

Rafael dos Santos Chelim

# Estimação colaborativa de posição e orientação em veículos utilizando GNSS e V2V

Dissertação de Mestrado em  
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Fevereiro 2015



UNIVERSIDADE DE COIMBRA





**Universidade de Coimbra**  
**Faculdade de Ciências e Tecnologia**  
**Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

**Estimação colaborativa de posição e orientação em veículos  
utilizando GNSS e V2V**

Rafael dos Santos Chelim

**Orientador**

Professor Doutor Urbano José Carreira Nunes

**Co-Orientador**

Mestre Luís Conde Bento

**Júri**

Professor Doutor Fernando Manuel dos Santos Perdigão  
Professora Doutora Lúcia Maria dos Reis Albuquerque Martins  
Professor Doutor Urbano José Carreira Nunes

Coimbra, 2015



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Urbano Nunes pela sua orientação, pela confiança depositada, e através do Instituto de Sistemas e Robótica, pela total disponibilização de recursos necessários à conclusão deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Mestre Luís Bento, um bem-haja pela orientação, supervisão, por fazer todos os possíveis para me manter no caminho certo ao longo dos últimos meses e pelo companheirismo desde sempre demonstrado.

Um agradecimento aos meus colegas do Instituto de Sistemas e Robótica, pelo aconselhamento, pela paciência nas horas menos boas, mas sobretudo pela amizade. Um agradecimento especial ao Fábio Faria por toda a ajuda que proporcionou no sistema de comunicação e ao João Sousa pelo auxílio essencial na fase de testes.

Por fim, aos colegas de casa e especialmente aos meus pais e irmão, pelo apoio incondicional, pelo sacrifício ao longo destes anos, e por sempre me terem dado todas as condições necessárias ao sucesso do meu percurso académico.

Muito Obrigado.

Esta dissertação foi realizada no âmbito do projeto "PROJECTO B: Diagnosis and Assisted Mobility for People with Special Needs" (QREN-MAIS Centro: CENTRO-07-ST24-FEDER-002028).



# Resumo

Ao longo dos últimos anos, com o advento dos sistemas de transporte inteligentes e sistemas de navegação autónoma, o problema de localização tornou-se um assunto de enorme relevância, cuja solução a comunidade científica têm mostrado crescente interesse e apresentado diversas soluções e métodos. A variedade de abordagens, empregando diversos sensores e métodos é consequência direta da complexidade do tema, muito devido aos ambientes e condições diversas de operação dos veículos. É possível obter bom desempenho com sistemas que recorrem a instrumentação muito dispendiosa e geralmente volumosa. Infelizmente, é impraticável a sua utilização em veículos comuns, uma vez que representariam uma grande percentagem no custo total dos mesmos.

Esta dissertação propõe o desenvolvimento e teste de um método de estimação de posição e orientação, recorrendo apenas ao sistema de navegação por satélite (GNSS) e à interação e colaboração entre os diversos agentes na estrutura rodoviária, através da norma de comunicação entre veículos (802.11p). Tem como principal objectivo apresentar uma alternativa de baixo custo (equipamentos e instalação), sem comprometer o processo de estimação da localização. Para tal, propõe-se a utilização de dois receptores GPS por veículo, dispostos longitudinalmente na cobertura de modo a maximizar a distância entre ambos, de forma a calcular o ângulo *Yaw* e *Pitch*. Para o cálculo do ângulo de *Roll* o sistema proposto utiliza informação de um receptor exterior ao veículo, proveniente de outro agente rodoviário, através do sistema de comunicação. De forma a aumentar a resolução das observações de cada antena, o sistema proposto faz uso de métodos de posicionamento relativo (RTK) a dois níveis: a nível local (entre as antenas do veículo), para a determinação dos ângulos de orientação e a nível global (entre o veículos e a rede de estações permanente) de forma a estimar a posição do veículo. Faz ainda parte do sistema proposto um método de filtragem de observações, que através da estimação das *baselines* entre receptores, é capaz de remover as observações com maior probabilidade de estarem afetadas de erro, evitando que este erro seja propagado à fase de estimação da orientação. Os resultados experimentais obtidos referentes a um percurso de aproximadamente 650 metros, em campo aberto e céu pouco nublado, revelaram-se bastante satisfatórios, tendo-se conseguido erros médios de 7 graus em *Yaw* e erros menores que 5 graus em *Pitch* e *Roll*. Na estimação da posição foram obtidos erros médios na ordem dos 2.5 metros.

**Palavras-chave:** Estimação, Posição, Orientação, Colaboração, Posicionamento Relativo.



# Abstract

Over the past few years, with the advent of intelligent transport systems and autonomous navigation systems, the problem of location has become relevant a issue whose solution the scientific community have shown growing interest and presented various solutions and methods. The variety of approaches, using various sensors and methods is a direct consequence of the complexity of the theme, largely due to the various environments and conditions of vehicle operation. It's possible to obtain good performance with systems using very expensive and often bulky instrumentation. Unfortunately, their use on common vehicles is impractical since it would represent a large percentage of the total cost.

This dissertation proposes to develop and test a method of location and pose estimation, using only the global navigation satellite system (GNSS) and the interaction and collaboration among the various agents in road infrastructure through vehicle communication standard (802.11p). Its main purpose is to provide a low cost alternative (equipment and installation), without compromising the process of location estimation. To this end, it proposes the use of two GPS receivers for each vehicle, disposed longitudinally on the cover (to maximize the distance between receivers) in order to estimate the yaw and pitch angle. To estimate the roll angle, the proposed system uses information from a receiver outside the vehicle through the communication system. In order to increase the resolution of observations for each antenna, the system makes use of relative positioning (RTK) at two levels: locally (in the vehicle's antennas) for determining the pose angles and globally (between the vehicle and a permanent station network) in order to estimate the absolute position of the vehicle. It is also part of the proposed system, a method of observation filtering based on receptor baseline estimation. It is capable of removing the observations more likely to be affected with errors, avoiding this errors to be propagated to the orientation estimation stage. The experimental results obtained on a route of approximately 650 meters, in an open area, proved to be quite satisfactory, having achieved average errors of 7 degrees in Yaw angle and smaller errors than 5 degrees in Pitch and Roll angles. In position estimation, the mean error obtained in the same conditions was about 2.5 meters.

**Keywords:** Estimation, Position, Pose, Colaboration, Relative Positioning.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	2
1.3	Trabalho realizado e contribuições . . . . .	2
1.4	Estrutura da dissertação . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Revisão da Literatura</b>	<b>4</b>
2.1	Sistemas de estimação de posição . . . . .	4
2.1.1	Sistemas de posicionamento relativo . . . . .	4
2.1.2	Sistemas de posicionamento baseado em Global Navigation Satellite System (GNSS) . . . . .	5
2.1.3	Sistemas de posicionamento baseados em fusão sensorial . . . . .	6
2.2	Sistemas de determinação de orientação em veículos . . . . .	8
2.3	Sistemas de localização com comunicação Vehicle to Vehicle (V2V) e Vehicle to Infrastructure (V2I) . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Tecnologias de Suporte</b>	<b>13</b>
3.1	Sistemas de coordenadas . . . . .	13
3.2	Sistemas de posicionamento global . . . . .	14
3.2.1	Funcionamento do Global Positioning System (GPS) . . . . .	15
3.2.2	Fontes de erro . . . . .	18
3.3	Posicionamento absoluto . . . . .	19
3.3.1	Posicionamento por observação de código . . . . .	19
3.3.2	Posicionamento por desfasamento da portadora . . . . .	21
3.4	Posicionamento relativo . . . . .	22
3.4.1	Diferenciação simples . . . . .	23
3.4.2	Diferenciação dupla . . . . .	24
3.5	Determinação de orientação com múltiplas antenas . . . . .	25
3.5.1	Definição dos referenciais . . . . .	26
3.5.2	Método de estimação . . . . .	26
3.6	Comunicação entre veículos (V2V) . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Arquitetura e Implementação do Sistema</b>	<b>29</b>
4.1	Arquitetura do sistema . . . . .	29
4.1.1	Posicionamento relativo . . . . .	30

4.1.2	Processamento das observações . . . . .	30
4.1.3	Estimação da orientação . . . . .	33
4.2	Implementação . . . . .	34
4.2.1	Componentes do setup experimental . . . . .	34
4.2.2	Descrição dos módulos de software . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Testes e Resultados</b>	<b>39</b>
5.1	Sistema de comunicação V2V / V2I . . . . .	39
5.2	Estimação da orientação . . . . .	41
5.3	Posição absoluta . . . . .	45
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>48</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>50</b>
<b>A</b>	<b>Testes adicionais ao SLC</b>	<b>54</b>
A.1	Teste 1 . . . . .	54
A.1.1	Estimação dos ângulos da orientação . . . . .	54
A.1.2	Estimação da posição absoluta . . . . .	57
A.2	Teste 2 . . . . .	58
A.2.1	Estimação dos ângulos da orientação . . . . .	58
A.2.2	Estimação da posição absoluta . . . . .	60
<b>B</b>	<b>Descrição do Setup Experimental</b>	<b>61</b>
B.1	Receptores GPS . . . . .	61
B.2	Router Grand Cooperative Driving Challenge (GCDC) . . . . .	62
B.3	<i>Xsens MTi-G-700</i> . . . . .	63

