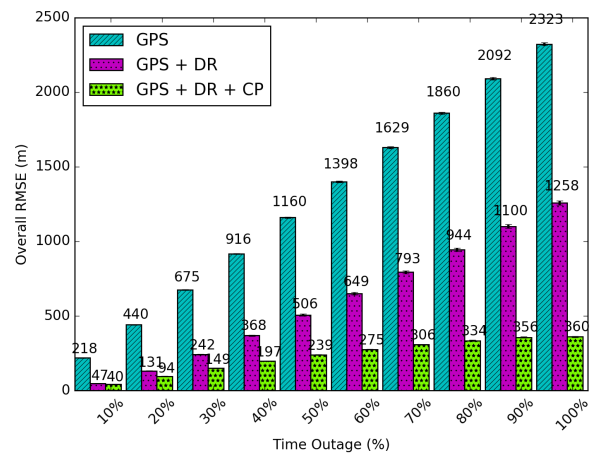
(a) DMAT



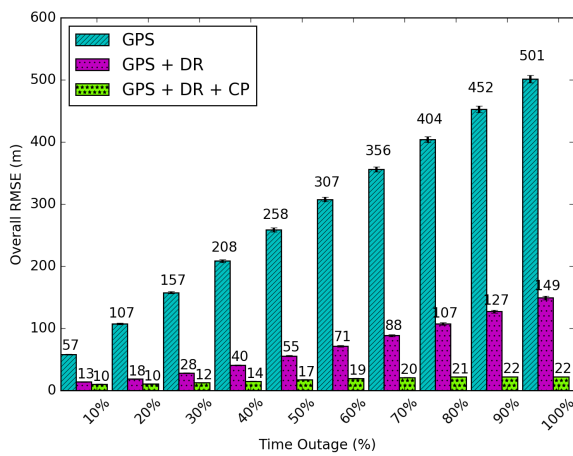
(b) YBT



(c) RCLT



(d) DPT



(e) RIO 450

Figura 6.3: RMSE para diferentes níveis de tempo de queda em (%).

Capítulo 7

Considerações Finais e Trabalhos Futuros

7.1 Considerações Finais

Nos últimos anos diversos serviços têm sido desenvolvidos para os Sistemas de Transportes Inteligentes. Neste contexto diversos, protocolos e aplicações tem feito uso das Redes Veiculares como paradigma de comunicação entre veículos. Estes serviços são dependentes de localização em diferentes níveis de acurácia. Como isso em mente, nesta dissertação foram apresentados, discutidos e analisados os problemas relacionados à localização no contexto das Redes Veiculares e Sistemas de Transportes Inteligentes.

A solução imediata de localização é o uso de um Sistemas GNSS. Porém os sistemas GNSS possuem problemas de inacurácia e indisponibilidade em zonas urbanas densas, zonas com vasta vegetação e rodovias multinível, sendo esta uma lista não exaustiva. No cenário de túneis, o receptor GNSS perde a sua linha de visada com os satélites sofrendo indisponibilidade.

Para verificação e análise dos problemas dos sistemas GNSS, foram utilizados dados de dispositivos GPS reais. Os dados correspondem a trajetórias de táxis e ônibus disponíveis por meio de *datasets*. Com o auxílio de mapas digitais foram coletadas as informações de tempos e distâncias que os veículos percorreram a região de túneis com o sistema GPS indisponível. Além disso, este processo permitiu caracterizar o erro do GPS na região dos túneis.

Foi desenvolvida e analisada uma solução *Dead Reckoning* híbrida que pode realizar cálculos de posicionamento nos sistemas de coordenadas geográficas e no sistema de coordenadas UTM. Além disso, a solução foi avaliada nos cenários dos túneis caracterizados. Resultados de simulação mostraram a viabilidade da solução *Dead Reckoning* nos primeiros segundos de indisponibilidade do sistema GPS. Os resultados também mostram ganhos médios de 60% a 80% no RMSE quando comparados com os resultados da solução *stand alone* GPS.