# Lista de Figuras

1.1	Sistema de Localização Colaborativa . . . . .	2
1.2	Estrutura da Dissertação . . . . .	3
3.1	Sistema de coordenadas do veículo . . . . .	14
3.2	Sistemas de Coordenadas ECI e ECEF [1] [2] . . . . .	14
3.3	Segmentos do Sistema GPS. . . . .	15
3.4	Exemplo da diluição de precisão num plano. . . . .	16
3.5	Sinais do Sistema GPS. . . . .	17
3.6	Resolução de Ambiguidades ao longo de duas observações [3]. . . . .	17
3.7	Exemplo do efeito de <i>multipath</i> . . . . .	18
3.8	DGPS / RTK . . . . .	23
3.9	Diferenciação simples . . . . .	24
3.10	Modelo OSI do protocolo utilizado no GCDC [4] . . . . .	28
4.1	Arquitectura do Sistema de Localização Colaborativa . . . . .	30
4.2	Sistema Localização colaborativa (SLC) . . . . .	31
4.3	Sistema de Coordenadas ENU com $P_{vm}$ na origem . . . . .	31
4.4	<i>Baselines</i> nas diferentes diferenciações . . . . .	32
4.5	Módulo de processamento de observações . . . . .	33
4.6	Esquema do Setup Experimental . . . . .	35
4.7	Módulos de Software e protocolos de comunicação . . . . .	36
4.8	Módulos de Software e protocolos de comunicação . . . . .	36
4.9	Blocos principais da <i>toolbox</i> de estimação . . . . .	37
4.10	Exemplo de Observação RTKLIB .pos . . . . .	37
4.11	<i>Screenshots</i> da <i>toolbox</i> MATLAB desenvolvida . . . . .	38
5.1	Área de testes e local de instalação das Road Side Unit (RSU) . . . . .	39
5.2	Percurso de teste para o sistema de comunicação . . . . .	40
5.3	Resultados dos testes ao sistema de comunicação . . . . .	41
5.4	Percentagem de mensagem devolvidas . . . . .	41
5.5	Teste ao sistema de estimação da Orientação . . . . .	42
5.6	Média e Desvio Padrão da <i>baseline</i> estimada após verificação . . . . .	42
5.7	Resultados da estimação do ângulo <i>Yaw</i> e erro associado. . . . .	43
5.8	Resultados da estimação do ângulo <i>Pitch</i> e erro associado. . . . .	44
5.9	Resultados da estimação do ângulo <i>Roll</i> . . . . .	45
5.10	Instalação do <i>TOPCON HiperPro</i> . . . . .	45
5.11	Percurso de teste efectuado . . . . .	46

5.12	Resultados da altitude e Latitude em função da Longitude . . . .	46
5.13	Erro médio e desvio padrão associado ao percurso de teste . . . .	47
A.1	Ambiente de testes e <i>setup</i> experimental . . . . .	54
A.2	Primeiro percurso de teste . . . . .	55
A.3	Estimação do ângulo de <i>Yaw</i> e o erro associado . . . . .	55
A.4	Estimação do ângulo de <i>Pitch</i> e o erro associado . . . . .	56
A.5	Estimação do ângulo de <i>Roll</i> e o erro associado . . . . .	56
A.6	Erro de estimação de <i>Roll</i> em função da distância entre veículos .	56
A.7	Erros na estimação de posição: erro em Este, Norte e erro absoluto	57
A.8	Segundo percurso de teste . . . . .	58
A.9	Estimação do ângulo de <i>Yaw</i> e o erro associado, teste 2 . . . . .	59
A.10	Estimação do ângulo de <i>Pitch</i> e o erro associado, teste 2 . . . . .	59
A.11	Estimação do ângulo de <i>Roll</i> e o erro associado, teste 2 . . . . .	60
A.12	Erros na estimação de posição: erro em Este, Norte e erro absoluto	60
B.1	Esquema do Setup Experimental . . . . .	61
B.2	<i>Kit</i> de avaliação <i>ublox evk-6t</i> . . . . .	62
B.3	Sistema <i>TopCon HiperPro</i> . . . . .	62
B.4	Placa <i>ALIX 2D2</i> . . . . .	63
B.5	Sensor <i>Xsens MTi-G-700</i> . . . . .	64

# Lista de Tabelas

2.1	Literatura sobre sistemas de posicionamento relativo . . . . .	5
2.2	Literatura sobre sistemas baseados em GNSS . . . . .	6
2.3	Literatura sobre sistemas baseados em fusão sensorial . . . . .	9
2.4	Literatura sobre sistemas de determinação de orientação . . . . .	11
4.1	Características do receptor <i>LEA-6T</i> . . . . .	34
4.2	Características da estação 9 SERVIR . . . . .	35
5.1	Resultados do teste de Round Trip Time (RTT) . . . . .	40
5.2	Erros médios de Estimação dos ângulos Roll-Pitch-Yaw (R-P-Y) . . . . .	44
A.1	Erros médios de Estimação dos ângulos R-P-Y . . . . .	57
A.2	Erro médio e desvio padrão do processo de estimação de posição . . . . .	57
A.3	Erros médios de Estimação dos ângulos R-P-Y, teste 2 . . . . .	60
A.4	Erro médio e desvio padrão do processo de estimação de posição . . . . .	60
B.1	Características adicionais do receptor <i>LEA-6T</i> . . . . .	61
B.2	Características principais do sistema <i>TopCon HiperPro</i> . . . . .	62
B.3	Especificações principais da placa <i>ALIX 2D2</i> . . . . .	63
B.4	Especificações principais do sensor <i>Xsens MTi-700 GPS</i> . . . . .	64

# Lista de Acrónimos

<b>ABF</b>	Antenna Body Frame
<b>CALM-FAST</b>	Communications Access for Land Mobiles
<b>CAM</b>	Cooperative Awareness Message
<b>C/A</b>	Course / Aquisition
<b>DGPS</b>	Differential GPS
<b>DR</b>	Dead Reckoning
<b>DSRC</b>	Dedicated Short Range Communication
<b>ECEF</b>	Earth Centered Earth Fixed
<b>ECI</b>	Earth Centered Inertial
<b>EKF</b>	Extended Kalman Filter
<b>ENU</b>	East North Up
<b>GCDC</b>	Grand Cooperative Driving Challenge
<b>GDOP</b>	Geometric Dilution of Precision
<b>GLONASS</b>	GLObal NAVigation Satellite System
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IMM</b>	Interacting Multiple Model
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit
<b>INS</b>	Inertial Navigation System
<b>KF</b>	Kalman Filter
<b>LIDAR</b>	Light Detection And Ranging

<b>LLF</b>	Local Level coordinate Frame
<b>MEMS</b>	Microelectromechanical System
<b>P</b>	Precision
<b>PRN</b>	Pseudorandom noise
<b>RAIM</b>	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
<b>RHKF</b>	receding-horizon KF
<b>SLC</b>	Sistema de Localização Colaborativa
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indicator
<b>RSU</b>	Road Side Unit
<b>RTK</b>	Real Time Kinematic
<b>RTT</b>	Round Trip Time
<b>R-P-Y</b>	Roll-Pitch-Yaw
<b>SPKF</b>	sigma-point KF
<b>SPRHKF</b>	sigma-point-based receding-HKF
<b>UKF</b>	Unscented Kalman Filter
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>V2V</b>	Vehicle to Vehicle
<b>V2I</b>	Vehicle to Infrastructure
<b>VRS</b>	Virtual Reference Station
<b>WAVE</b>	Wireless Access in Vehicular Environments
<b>WGS</b>	World Geodetic System

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

A proliferação de veículos, apesar de ser um sinal de melhoria das condições de vida das populações, constitui também a fonte de diversos problemas: qualidade do ar degradada em grandes áreas urbanas, congestão de tráfego (com os prejuízos financeiros associados [5]) ou aumento do risco de colisões (custos financeiros e humanos associados). Para lidar com os inconvenientes das estruturas de tráfego tradicionais e tornar os sistemas de transporte mais eficientes, diversas tecnologias têm sido desenvolvidas ao longo dos últimos anos. As redes de transporte inteligentes (ITS - *Intelligent Transportation Systems*) definem um grupo de sistemas aplicado a todos os agentes da rede de transporte (veículos, infra-estruturas e utilizadores) nos quais há troca de informação com o objectivo de promover um eficiente uso da rede de transporte. Quer em veículos convencionais com sistemas de apoio ao condutor (ADAS - *Advanced Driver Assistance Systems*), ou em redes de sistemas de transporte inteligentes, a capacidade dos veículos conseguirem estimar a sua localização com nível de incerteza baixo é fulcral para uma navegação eficiente. Para o processo de navegação autónomo é essencial o cálculo da posição e orientação de forma a, por exemplo, fazer planeamento de trajetórias e mapear o ambiente. Nas redes de transporte inteligentes, sem bons sistemas de localização é impossível fornecer informação de padrões tráfego, aviso de colisões ou congestionamentos.

A resolução do problema da localização está longe de ser trivial, muito devido ao fato dos veículos operarem em ambientes complexos e diversos. Um bom sistema de localização deve conseguir devolver resultados de posição e orientação em condições climáticas adversas e em cenários que podem variar entre meios urbanos e rurais, designadamente em áreas cobertas de vegetação alta. Nos últimos anos, têm sido propostos diversos métodos e técnicas de localização. Uma abordagem típica consiste em combinar informação de vários sensores de forma a aproveitar a redundância e complementaridade entre eles, tendo como objectivo aumentar o desempenho global do sistema [6] [7] [8]. Sistemas de alto desempenho deste tipo, são geralmente bastante dispendiosos devido ao custo inerente dos sensores de alta precisão. Este facto, motiva ao desenvolvimento de

sistemas de estimação de orientação e posição de baixo custo, tal como o sistema proposto nesta dissertação, que usa, para a referida estimação, a rede GNSS e a troca de informação entre veículos.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento e teste de um sistema de localização (posição e orientação) baseado em GNSS com configurações multi-antena, técnicas de posicionamento "Real Time Kinematic (RTK)" e comunicações V2V. É importante referir que já existem no mercado muitas soluções de localização de alto desempenho (envolvendo instrumentação dispendiosa e geralmente volumosa) [9]. O desafio que se coloca é desenvolver um sistema de localização de custo acessível sem com isso debilitar consideravelmente o seu desempenho. Pretende-se que o sistema de localização tenha uma arquitetura modular de forma a que seja facilmente adaptável a diferentes receptores, e que o processo de comunicação entre os diferentes módulos seja o mais padronizado possível.

## 1.3 Trabalho realizado e contribuições

De acordo com os objetivos propostos para este trabalho, foi desenvolvido o Sistema de Localização Colaborativa (SLC). A figura 1.1 ilustra a interação entre os veículos, a estação de referência utilizada para a estimação de posição e as unidades de estrada (RSU), que fornecem informação para o processo de estimação de orientação. A figura mostra também de forma superficial o fluxo de informação entre os componentes até à solução de localização.

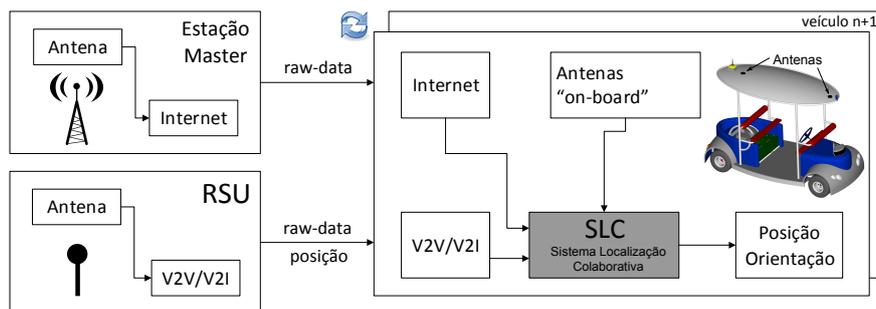


Figura 1.1: Sistema de Localização Colaborativa

O processo de desenvolvimento do SLC consistiu na implementação do interface com os dispositivos periféricos (receptores e módulo de comunicação V2V, sincronização das observações, método de verificação das observações por *baseline* e finalmente na implementação do método de estimação de posição e orientação.

## 1.4 Estrutura da dissertação

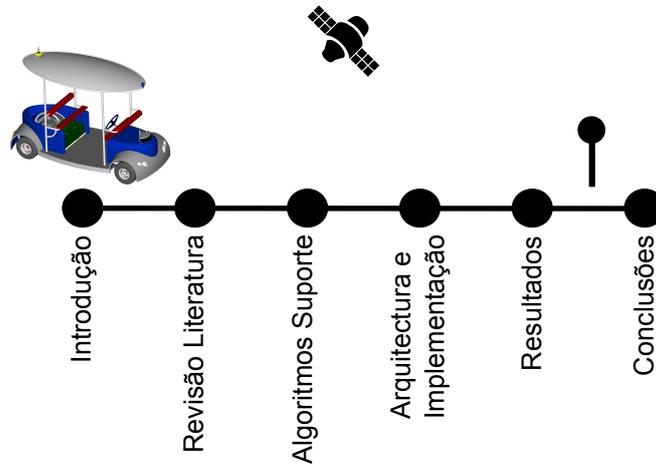


Figura 1.2: Estrutura da Dissertação

O capítulo 2 engloba uma revisão da literatura sobre sistemas de estimação de posição, de estimação de orientação e sistemas com comunicação entre veículos. O capítulo 3 aborda os algoritmos que suportam grande parte do trabalho desenvolvido: métodos de localização absoluta, relativa e de estimação de orientação.

A arquitetura do sistema é apresentada no capítulo 4 a qual inclui, os processos de posicionamento relativo, o método de validação das observações por *baseline* desenvolvido e o processo de estimação de posição e orientação. Debate também os aspectos de implementação e o *setup* experimental utilizado. Por fim apresentam-se os resultados obtidos, no capítulo 5, e conclui-se a dissertação no capítulo 6 com as conclusões e sugestões de trabalho futuro.

# Capítulo 2

## Revisão da Literatura

Neste capítulo são abordados diferentes sensores, algoritmos de fusão sensorial e sistemas de localização no contexto de veículos inteligentes / autônomos. O capítulo compreende as seguintes seções: os sistemas de estimação de posição, sistemas de estimação de orientação e finalmente sistemas de comunicação V2V. Para cada uma destas seções, foram selecionados os artigos considerados mais relevantes e agrupados em tabela de forma a facilitar a leitura.

### 2.1 Sistemas de estimação de posição

Os sistemas de estimação de posição ou posicionamento podem ser divididos em dois grupos: Sistemas de posicionamento relativo (*Dead Reckoning (DR)*) em que a posição atual é calculada com base na anterior e sistemas de localização absolutos, em que o posicionamento é conseguido através de triangulação ou trilateração com certos artefatos de posição conhecida existentes no ambiente.

#### 2.1.1 Sistemas de posicionamento relativo

Sistemas de posicionamento relativo estimam a posição atual integrando informação de movimento relativo (proveniente de sensores) com um estado anterior conhecido. Estes sensores podem ser caracterizados como proprioceptivos, que conseguem medir um certo estado interno (*Inertial Measurement Unit (IMU)* ou odometria) ou exteroceptivos que observam o ambiente envolvente (sensores magnéticos, câmeras ou laser). Uma consequência direta de integração de movimento é que os erros de localização terão um comportamento gradualmente cumulativo, podendo atingir valores de erro que impossibilitem o sistema de localização de ter um desempenho aceitável.

Vários métodos de localização relativa utilizando odometria e IMUs foram propostos nos últimos anos: Barshan *et al* [10] modelaram os desvios e erros do IMU e Dissanayake *et al* [11] utilizaram as restrições que governam a cinemática do veículo e informação odométrica para limitar os erros de integração, melhorando o desempenho do sistema.

Partindo do princípio que as restrições apresentadas em [11] são frequentemente violadas (principalmente quando o veículo faz curvas apertadas), Lui *et al* [6] propuseram um sistema em que a velocidade do veículo é estimada através de um sistema multi-sensorial, sendo posteriormente fundida com a informação do sensor inercial. Com este método Lui *et al* conseguiram uma melhoria significativa no desempenho do sistema, obtendo um erro 30 vezes inferior quando comparado com um sistema inercial isolado.

Carlson *et al* [12] apresentaram um estudo que compara fontes de erro em veículos empregando DR com odometria diferencial e giroscópio como sistema de localização. Os resultados mostram que o principal fator limitador de desempenho no sistema de DR é devido a irregularidades no terreno. Quando a navegação ocorre em terreno estruturado (os testes foram efetuados num parque de estacionamento), tanto o sistema com odometria como com giroscópio têm desempenhos semelhantes [12]. A tabela 2.1 sumariza a literatura considerada mais relevante neste tópico.

Artigo	Descrição	Resultados e contribuições
Dissanayake et al [11]	Incorpora as restrições de movimento do veículo e informação odométrica de forma a limitar erros de integração.	Os erros de integração foram fortemente restringidos.
Lui et al [6]	Estimação da velocidade lateral através dum sistema multi-sensorial de forma a auxiliar o IMU.	Melhoria muito significativa de desempenho quando comparado com um sistema IMU isolado.
Carlson et al [12]	Estudo Comparativo entre fontes de erro em sistemas DR (odometria diferencial e giroscópio).	É demonstrado que as irregularidades no terreno são a principal fonte de erro destes sistemas.

Tabela 2.1: Literatura sobre sistemas de posicionamento relativo

## 2.1.2 Sistemas de posicionamento baseado em GNSS

Os sistemas de posicionamento absoluto pressupõem a existência de certos artefatos no ambiente, com posições completamente exatas e conhecidas. Estes artefatos ou *beacons* podem ser ativos e transmitir informação para um receptor no veículo ou passivos, geralmente refletindo sinais enviados pelo veículo. O posicionamento é então possível quando há pelo menos três artefatos com posições conhecidas, fazendo medições de ângulos (triangulação) ou medindo as diversas distâncias (trilateração). GNSSs são a mais popular escolha para sistemas de localização em ambientes *outdoor*. O Posicionamento é baseado no cálculo da distância entre o satélite e o receptor, de acordo com o tempo de chegada do sinal. Este sistema será discutido em detalhe no próximo capítulo.

Como o erro de posicionamento dum sistema GNSS é um processo estocástico imprevisível (não segue uma distribuição de probabilidade Gaussiana [13]) e por-

tanto o tradicional Kalman Filter (KF) tem problemas de desempenho, Delmas *et al.* [14] apresentaram um método que melhora a precisão do processo de localização baseado em KF. Consiste na modelação e posterior remoção dos efeitos das características típicas do erro dos sistemas GNSS. Estabelecendo um modelo de predição do *drift* na GNSS através dum modelo auto-regressivo, inserindo-o posteriormente no algoritmo do sistema de localização (KF), foi possível diminuir o erro em latitude e longitude.

De forma a aumentar o desempenho dos sistemas de localização por GNSS Petit *et al.* [15] apresentaram uma antena baseada em *Microelectromechanical System (MEMS)* reconfigurável e controlada de forma a que a qualidade do sinal recebido seja otimizado.

Truong *et al.* [16] exploraram as vantagens de combinar vários sistemas GNSS recentemente disponíveis (além do GPS, o russo *GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM (GLONASS)* está disponível desde 2011 e futuramente o europeu Galileo, 2020). Foi verificado que utilizando um sistema multi-GNSS há uma melhoria clara no *Geometric Dilution of Precision (GDOP)* e na solução de posicionamento quando comparado com testes *standalone* dos diferentes sistemas GNSS. A tabela seguinte (2.2) sumariza os artigos e resultados considerados mais relevantes nesta secção.

Artigo	Descrição	Resultados e contribuições
Delmas <i>et al.</i> [14]	Introdução de um modelo auto-regressivo para modelação e remoção de <i>drifts</i> nas GNSS	Diminuição de erros em latitude e longitude quando o modelo é introduzido num KF de estimação de posição.
Truong <i>et al.</i> [16]	Combinação dos diversos sistemas GNSS disponíveis.	Melhoria clara no desempenho do posicionamento e redução do GDOP.

Tabela 2.2: Literatura sobre sistemas baseados em GNSS

### 2.1.3 Sistemas de posicionamento baseados em fusão sensorial

Tanto os sistemas de localização relativa como absoluta recorrendo a GNSS têm vantagens e limitações. De forma superficial, métodos relativos tem alta precisão em espaços de tempo curtos e são capazes de períodos de amostragem curtos mas estão sujeitos a erros cumulativos. Já os sistemas de GNSS estão sujeitos a erros de *multi-path*, número limitado de satélites ou até ter o serviço completamente indisponível, caso de túneis [6]. Uma solução híbrida, integrando a abordagem relativa e a absoluta beneficia das vantagens dum sistema DR e consegue limitar os erros cumulativos através da GNSS. Nos sistemas de localização híbridos o vetor de estado do veículo é estimado através de sensores proprioceptivos e exteroceptivos. Uma forma muito popular de resolver o problema de fusão sensorial é a utilização de um KF, muito porque o filtro tem a capacidade de devolver o erro de estimação, e devolver estimações ótimas quando o sistema é linear [7].

Com um sistema GPS/IMU de baixo custo, Davidson *et al* [17] conseguiram mostrar que sensores inerciais de baixo custo conseguem melhorar significativamente o desempenho dum sistema GPS em ambientes urbanos na presença de elevados erros por *multi-path*, além de permitir estabelecer a orientação do veículo quando este está parado. A informação proveniente do GPS e do IMU é fundida num Extended Kalman Filter (EKF) e a informação do GPS é utilizada para calibrar o sensor inercial sempre que o veículo está parado (há um módulo no sistema que deteta com bastante rapidez que o veículo está parado e dá início ao processo de calibração do IMU). Dados experimentais provam a robustez do sistema, mesmo quando há perdas de serviço GPS durante vários segundos.