Por último foi desenvolvida uma solução *Cooperative Positioning* V2V para realizar reinícios periódicos da solução *Dead Reckoning*. Resultados de simulação mostram uma redução do RMSE da solução GPS *stand alone* que variam entre 80% e 92%, e redução

do RMSE da solução *Dead Reckoning* entre 23% a 74%.

7.2 Trabalhos Futuros

Apesar dos resultados apresentarem melhorias significativas, há diversas abordagens e cenários que precisam ser explorados. Há um vasto campo de estudo, de técnicas que podem ser agregadas a solução atual. A seguir são apresentados possíveis trabalhos futuros.

- Explorar melhorias com o uso de RSUs.
- Implementação utilizando sensores/shields arduino.
- Implementação utilizando smartphones.
- Real Time Map Matching (OSRM Mapbox).
- Técnicas de ranging (TDOA).
- Técnicas de Predição (Extended KF), Particle Swarm Optimazation.
- Uso de informação Contextual.
- Viabilidade para veículos autônomos.
- Explorar uso das Redes de Cellular.
- Explorar diferentes modelos *path loss*.

Referências Bibliográficas

- [1] OMNeT++ Network Simulation.
- [2] VEINS: Vehicles in Network Simulation.
- [3] Saif Al-Sultan, Moath M. Al-Doori, Ali H. Al-Bayatti, and Hussien Zedan. A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network. *Journal of Network and Computer Applications*, 37:380–392, jan 2014.
- [4] Nima Alam and Andrew G. Dempster. Cooperative Positioning for Vehicular Networks: Facts and Future. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(4):1708–1717, dec 2013.
- [5] Nima Alam, Allison Kealy, and Andrew G. Dempster. Relative Positioning Enhancement in VANETs: A Tight Integration Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(4):1992–1996, 2013.
- [6] J. Albowicz, A. Chen, and Lixia Zhang. Recursive position estimation in sensor networks. In *Proceedings Ninth International Conference on Network Protocols. ICNP 2001*, pages 35–41. IEEE Comput. Soc.
- [7] Maryam M Alotaibi, Azzedine Boukerche, and Hussein Mouftah. Distributed relative cooperative positioning in Vehicular Ad-Hoc Networks. In *2014 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, pages 1–8. IEEE, sep 2014.
- [8] Azzedine Boukerche, Horacio A.B.F. Oliveira, Eduardo F. Nakamura, and Antonio A.F. Loureiro. Vehicular Ad Hoc Networks: A New Challenge for Localization-Based Systems. *Computer Communications*, 31(12):2838–2849, jul 2008.
- [9] Dublin City Council. Dublin City Council (Insight Project): Dublin Bus DataSet, 2013.
- [10] Data.rio. Data Rio - BUS GPS, 2016.
- [11] Pedro P. L. L. do Nascimento, Richard W. Pazzi, Daniel L. Guidoni, and Leandro A. Villas. A Geodesic Dead Reckoning Solution for Vehicular Networks. In *2016 8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, pages 1–6. IEEE, nov 2016.

- [12] Pedro P. L. L. do Nascimento, Richard W. Pazzi, Daniel L. Guidoni, and Leandro A. Villas. Characterizing GPS outages: Geodesic Dead Reckoning solution for VANETs and ITS. In *2016 IEEE 15th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA)*, pages 18–21. IEEE, oct 2016.
- [13] Nabil Mohamed Drawil and Otman Basir. Intervehicle-Communication-Assisted Localization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(3):678–691, sep 2010.
- [14] Gerald I. Evenden. libproj4: A Comprehensive Library of Cartographic Projection Functions (Preliminary Draft). Technical report, 2005.
- [15] Federal Communications Commission (FCC). Dedicated Short Range Communications (DSRC), 1999.
- [16] H.T. Friis. A Note on a Simple Transmission Formula. *Proceedings of the IRE*, 34(5):254–256, may 1946.
- [17] Sebastian Grafing, Petri Mahonen, and Janne Riihijarvi. Performance evaluation of IEEE 1609 WAVE and IEEE 802.11p for vehicular communications. In *2010 Second International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pages 344–348. IEEE, jun 2010.
- [18] Charles F F Karney. Algorithms for geodesics. *Journal of Geodesy*, 87(1):43–55, 2013.
- [19] Phil Kim. *Kalman Filter For Beginners with MATLAB Examples*. A-JIN, 2011.
- [20] John Lawlor. *Auto Math Handbook: Calculations, Formulas, Equations and Theory for Automotive Enthusiasts*. Penguin Publishing Group, 1991.
- [21] Paul Newson and John Krumm. Hidden Markov map matching through noise and sparseness. In *Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems - GIS '09*, page 336, New York, New York, USA, 2009. ACM Press.
- [22] Dragan Obradovic, Henning Lenz, and Markus Schupfner. Fusion of Sensor Data in Siemens Car Navigation System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(1):43–50, jan 2007.
- [23] Stephan Olariu and Michele C. Weigle. *Vehicular Networks: From Theory to Practice*. CRC Press, 2009.
- [24] OpenStreetMap. OpenStreetMap Contributors, 2017.
- [25] Ryan Parker and Shahrokh Valaee. Vehicular node localization using received-signal-strength indicator. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(6 I):3371–3380, 2007.