Um problema típico num sistema de localização GPS+IMU é como lidar com a velocidade inicial do veículo: quando há um erro de posição devido a uma velocidade inicial errada, este erro vai crescer com o tempo. Uenoyama *et al* [17] propuseram um sistema que implementa um observador para estimar a velocidade inicial do veículo e que cancela este erro na estimação da posição. Apesar de não apresentar resultados experimentais, as simulações mostram que o método é eficaz a reduzir o erro de velocidade inicial.

De forma a melhorar e tornar mais exato o sistema de localização durante falhas de serviço do GPS, Gao *et al* [18] apresentaram três esquemas de integração com os seguintes sensores: GPS/Inertial Navigation System (INS)/ sensor de velocidade das rodas, GPS/INS/ sensor de orientação (*Yaw*) e finalmente um esquema com todos os sensores. A arquitetura do sistema é centralizada (altamente acoplada), a cada época todas as medições disponíveis são utilizadas para obter uma solução global otimizada através de um KF central. No processo de integração são tidas em conta as restrições não holonómicas do veículo limitando assim escorregamentos de posição. Os resultados mostram que, durante quebras de serviço de GPS, adicionando um sensor de velocidade das rodas do veículo é possível reduzir até cinco vezes o erro de posição quando comparado com o sistema só com sensor inercial. Adicionando o sensor de orientação, não foram notadas melhorias significativas no desempenho do sistema, isto porque, como a exatidão das medidas é mais baixo, o KF dá menos peso às medidas do sensor no processo de fusão, tornando o seu impacto na estimação final mais baixo que o sensor de velocidade das rodas. Quando o GPS está disponível, tende a dominar os pesos do filtro, tornando qualquer esquema de integração praticamente equivalente. Outro aspecto importante é a relação entre o tempo de solução das ambiguidades inteiras após uma falha de serviço e o desvio estimado: Como a adição de sensores de velocidade nas rodas reduz significativamente o desvio estimado, torna o espaço de pesquisa das ambiguidades mais pequeno, conseguindo-se uma redução considerável no tempo de resolução. Esta redução é inversamente proporcional ao tempo em que o sinal de GPS esteve indisponível [18]. O desempenho dos sistemas de localização baseados em fusão sensorial está ligada à qualidade do modelo do processo a observar. Com isto pode-se dizer que um modelo do veículo deve ter em conta todo um número de parâmetros que afetam o movimento do mesmo. Geralmente, modelos dinâmicos complexos têm um domínio de validade muito específico e a sua complexidade computacional

aumenta quando um número grande de parâmetros é considerado. A confiança no algoritmo final, dependendo da situação de condução, pode ser seriamente degradada. O problema, é como se pode proteger o sistema, mantendo-o robusto, quando o processo não está devidamente modelado.

Ndjeng *et al* [19] apresentaram um sistema que emprega múltiplos modelos (Interacting Multiple Model (IMM)). Estes modelos são baseados na discretização da evolução do veículo no espaço para manobras simples e no pressuposto que o veículo só executa essas manobras. A cada manobra ou modo considerado, corresponde um modelo (uma representação matemática ou descrição do fenómeno com um certo grau de precisão). Uma das vantagens é ter um banco de KF em paralelo correspondentes a um modo particular. Para trocar de modos, o IMM usa uma combinação dos estados estimados e das matrizes de covariância de acordo com um modelo de Markov. Este sistema foi comparado com um EKF singular em situações de dinâmica longitudinal e lateral, sendo que o desempenho foi avaliado com base em informação sensorial proveniente de um INS, GPS, odometria e giroscópio. Este método mostra melhorias significativas na redução do erro de localização em veículos em situação de manobra, p.e. curvar.

O mais popular algoritmo de fusão, KF, ou na sua versão extendida para sistemas não lineares EKF tem limitações, que podem levar ao desempenho degradado ou em casos extremos, à não convergência do filtro. Nos últimos anos várias abordagens diferentes têm sido apresentadas, como o sigma-point KF (SPKF) e o receding-horizon KF (RHKF). Se o erro na estimativa inicial num EKF for alta, o filtro pode divergir, no entanto o SPKF não diverge, tornando-o robusto contra um erro de estimativa inicial muito elevado. Quando o sistema tem um erro não modelado ou um escorregamento temporário, o EKF está sob a influência total destes erros. Para reduzir o efeito deste tipo de erros foi proposto o RHKF [19]. Cho *et Choi* [19] apresentaram um novo filtro, sigma-point-based receding-HKF (SPRHKF) que procura agregar as vantagens do SPKF e do RHKF. Os resultados obtidos mostram que esta nova abordagem tem vantagens em relação ao tradicional EKF: é mais robusto a várias fontes de erro, como incertezas no modelo ou desvios nos sensores, é mais robusto a erros na estimativa inicial e finalmente tem melhor desempenho computacional em relação ao RHKF. É portanto uma solução perfeitamente viável para a implementação de sistemas de baixo custo GPS/INS. A tabela 2.3 resume as contribuições mais relevantes sobre os sistemas baseados em fusão sensorial.

## 2.2 Sistemas de determinação de orientação em veículos

Por vezes, ter conhecimento da posição de certo veículo pode não ser informação suficiente para tomar decisões de navegação no caso de veículos autónomos, ou transmitir alertas nas redes de transporte inteligentes (alertas de colisão, mudança de faixa, alerta de despiste, etc). É importante portanto que o sistema de localização, além de conseguir fornecer uma estimativa exata da localização do

Artigo	Descrição	Resultados e contribuições
Davidson et al [20]	Implementação de um sistema GPS/IMU com calibração do IMU sempre que o veículo se encontra parado.	Mesmo em situação de perdas de sinal, o IMU frequentemente calibrado fornece robustez ao sistema.
Gao et al [18]	Comparação de três esquemas de integração com GPS, IMU sensor de orientação e de velocidade nas rodas.	É mostrado que quando o GPS está disponível, qualquer sistema de integração é equivalente.
Cho et Choi [19]	Introdução de um novo filtro para fusão, SPRHKF.	Mais robusto que o tradicional EKF a diversas fontes de erro.

Tabela 2.3: Literatura sobre sistemas baseados em fusão sensorial

veículo no espaço, seja também capaz de estimar qual a orientação do veículo. A orientação é estimada de acordo com os ângulos de rotação que o referencial do veículo faz com um referencial de referência. As rotações nos eixos seguem a típica convenção R-P-Y sendo *Roll* uma rotação efetuada segundo o eixo X, *Pitch* uma rotação em torno do eixo Y e *Yaw*, uma rotação segundo Z. Esta última rotação fornece a direção para a qual o veículo está apontado. Existem na literatura uma variedade de métodos para a estimação de orientação, recorrendo a diversas abordagens e unidades sensoriais diferentes. Associado a cada tipo de sensor há uma limitação a ter em conta, giroscópios sofrem de erros cumulativos, acelerómetros são afetados por ruídos vibratórios e acelerações do veículo, magnetómetros são bastante utilizados para estimar direção (*Yaw*) mas estão bastante sujeitos a perturbações magnéticas do ambiente e o GPS tem os conhecidos problemas de taxas de amostragem baixas e bloqueios de sinal [21].

Britt *et al* [22], apresentaram um método de estimação de orientação baseado em Light Detection And Ranging (LIDAR) e um algoritmo de aprendizagem automática (*machine-learning*) que relaciona as medidas da superfície da via com os ângulos de *Pitch* e *Roll* do veículo através dum método de regressão Gaussiana. Esta regressão permite que uma relação não linear seja aprendida através dos dados recolhidos com uma precisão apenas dependente da quantidade de dados extraída. Em contrapartida o método requer uma calibração (fase de treino) que precisa de um grande número de amostras em condições apropriadas de forma a fornecer estimativas exatas. Os resultados mostram que o método é eficiente, sendo capaz de lidar com dinâmicas rápidas e lentas do veículo.

Gu *et El-Sheimy* [23] propôs um método que melhora o desempenho dos sistemas de estimação de direção baseados em Differential GPS (DGPS) e IMU. Apesar dos sistemas DGPS conseguirem exatidões de centímetros, quando as variações de orientação e velocidade são baixas a direção não é observável a partir de informação do DGPS. O método proposto estima a direção do veículo através da variação da posição em intervalos de tempo curtos. Quando o veículo não se está a mover em linha recta, a posição estimada através do DGPS apresenta um erro elevado, o que impossibilita o uso deste método por si só. Para limitar este

problema, Gu *et al* El-Sheimy fazem uso de um KF sequencial que possibilita que a informação proveniente do DGPS seja utilizada no filtro mesmo que as estimações de direção não sejam usáveis devido aos desvios elevados. Os resultados validam o método proposto, o sistema de estimação de direção tem um melhor desempenho e consegue lidar com a ocorrência de curvas na via.

Quando se instala um sistema de estimação de orientação num veículo, deve-se garantir que os ângulos e orientação do sensor inercial sejam os mesmos que os do referencial do veículo. Por outras palavras, o sensor deve ficar perfeitamente alinhado com o referencial do veículo. Conseguir este alinhamento (ou pelo menos com um *offset* baixo) é muitas vezes difícil e requer alguma competência especializada por parte do técnico. Maeder *et al* Morati [24] desenvolveu um método de estimação de orientação que utiliza uma configuração GPS/IMU. O método utiliza um EKF não linear que combina estimação de estados e identificação de parâmetros. Comparado com os métodos existentes este método não requer conhecimento do ângulo da estrada e compensa automaticamente os desvios dos ângulos de instalação.

Todas as abordagens de estimação anteriores eram baseadas em configurações GNSS de apenas um receptor (ou uma antena) com algum tipo de fusão sensorial com outros sensores, nomeadamente IMUs. Wu *et al* [21] propuseram um método de baixo custo de estimação de orientação tendo como base sensorial um IMU e dois receptores GPS. Como as acelerações do veículo são a principal causa de perturbação nos ângulos de *pitch* and *roll* e o sistema de receptores GPS é susceptível de falhas de sinal, o método utiliza fusão sensorial de forma a agrupar toda a informação dos sensores.

Quando o sistema de duas antenas GPS consegue fornecer o ângulo de *Yaw*, as acelerações do veículo são corrigidas com a informação do GPS e do ângulo de escorregamento lateral, quando tal não ocorre, o *Yaw* é determinado pelo giroscópio e os ângulos de *Roll* e *Pitch* são estimados pelo *Unscented Kalman Filter (UKF)* adaptativo. O esquema adaptativo é baseado nas restrições de aceleração do veículo e estão associadas à velocidade angular e previsões de aceleração. Resultados dos testes efetuados mostram que quando o sistema GPS está a funcionar são possíveis erros de estimação menores que um grau, que tendem a aumentar quando há longos bloqueios de sinal. Mostram também que o algoritmo de fusão consegue lidar com os erros cumulativos causados pelo giroscópio e com as perturbações do acelerómetro durante períodos de falha de recepção de sinal de GPS.

Se o sistema de estimação de orientação é baseado em receptores GNSS, a qualidade da estimação depende bastante da qualidade do sinal recebido. Wang *et al* [25] introduziram o método *Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM)*, que permite inspecionar e distinguir um sinal com falhas quando há sinais de cinco satélites capturados no mesmo instante de tempo. Depois de detectar a falha é preciso encontrar o satélite responsável e eliminá-lo (eliminar a informação proveniente desse satélite) conseguindo assim uma estimação melhorada. A influência do ambiente, especialmente *multi-path* tem um grande impacto no desempenho dos métodos de resolução de ambiguidades, Wang *et al*

introduziram um método de ajuste de ambiguidades a cada época de forma a resolver este problema. Os resultados mostram que o método otimizado com *RAIM* é menos propício a influências do ambiente.

Hsu *et Chan* [26] propuseram um sistema composto por três receptores GPS, um IMU e quatro sensores de excursão de suspensão, de forma a obter a orientação do veículo de forma exata e também estimar os ângulos da estrada em tempo real. Como o ângulo da estrada influencia o comportamento dinâmico do veículo, é de todo o interesse conseguir ter uma estimativa desse ângulo para sistemas de previsão de capotagem ou estabilizadores por exemplo.

Uma das desvantagens dos sensores inerciais é que os ângulos da estrada vêm acoplados com os ângulos do veículo, para evitar esta situação foram utilizados sensores de curso na suspensão em sinergia com o GPS (sistema de três receptores e IMU). São utilizados três eixos de coordenadas (global, estrada e veículo) para descrever a dinâmica do veículo, assim a orientação do veículo em relação à estrada e os ângulos da estrada podem ser bem representados. A estimação da orientação do veículo e dos ângulos da estrada é feita através dum modelo cinemático e dum EKF. O sistema de três receptores fornece informação acerca da orientação absoluta do veículo, os sensores na suspensão fornecem a orientação relativamente à estrada e o IMU essencialmente melhora a exatidão do sistema. Resultados de simulação mostram que o sistema consegue exatidões menores que um grau tanto na estimação de orientação do veículo como na estimação do ângulo da estrada e uma melhoria de dez vezes na estimação vertical do veículo. A tabela 2.4 resume os artigos considerados mais relevante sobre este tópico.

Artigo	Descrição	Resultados e contribuições
Maeder et Morati [24]	Sistema com configuração GPS/IMU com um EKF que combina estimação de estados e identificação de parâmetros.	Este método não requer conhecimento do ângulo da estrada e compensa <i>offsets</i> de instalação.
Gu et El-Sheimy [23]	Estimação a direção através da observação da posição GNSS em períodos de tempo curtos e aumenta a robustez do sistema com dados do IMU	A fusão de dados proposta aumenta o desempenho do sistema de estimação, principalmente em fase de curvas no trajeto.
Wu et al [21]	Sistema de estimação de orientação baseado em dois receptores, IMU e num UKF.	O sistema é capaz de manter o desempenho durante períodos de ausência de sinal GPS e lidar com os erros cumulativos dos sensores relativos.

Tabela 2.4: Literatura sobre sistemas de determinação de orientação

## 2.3 Sistemas de localização com comunicação V2V e V2I

As redes veiculares são uma das mais importantes tecnologias de suporte para implementar um grande conjunto de aplicações relacionadas com veículos. Entre elas podemos destacar avisos de colisão, assistência na mudança de faixa de rodagem, aviso de ultrapassagem, travagem colaborativa (a fim de evitar choques em cadeia), aviso de entrada em contra-mão ou avisos de congestão de tráfego [27]. Na área dos veículos autónomos, redes veiculares são uma ferramenta utilizada para navegação cooperativa.

Fazendo uso do sistema de comunicação Dedicated Short Range Communication (DSRC), que foi desenvolvido com o objectivo de suportar comunicação V2V e V2I com alta velocidade e baixa latência através das normas Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.11p ou Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE), Parker *et al* [28] propuseram um método de localização de veículos em redes veiculares que estima as distâncias entre veículos vizinhos. Argumentam também, que devido às limitações típicas dos sistemas de posicionamento global GNSS, as técnicas de determinação de distâncias baseadas em rádio (como o Received Signal Strength Indicator (RSSI)) podem ser fundidas de forma a melhorar o desempenho do sistemas de posicionamento.

As técnicas de estimação de distância por RSSI têm algumas desvantagens, como ruído devido ao *multipath* ou perda de linha de vista. Além disto, o movimento dos carros complica a forma como se pode lidar com o ruído, que pode ser interpretado como movimento do veículo. De forma simplificada o método proposto funciona da seguinte forma: Cada nó estima as distâncias para os nós vizinhos utilizando uma técnica baseado em RSSI, depois essa informação é partilhada com os vizinhos mais próximos (*um hop*). Finalmente cada nó utiliza a informação disponível para criar um mapa da posição relativa dos seus vizinhos. As simulações apresentadas mostram que esta técnica, em conjunto com GPS consegue estimar com bom desempenho a localização dos veículos na rede veicular.

Lin *et al* [29] apresentaram um estudo de comparação entre a norma IEEE 802.11a (amplamente utilizada em comunicações sem fios em casas, escritórios e muitos locais públicos nas redes *Wi-Fi*) e a IEEE 802.11p (também denominada WAVE), uma versão modificada da 802.11a de forma a tornar a comunicação mais robusta contra o decaimento de potência do sinal e aumentar a tolerância a propagação *multipath*. Os resultados dos testes efetuados demonstram que a duração do contacto entre um veículo e uma infraestrutura é mais longo utilizando a norma WAVE e a perda de pacotes é também inferior o que demonstra o aumento de desempenho relativamente à tradicional 802.11a.

# Capítulo 3

## Tecnologias de Suporte

Neste capítulo serão abordadas as tecnologias que suportam o trabalho desenvolvido, nomeadamente uma descrição dos sistemas de coordenadas utilizadas ao longo do trabalho, uma descrição relativamente aprofundada do sistema de posicionamento global GPS (o seu funcionamento e fontes de erro) e posteriormente serão apresentados os métodos de posicionamento e determinação de orientação que suportam o sistema desenvolvido. Por fim, é feita uma breve descrição do sistema de comunicação V2V.

### 3.1 Sistemas de coordenadas

Qualquer discussão sobre localização ou posicionamento não faz sentido sem, de forma prévia, fazer uma introdução sobre os referenciais ou os sistemas de coordenadas que irão ser utilizados. Nesta secção serão introduzidos o sistema de coordenadas do veículo, o sistema de coordenadas Earth Centered Inertial (ECI), o Earth Centered Earth Fixed (ECEF) e finalmente o geográfico East North Up (ENU).

O sistema de coordenadas do veículo tem idealmente a sua origem no centro de massa do mesmo. No caso de veículos terrestres (caso aqui abordado), geralmente o eixo  $y$  ou eixo *Pitch* aponta para a esquerda do veículo enquanto que o eixo  $z$  ou eixo *Yaw* aponta para cima, o eixo  $x$  ou *Roll* aponta para a frente do veículo como ilustrado na figura 3.1.

O sistema ECI é o mais utilizado em navegação terrestre, geralmente os sistemas inerciais (IMU) devolvem as observações de velocidades e acelerações angulares neste sistema. Tem como origem o centro de gravidade terrestre (é um sistema de coordenadas geocêntrico), com o eixo  $z$  alinhado com o eixo de rotação, o eixo  $x$  alinhado com o equinócio vernal (também denominado Ponto Áries, ponto da esfera celeste onde o Sol cruza o equador) e o eixo  $y$  completa o sistema, de acordo com a regra da mão direita. De notar que este sistema não é complacente com a rotação terrestre, ao contrário do sistema ECEF discutido de seguida.

O sistema ECEF, tal como o ECI, é geocêntrico (tem a sua origem no centro gravítico terrestre) com o seu eixo  $z$  a apontar para Norte (embora não coincida

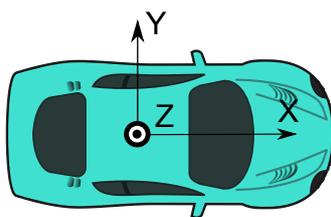


Figura 3.1: Sistema de coordenadas do veículo

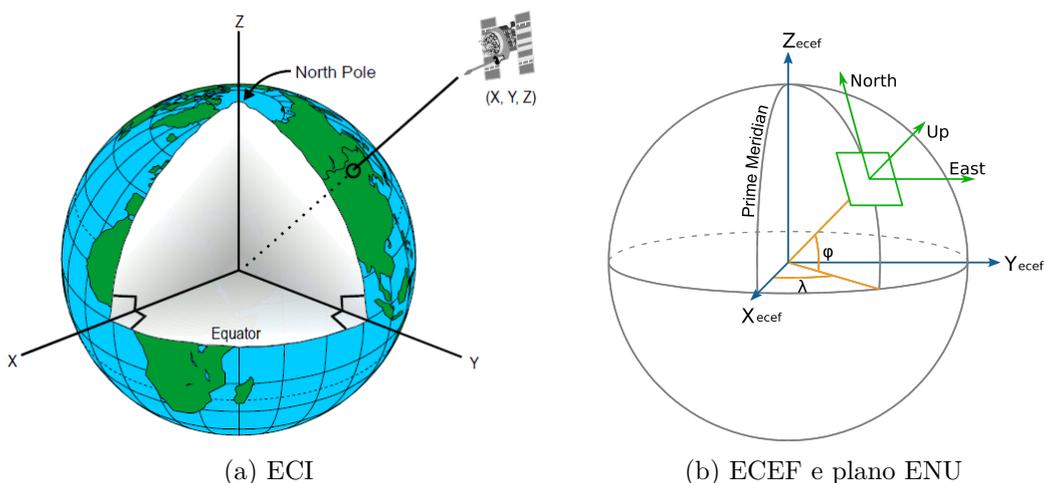


Figura 3.2: Sistemas de Coordenadas ECI e ECEF [1] [2]

exatamente com o eixo rotacional terrestre), o eixo  $x$  é complacente com a rotação terrestre e coincide com o ponto de intercepção do primeiro meridiano e o equador (longitude e latitude zero) com o eixo  $y$  a completar o referencial de acordo com a regra da mão direita.