- [26] Michal Piorowski, Natasa Sarafijanovic-Djukic, and Matthias Grossglauser. A parsimonious model of mobile partitioned networks with clustering. In *2009 First International Communication Systems and Networks and Workshops*, pages 1–10. IEEE, jan 2009.
- [27] V.I. Ponomaryov, O.B. Pogrebnyak, L.N. de Rivera, and J.C.S. Garcia. Increasing the accuracy of differential global positioning system by means of use the Kalman filtering technique. In *ISIE'2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.00TH8543)*, volume 2, pages 637–642. IEEE.
- [28] Robert Bosch GmbH. SMI130 Automotive Electronics, 2015.
- [29] Mohsen Rohani, Denis Gingras, Vincent Vigneron, and Dominique Gruyer. A New Decentralized Bayesian Approach for Cooperative Vehicle Localization Based on Fusion of GPS and VANET Based Inter-Vehicle Distance Measurement. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 7(2):85–95, jan 2015.
- [30] Francisco J. Ros, Juan A. Martinez, and Pedro M. Ruiz. A survey on modeling and simulation of vehicular networks: Communications, mobility, and tools. *Computer Communications*, 43:1–15, 2014.
- [31] Timothy Sauer. *Numerical Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company, 2nd edition, 2011.
- [32] International GNSS Service. International GNSS Service, 2016.
- [33] International GNSS Service. International GNSS Service: Strategic Plan 2013-2016. Technical report, 2012.
- [34] Isaac Skog and P. Handel. In-Car Positioning and Navigation Technologies - A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10(1):4–21, mar 2009.
- [35] C Sommer, D Eckhoff, R German, and F Dressler. A computationally inexpensive empirical model of IEEE 802.11p radio shadowing in urban environments. In *2011 Eighth International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services*, pages 84–90. IEEE, jan 2011.
- [36] Han-Lee Song. Automatic vehicle location in cellular communications systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 43(4):902–908, 1994.
- [37] Lin Sun, Ying Wu, Jingdong Xu, and Yuwei Xu. An RSU-assisted localization method in non-GPS highway traffic with dead reckoning and V2R communications. *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet 2012 - Proceedings*, pages 149–152, 2012.
- [38] Anh Vu, Arvind Ramanandan, Anning Chen, Jay a. Farrell, and Matthew Barth. Real-time computer vision/DGPS-aided inertial navigation system for lane-level vehicle navigation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(2):899–913, 2012.

- [39] Ahmed Abdel Wahab, Ahmed Khattab, and Yasmine a. Fahmy. Two-way TOA with limited dead reckoning for GPS-free vehicle localization using single RSU. *2013 13th International Conference on ITS Telecommunications, ITST 2013*, pages 244–249, 2013.
- [40] David Wong, Daisuke Deguchi, Ichiro Ide, and Hiroshi Murase. Single camera vehicle localization using SURF scale and dynamic time warping. In *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, pages 681–686. IEEE, jun 2014.
- [41] Jean Marie Zogg. *GPS - Essentials of Satellite Navigation*. UBLOX, 2007.