Um sistema fortemente relacionado com o ECEF é o sistema de coordenadas geodético definido pelo World Geodetic System (WGS) em 1984 (WGS84), também denominado sistema ECEF geodético. É baseado na aproximação do geóide terrestre por um elipsoide que roda em torno do seu eixo menor. A posição é caracterizada em termos de ângulos de longitude e latitude medidos em relação ao elipsoide de referência [30].

Apesar dos sistemas de coordenadas globais como o ECEF ou ECI serem mais que suficientes para uma correta descrição posicional de qualquer corpo na esfera terrestre, os sistemas locais como o ENU são mais intuitivos e práticos. O sistema ENU é formado por um plano tangente à superfície terrestre numa posição específica com o eixo  $x$  a apontar para Este, o eixo  $y$  para Norte e finalmente  $z$  para cima, como indicado na figura 3.2.

## 3.2 Sistemas de posicionamento global

Os sistemas de posicionamento global começaram como aplicações militares que tiveram início nos anos 70 nos Estados Unidos. O GPS está completamente

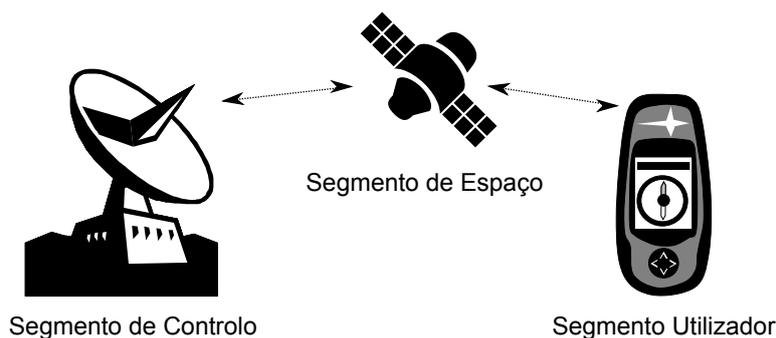


Figura 3.3: Segmentos do Sistema GPS.

funcional desde 1978 e disponível para uso civil desde 1985. Hoje em dia o sistema da Rússia (GLONASS) está totalmente operacional enquanto que o europeu Galileo é esperado para 2020.

Nesta secção será abordada a forma de funcionamento dos sistemas de posicionamento global GNSS e as fontes de erro a que estão sujeitos. O enfoque será o sistema GPS sem perda significativa de generalidade para os outros sistemas.

### 3.2.1 Funcionamento do GPS

O GPS é composto por três partes ou segmentos (figura 3.3): o segmento de espaço, o de controlo e o segmento do utilizador. O segmento de espaço é constituído por 32 satélites com alimentação solar, que orbitam em 6 planos orbitais a cerca de 20000Km de altitude com um desfasamento aproximado de 55 graus com o plano equatorial. Este arranjo garante uma visibilidade de pelo menos 4 satélites em qualquer ponto terrestre, com condições climatéricas adequadas.

O segmento de controlo é constituído por diversas estações de monitorização espalhadas pelo mundo e uma estação central, localizada em *Colorado Springs*. Têm como objectivo a constante monitorização dos satélites, as suas transmissões, estimar a sua posição (ephemerides), calibrar os relógios atómicos e fazer uma atualização da informação de navegação transmitida pelos satélites.

Por fim, o segmento de utilizador compreende todos os receptores utilizados para fazer aquisição de sinal proveniente dos satélites. A utilização de sistemas GPS tem crescido ao longo dos últimos 30 anos mas foi principalmente na última década, em que os receptores se tornaram baratos e de dimensões reduzidas, chegando ao mercado de consumo a preços inferiores a 100€, que os dispositivos com aplicações GPS se massificaram. Hoje em dia é comum que smartphones, tablets ou netbooks venham equipados com um receptor com exatidão razoável (metros).

De forma simplificada, o método de posicionamento por GPS é baseado na estimação da distância entre o receptor (*rover*) e os satélites (denominada *pseudorange*) através do tempo de propagação do sinal. Por sua vez, o tempo de propagação do sinal é obtido através da correlação do sinal recebido com uma cópia gerada pelo receptor. Sabendo a distância entre vários satélites e o *rover*

e a posição desses satélites (*ephemerides*) é possível determinar a posição do receptor por trilateração.

É claro que a posição relativa dos satélites, ou de outra forma, a sua geometria espacial tem influência na qualidade de estimação da posição do receptor. Como a estimação da distância receptor - satélites é afetada de erro (tem uma margem de incerteza), se os satélites estiverem espacialmente próximos esta margem de erro afeta o processo de trilateração. Este efeito é quantificável e denominado GDOP, a figura 3.4 ilustra no plano a influência que a incerteza na pseudorange e a geometria dos satélites tem na estimação da posição do receptor, quando os satélites estão afastados (primeiro caso) a incerteza na posição é bastante menor do que quando os satélites estão mais próximos.

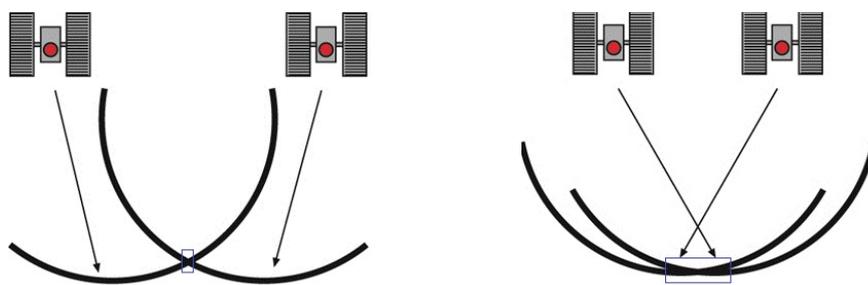


Figura 3.4: Exemplo da diluição de precisão num plano.

Os satélites transmitem 2 sinais principais, a portadora L1 a 1575.42MHz e a portadora L2 a 1227.60MHz. De forma a distinguir os sinais de diferentes satélites as duas portadoras são modeladas por sequências pseudo-aleatórias (Pseudorandom noise (PRN)) diferentes para cada satélite. Duas sequências são utilizadas, a Course / Aquisição (C/A) a 1.023MHz e a Precision (P) com uma frequência de 10.23MHz. Os códigos C/A pertencem à família dos *Golden Codes*, caracterizados por terem uma baixa correlação entre membros da família, sendo particularmente úteis para que o receptor consiga distinguir com facilidade sinais provenientes de diferentes satélites. A portadora L1 é modelada pelos dois códigos, C/A e P enquanto que a L2 é só modelada pela sequência P.

Além dos *Golden Codes*, a portadora transporta ainda a mensagem de navegação (D) a 50bps, contém informação sobre as *ephemerides* (posição) dos satélites, estado do sistema, o tempo de GPS e possíveis desvios nos relógios. A figura 3.5 ilustra a forma como os diferentes sinais se relacionam e são enviados.

Para o cálculo da distância satélite - *rover* (*pseudorange*), tanto o desfasamento no código como na fase podem ser utilizados. As medições por código têm um ruído maior que as medições por fase, na ordem de 1m para C/A e dezenas de centímetros para P enquanto que as medições por fase conseguem exatidões na ordem de alguns milímetros (em condições ideais). Em contrapartida as medições por fase envolvem a utilização de soluções computacionais mais complexas uma vez que, para além de determinar o desfasamento, é preciso estimar as ambiguidades inteiras (o número de ciclos completos que o sinal recebido está desfasado da réplica gerada no receptor).

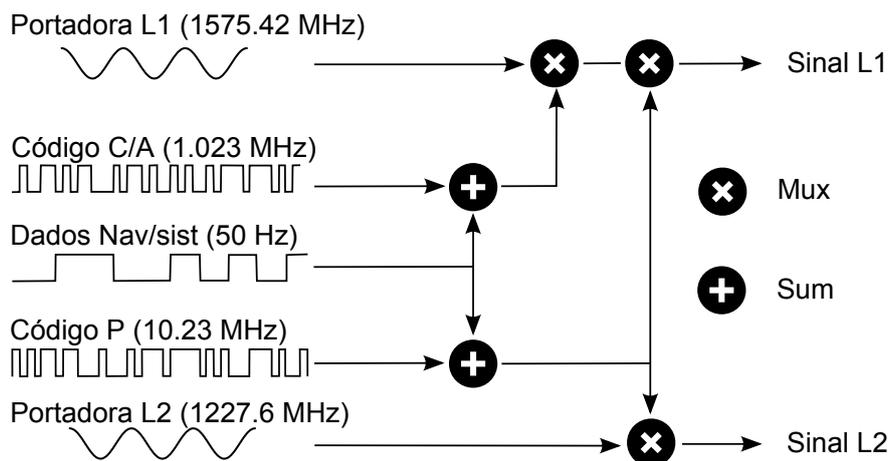


Figura 3.5: Sinais do Sistema GPS.

Tendo em conta que para cada satélite há uma ambiguidade que é necessária ser estimada, a resolução de ambiguidades requer várias observações em diferentes épocas (figura 3.6). Enquanto não é possível obter soluções inteiras, são utilizadas soluções de vírgula flutuante (*floats*) que implicam uma degradação no desempenho da estimação da posição, quando as soluções inteiras são obtidas, são fixadas (*fixed solution*) de forma a tirar o máximo partido das medições por fase até que haja um falha no sinal, ou o satélite deixe de estar visível. Quando estes eventos ocorrem (denominados *cycle slips*), o número de ciclos inteiros do desfasamento é perdido e tem que ser estimado novamente.

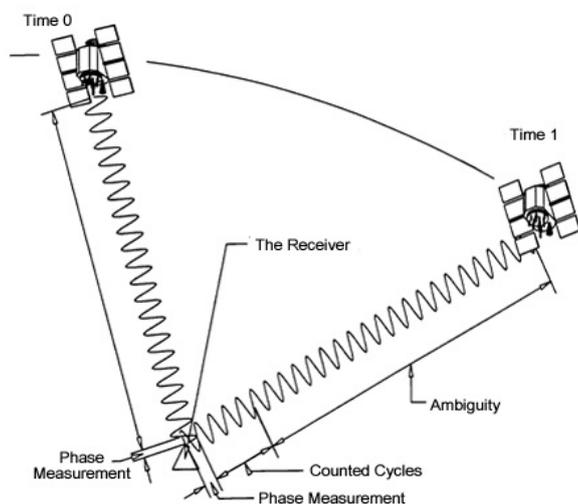


Figura 3.6: Resolução de Ambiguidades ao longo de duas observações [3].