Apêndice A

Resultados da Caracterização

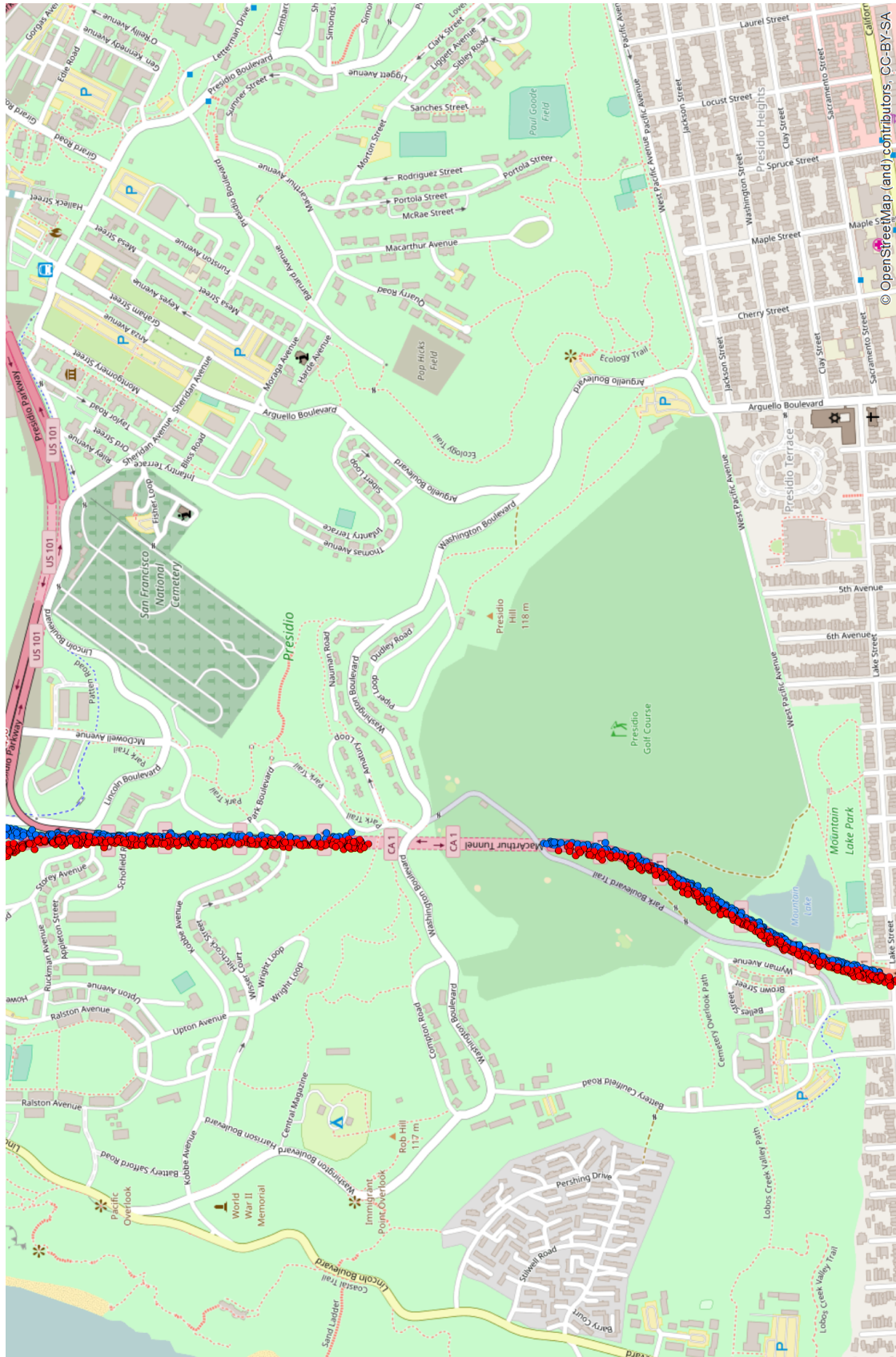


Figura A.1: Douglas Mc Arthur Tunnel, São Francisco USA.