Quanto ao segmento de utilizador, os receptores podem ser classificados em duas categorias, os que recebem e decodificam as duas portadoras (L1 e L2), são extremamente exatos mas bastante dispendiosos (milhares a dezenas de milhares

de euros) sendo utilizados principalmente em contexto profissional ou de investigação. Os que apenas descodificam a portadora L1 têm um menor custo, dezenas de euros até algumas centenas de euros mediante a qualidade dos componentes que os constituem. Estes dispositivos têm uma menor exatidão, podendo variar entre alguns centímetros até alguns metros.

### 3.2.2 Fontes de erro

Existem diversas fontes de erro que podem condicionar o desempenho do sistema de estimação de posição, podendo ser intrínsecas do sistema ou provocadas pelo ambiente envolvente. Além da já referenciada influência que a geometria dos satélites tem na exatidão do sistema (GDOP) os dados das *Ephemeris* (informação sobre a posição dos satélites no espaço) têm geralmente incertezas entre 1 a 5m, não permitindo saber a posição exata de cada satélite. Outro erro intrínseco do sistema são os erros de relógio dos satélites, apesar de serem muito precisos uma pequena variação (*drift*) significa um erro de posicionamento considerável.

Quanto a fontes de erro do ambiente, podem-se considerar erros de propagação e erros por *multipath* (figura 3.7): A velocidade de propagação do sinal é influenciada pelo meio de propagação, como o meio não é o vazio o sinal viaja a velocidades mais baixas que a velocidade da luz e sofre variações difíceis de estimar. Tanto o nível de ionização da ionosfera (que varia espacialmente e temporalmente) como a densidade das moléculas de gaz e a humidade no ar na troposfera causam atrasos na propagação no sinal.

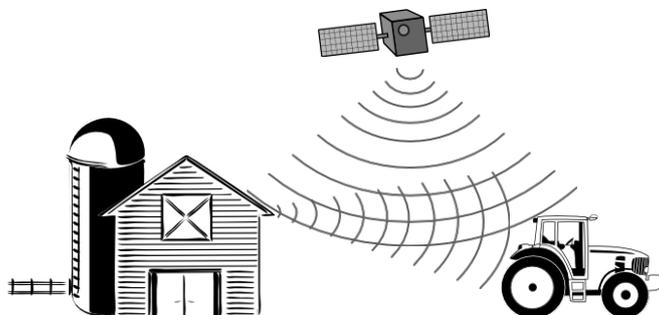


Figura 3.7: Exemplo do efeito de *multipath*.

Além dos atrasos atmosféricos, podem haver ainda atenuações ou reflexões provocadas por árvores, edifícios ou irregularidades no terreno (declives acentuados perto do receptor, montanhas etc.) O *multipath* pode provocar erros de localização grosseiros uma vez que o receptor pode estar a receber um sinal com múltiplas reflexões, sendo que o tempo de viagem nesta situação é completamente adulterado. Este efeito, a par da fraca qualidade de recepção de sinal, constituem os principais problemas que se colocam na estimação de posição em meio urbano devido a edifícios altos e pouco espaçados entre si. Uma forma de mitigar os efeitos de propagação na atmosfera é utilizar um receptor de duas frequências (L1 e L2), como a atenuação depende da frequência do sinal é possível estimar

a atenuação de velocidade que o meio de propagação impôs. Outro método bastante comum é a utilização de modelos de correção, neste caso tenta-se modelar os efeitos de propagação na atmosfera e estimar qual o atraso provocado.

Um método eficaz a diminuir o impacto das fontes de erro é a utilização de diferenciação (DGPS), que através de estações de referência (receptores de posição conhecida), permitem o cálculo de posições com incertezas muito pequenas (de alguns centímetros até um metro). Este tipo de abordagem será discutido com pormenor neste capítulo.

Por fim, resta mencionar as fontes de erro intrínsecas do sistema no segmento de utilizador: Os receptores de baixo custo, por causa da qualidade dos seus componentes, estão mais sujeitos a ruídos (devido à antena, à qualidade do seu relógio, etc.) do que os receptores profissionais mais dispendiosos.

### 3.3 Posicionamento absoluto

Como já referido, a estimação de posição por GPS tem como base o conhecimento do tempo de viagem do sinal entre o satélite emissor e o receptor. Se o sistema fosse perfeito e operasse sob condições ideais, os instantes de tempo (ou época) de emissão e recepção do sinal, com respeito a uma referência temporal (tempo de GPS), seriam exatamente conhecidos. Para que tal acontecesse, teria que haver um sincronismo perfeito entre os relógios do emissor e do *rover*, o que não acontece no sistema real.

Como existe sempre um pequeno *offset* entre os relógios e o tempo de referência GPS, este tem que ser tido em conta em todos os métodos de posicionamento, é por isso importante defini-lo formalmente, tanto para o satélite como para o *rover*:

$$dt^s = t^s - t_{GPS} \quad (3.1)$$

$$dt_r = t_r - t_{GPS} \quad (3.2)$$

Sendo  $t_r$  e  $t^s$  os tempos do *rover* e do satélite e  $t_{GPS}$  a referência. Quando o tempo de viagem do sinal é conhecido, a localização pode ser conseguida através da observação do código (a sequência PRN) ou desfasamento da portadora. Apesar dos princípios serem os mesmos, os dois métodos têm algumas diferenças, sendo apresentados separadamente de seguida.

#### 3.3.1 Posicionamento por observação de código

Todos os satélites, de forma a serem corretamente identificados, emitem uma sequência PRN modulada na portadora. Quando o receptor recebe o sinal, este é correlacionado com uma réplica gerada internamente e é calculado o tempo de atraso entre o sinal recebido e a réplica. Este tempo de atraso ( $\Delta T_r^s(t)$ ), observado na época  $t$  pode ser descrito como:

$$\Delta T_r^s(t) = t_{r(r)} - t^{s(s)} \quad (3.3)$$

Sendo  $t_{r(r)}$  a época de recepção do sinal medido no *rover* e  $t^{s(s)}$  a época de emissão medida no satélite. Como os relógios não estão perfeitamente sincronizados com o tempo de referência GPS, podemos escrever as épocas de emissão e recepção tendo em conta os *offsets* nos relógios:

$$t_{r(r)} = t_r + dt_r(t) \quad (3.4)$$

$$t^{s(s)} = t^s + dt^s(t) \quad (3.5)$$

Tendo em conta os *offsets*, a equação de observação (3.3) fica agora:

$$\Delta T_r^s(t) = t_r - t^s + dt_r(t) - dt^s(t) = \tau_r^s(t) + dt_r(t) - dt^s(t) \quad (3.6)$$

Com  $\tau_r^s(t)$  sendo o tempo real de propagação entre satélite e *rover*. Multiplicando  $\Delta T_r^s(t)$  pela velocidade de propagação da luz no vácuo ( $c$ ) obtém-se a equação de observação por código (i.e. *pseudorange*):

$$P_r^s(t) = c\Delta T_r^s(t) = c\tau_r^s(t) + c(dt_r(t) - dt^s(t)) \quad (3.7)$$

Como o sinal passa por várias camadas da atmosfera até chegar ao receptor, atrasos na troposfera e ionosfera devem ser considerados. Estes atrasos podem ser estimados através de modelos, por exemplo o modelo ionosférico de Klobuchar ou o modelo troposférico Saastamoinen [3]. Sendo  $T_r^s(t)$  o atraso na troposfera,  $I_r^s(t)$  o atraso na ionosfera e tendo em conta ruído nas medições ( $\nu_r^s(t)$ ), a equação de observação por código (3.7) fica:

$$P_r^s(t) = \rho_r^s(t) + c(dt_r(t) - dt^s(t)) + T_r^s(t) + I_r^s(t) + \nu_r^s(t) \quad (3.8)$$

Onde  $\rho_r^s(t)$  é a distância geométrica entre satélite e receptor definida em coordenadas cartesianas como:

$$\rho_r^s(t) = \sqrt{(X_r(t) - X^s(t))^2 + (Y_r(t) - Y^s(t))^2 + (Z_r(t) - Z^s(t))^2} \quad (3.9)$$

Assumindo que a posição do satélite ( $X^s, Y^s, Z^s$ ) e o *offset* do relógio são conhecidos através das *ephemerides* e da mensagem de navegação (D), e que os atrasos na atmosfera são estimados pelos modelos, a equação de observação por código (3.8) fica com 4 incógnitas: a posição do receptor ( $X_r, Y_r, Z_r$ ) e o *offset* do seu relógio.

Quando estimamos a posição do receptor (as suas coordenadas num dado sistema referencial), apenas com base na informação proveniente dos satélites, para cada época serão precisas pelo menos 4 observações (de forma a obter as 4 incógnitas da equação de observação) o que requer receber sinal de pelo menos 4 satélites. Reunidas estas condições, é possível obter soluções de posicionamento época a época.

Como o sistema de equações de observação não é linear, é preciso fazer uma linearização em torno do valor aproximado das coordenadas do receptor, de forma a conseguir resolvê-lo. Uma aproximação da posição do receptor pode ser calculada através de métodos determinísticos como o algoritmo de Bancroft [3].

A linearização da equação de observação por código em torno das coordenadas do receptor para uma época é descrita por (3.10).

$$P_r^s = \frac{\tilde{X}_r - \tilde{X}_r^s}{\tilde{\rho}_r^s} (X_r - \tilde{X}_r) + \frac{\tilde{Y}_r - \tilde{Y}_r^s}{\tilde{\rho}_r^s} (Y_r - \tilde{Y}_r) + \frac{\tilde{Z}_r - \tilde{Z}_r^s}{\tilde{\rho}_r^s} (Z_r - \tilde{Z}_r) + cdt_r + (\tilde{\rho}_r^s - cdt_r^s + \tilde{I}_r^s + \tilde{T}_r^s) + \varepsilon(X^s, Y^s, Z^s, dt^s, I_r^s, T_r^s) + \nu_r^s \quad (3.10)$$

Com  $(\tilde{X}_r, \tilde{Y}_r, \tilde{Z}_r)$  as coordenadas aproximadas do receptor,  $(\tilde{I}_r^s, \tilde{T}_r^s)$  calculados pelos modelos atmosféricos,  $(\tilde{X}_r^s, \tilde{Y}_r^s, \tilde{Z}_r^s, \tilde{dt}^s)$  obtidos através na mensagem de navegação (D) e  $\varepsilon(X^s, Y^s, Z^s, dt^s, I_r^s, T_r^s)$  um termo contendo os efeitos das aproximações nos vários modelos.