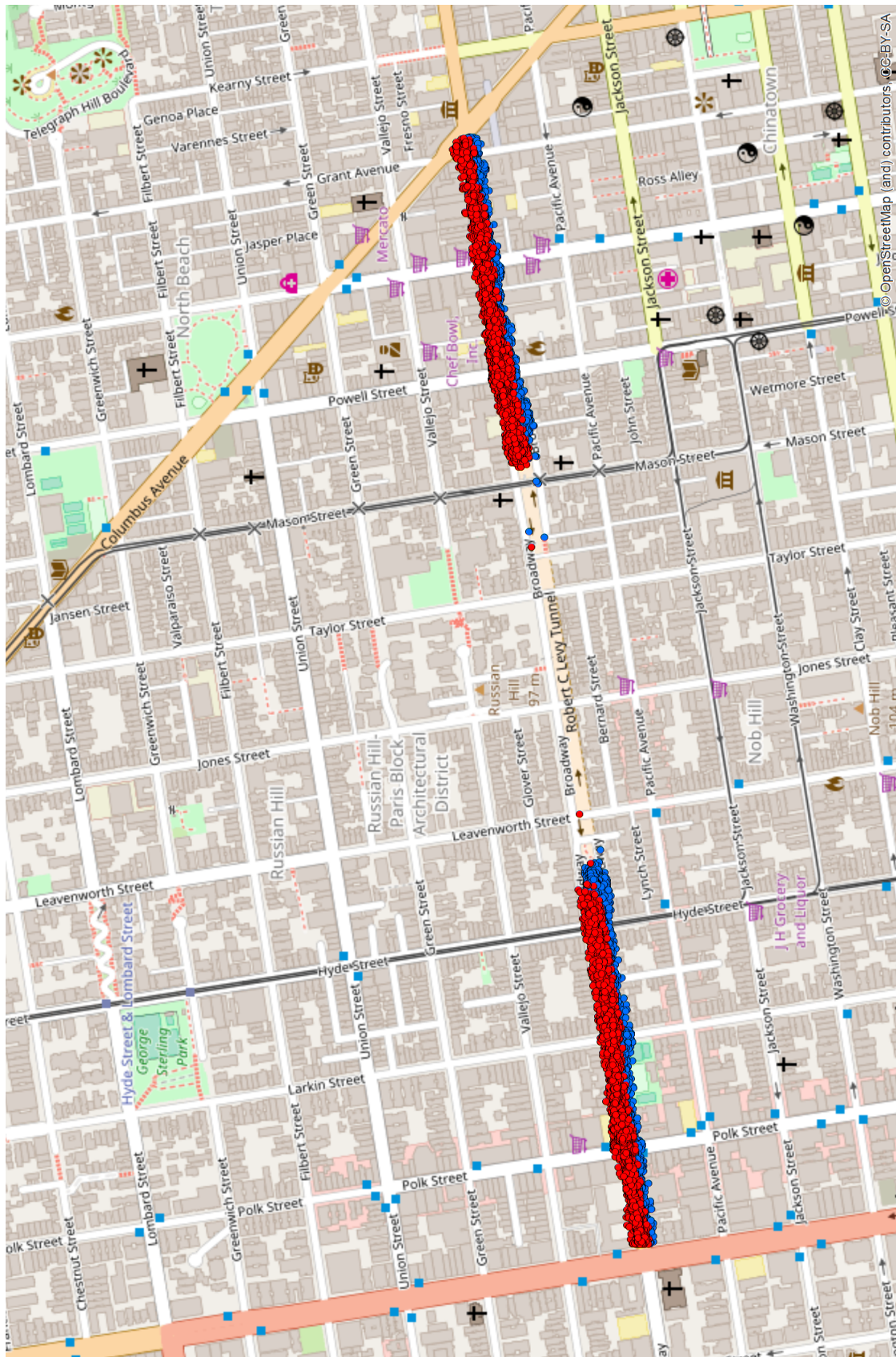


Figura A.3: Robert C. Levy (Broadway) Tunnel, São Francisco EUA.

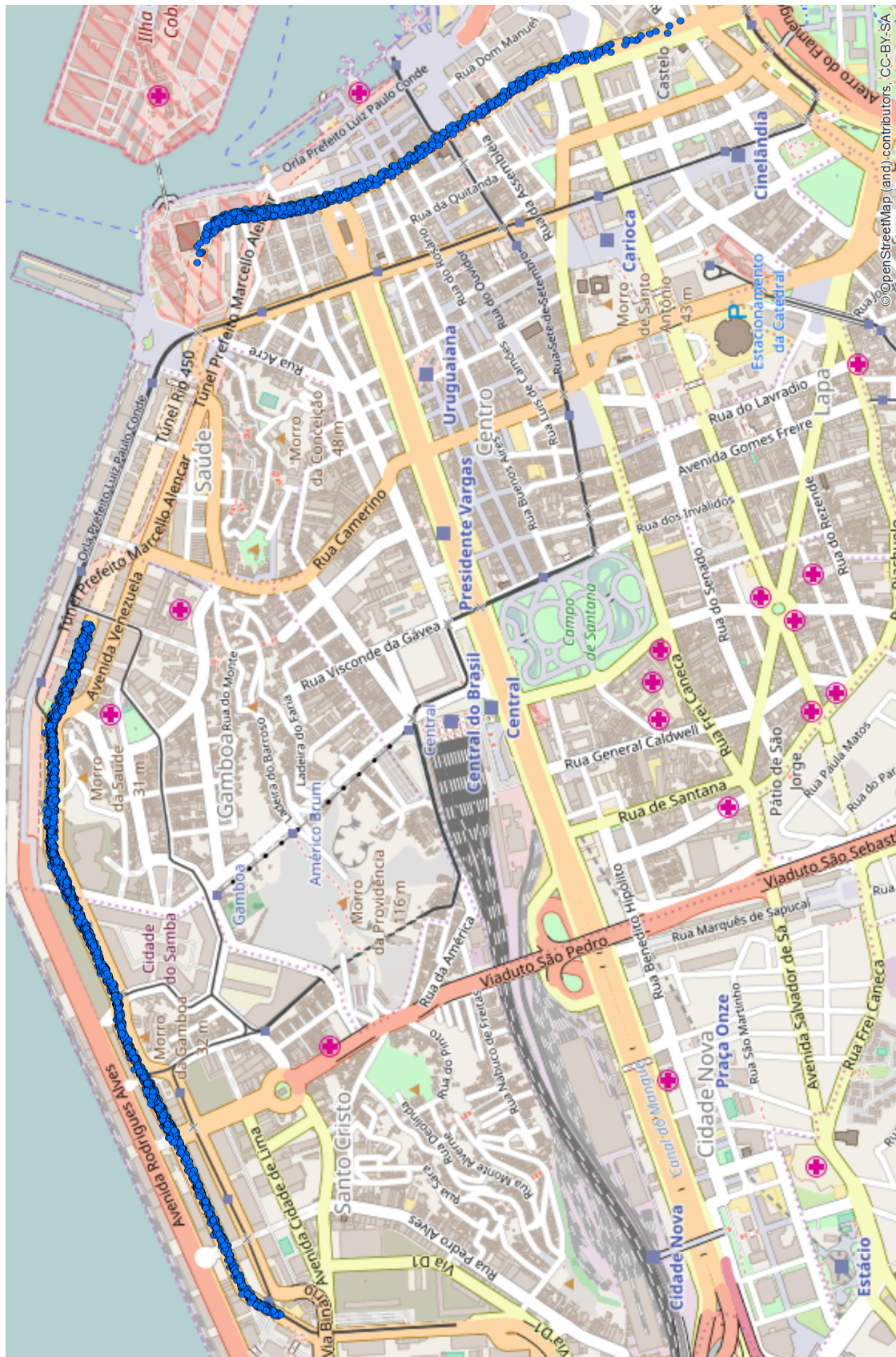


Figura A.4: Rio 450 Tunnel, Rio de Janeiro Brasil

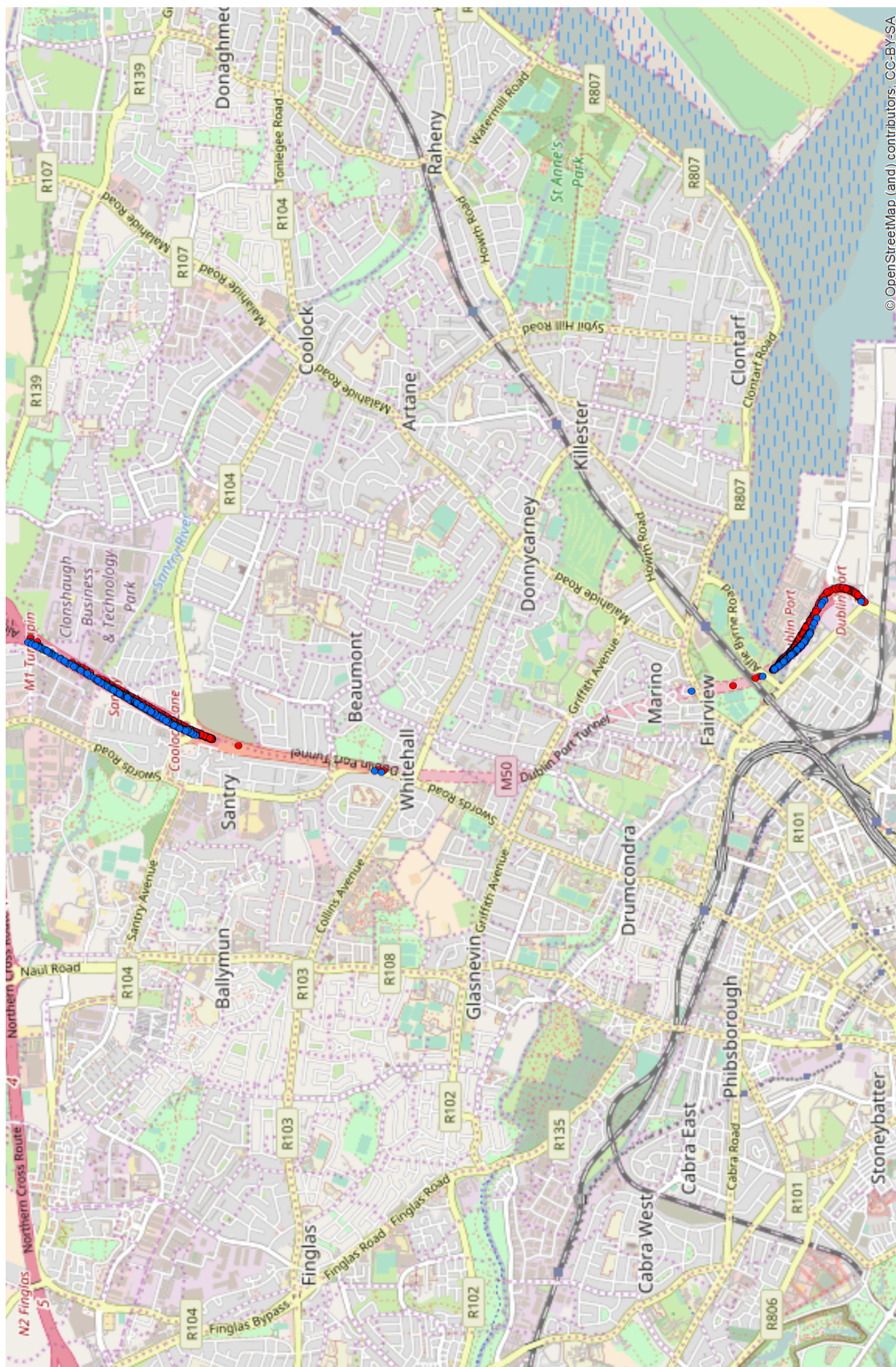


Figura A.5: Dublin Port Tunnel, Dublin Irlanda