O sistema de equações de observação linearizado para  $n$  satélites pode ser resolvido por ajuste dos mínimos quadrados para  $n \geq 4$ .

### 3.3.2 Posicionamento por desfasamento da portadora

À semelhança das observações por código, também as observações por fase têm como base a comparação do sinal recebido com uma réplica gerada no receptor. Neste caso, é observado o desfasamento que a portadora tem em relação a uma onda sinusoidal (com a mesma frequência) gerada no receptor.

A equação de observação é definida em (3.11) onde  $\Phi_r^s(t)$  é o desfasamento medido (*offset*),  $\Phi_r(t)$  é a réplica gerada no receptor e  $\Phi_r^{(s)}(t)$  é a fase do sinal enviado pelo satélite  $s$  recebido pelo receptor  $r$  na época  $t$ .

$$\Phi_r^s(t) = \Phi_r(t) - \Phi_r^{(s)}(t) \quad (3.11)$$

De notar que a fase do sinal recebido por  $r$  na época  $t$  corresponde à fase do sinal emitido pelo satélite  $s$  na época de emissão, ou seja, é assumido que não há variação de fase durante o percurso ( $\tau_r^s$  é o tempo de propagação do sinal):

$$\Phi_r^{(s)}(t) = \Phi^s(t - \tau_r^s) \quad (3.12)$$

Assumindo um oscilador estável com uma frequência  $f = \frac{d\Phi}{dt}$  a equação 3.12 pode ser escrita como uma expansão em série de Taylor de primeira ordem, ou seja:

$$\Phi^s(t - \tau_r^s) = \Phi^s(t) - \frac{d\Phi^s}{dt} \tau_r^s = \Phi^s(t) - f\tau_r^s + N_r^s(t) \quad (3.13)$$

Onde  $N_r^s(t)$  é o número inteiro de ciclos entre a época de emissão e de recepção e não pode ser diretamente observado. Tendo em conta as equações (3.12) e (3.13) a equação de observação por fase (3.11) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Phi_r^s(t) = \Phi_r(t) - \Phi^s(t) + f\tau_r^s - N_r^s(t) \quad (3.14)$$

Para terminar a equação de observação por fase, é necessário introduzir os *offsets* dos relógios ( $dt_r(t)$  e  $dt^s(t)$ ), que são definidos de forma similar ao já visto caso das observações por código, com  $\Phi(t)$  a fase dum oscilador ideal sincronizado com o tempo de referência do GPS:

$$\Phi_r(t) = \Phi(t) + f dt_r(t) \quad (3.15)$$

$$\Phi^s(t) = \Phi(t) + f dt^s(t) \quad (3.16)$$

Tendo em conta os *offsets* dos relógios do satélite e do receptor, a equação de observação por fase fica:

$$\Phi_r^s(t) = f \tau_r^s + f(dt_r(t) - dt^s(t)) - N_r^s(t) \quad (3.17)$$

Por fim, basta introduzir os atrasos na ionosfera e da troposfera, multiplicar pelo comprimento de onda de forma a obter a *pseudorange* ( $f = \frac{c}{\lambda}$ ) e ter em conta ruído nas medidas ( $\eta_r^s(t)$ ) para obter a forma final da equação de observação por desfasamento da portadora (3.18):

$$\lambda \Phi_r^s(t) = \rho_r^s(t) + c(dt_r(t) - dt^s(t)) - I_r^s(t) + T_r^s(t) - \lambda N_r^s(t) + \eta_r^s(t) \quad (3.18)$$

As incógnitas da equação de observação mantêm-se em relação à observação por código (posição e *offset* no relógio do receptor) sendo adicionada outra, o número de ciclos completos de desfasamento, ( $\lambda N_r^s(t)$ ) sendo também denominada ambiguidade inteira entre satélite e receptor. Esta ambiguidade inicial de fase tem que ser estimada para cada satélite, sendo portanto necessário o aumento do número de épocas de observação para resolver o sistema e obter as coordenadas do *rover*. A título de exemplo, com cinco satélites em vista ao longo de duas épocas o sistema tem dez incógnitas, três coordenadas do receptor (assumindo que não se move), dois *offsets* de relógio do receptor e cinco ambiguidades iniciais de fase, mas tem também dez observações (duas por satélite) tornando a resolução do sistema possível.

O ruído de observação de fase é bastante mais baixo que o de código, devendo portanto produzir melhores resultados de estimação de posição. Em contrapartida, são precisos receptores de melhor qualidade (antenas, osciladores, etc) sendo esta a razão para que equipamentos de baixo custo tendam a utilizar observações de código como método de posicionamento.

### 3.4 Posicionamento relativo

Como já referido, o sistema GPS é afectado por diversas fontes de erro (*drift* nos relógios, perturbações na propagação, reflexões etc). Diferenciando as observações de dois receptores (provenientes do mesmo satélite) é possível eliminar erros dos relógios e reduzir o efeito dos erros de propagação atmosférica, desde que os dois receptores se encontrem próximos o suficiente para assumir que estão

sujeitos ao mesmo efeito. O posicionamento relativo pressupõe a existência de um receptor com coordenadas conhecidas, a estação base ou *master* enquanto que o outro poderá estar estático ou em movimento, denominado *rover*.

Geralmente as estações *master* são compostas por receptores e antenas de alto desempenho e são colocadas permanentemente em locais estratégicos funcionando ininterruptamente, estas estações podem fornecer dados em tempo real (através dum protocolo de comunicação utilizando internet) ou guardar as observações para uso posterior. Além disto, as estações costumam pertencer a uma rede de receptores permanente de forma a aumentar a cobertura (proximidade ao *rover*) e portanto aumentar o desempenho do sistema de diferenciação. Outra vantagem de ter uma rede de receptores permanente é a possibilidade de combinar informação de várias antenas de forma a criar uma estação virtual (Virtual Reference Station (VRS)) em determinada coordenada, geralmente bastante próxima do *rover*.

Há duas formas distintas de conseguir o processo de diferenciação a operar em tempo real (caso de grande parte das aplicações de navegação): A estação base pode simplesmente enviar as suas observações para o *rover* e o mesmo é responsável pelo processo de diferenciação utilizando as suas próprias observações, ou a estação base envia correções diferenciais para o *rover* tendo este que corrigir apenas o seu posicionamento com base nas correções recebidas (figura 3.8). O primeiro método é denominado RTK enquanto que o segundo é denominado DGPS.

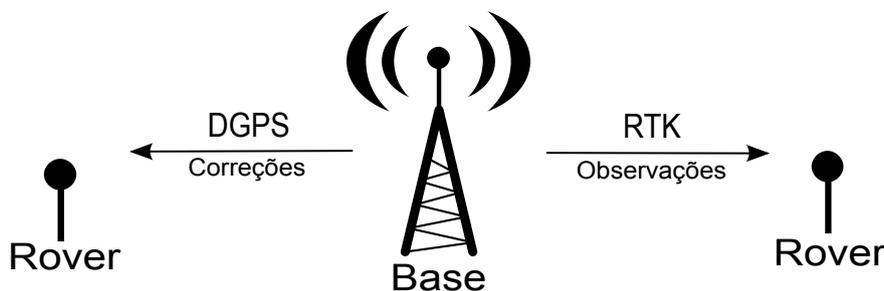


Figura 3.8: DGPS / RTK

### 3.4.1 Diferenciação simples

A diferenciação simples é o método mais simples de diferenciação, envolve apenas dois receptores a observar simultaneamente o mesmo satélite (figura 3.9) e pode ser aplicada tanto em observações por código como por fase.

Admitindo os receptores  $r_i$  com  $i$  sendo o número de *rovers* (por simplicidade, admite-se neste caso  $i = 1$ ),  $m$  a estação de referência (*master*) e admitindo também que ambos os receptores estão a observar o satélite  $s$  na época  $t$ , então a diferenciação da equação de observação por código resume-se a (3.19):

$$\begin{aligned} P_r^s(t) &= P_{r_i}^s(t) - P_m^s(t) \\ &= \rho_{r_i m}^s(t) + c(dt_{r_i}(t) - dt_m(t)) + I_{r_i m}^s(t) + I_{r_i m}^s(t) + \nu_{r_i m}(t) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Como a equação (3.19) sugere, os erros de relógio do satélite são cancelados pela diferenciação, mantendo-se os erros dos receptores ( $dt_{r_i}(t)$  e  $dt_m(t)$ ). A diferenciação simples na equação de observação por fase é bastante similar (3.20):

$$\begin{aligned}\lambda\Phi_{r_i}^s(t) &= \lambda\Phi_{r_i}^s(t) - \lambda\Phi_m^s(t) \\ &= \rho_{r_im}^s(t) + c(dt_{r_i}(t) - dt_m(t)) + I_{r_im}^s(t) + T_{r_im}^s(t) \\ &\quad + \lambda N_{r_im}^s(t) + \eta_{r_im}^s(t)\end{aligned}\quad (3.20)$$

À semelhança do que acontece no método de diferenciação simples por observação de código os erros do satélite foram eliminados (*drift* do relógio) mantendo-se os erros dos relógios dos receptores.

Outro fator comum a ambos os métodos de observação são as componentes de modelação do erro na troposfera e ionosfera, a notação apresentada indica uma operação de diferença entre os mesmos termos dos dois receptores, ou seja:

$$I_{r_im}^s(t) = I_{r_i}^s(t) - I_m^s(t) \quad (3.21)$$

$$T_{r_im}^s(t) = T_{r_i}^s(t) - T_m^s(t) \quad (3.22)$$

Se os receptores estiverem próximos, de forma a que as condições atmosféricas nos dois locais de recepção sejam as mesmas,  $I_{r_im}^s(t)$  e  $T_{r_im}^s(t)$  tendem a ser muito pequenos, idealmente nulos. Esta é outra vantagem da diferenciação simples, os erros de propagação na ionosfera e troposfera são fortemente mitigados desde que os dois receptores se encontrem espacialmente próximos.

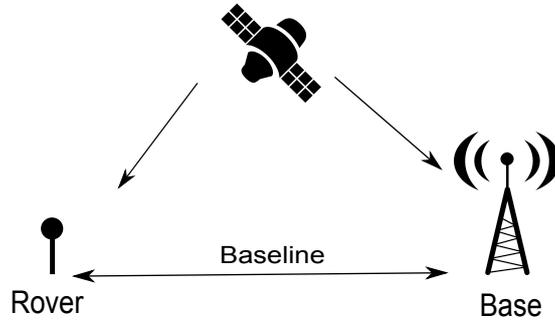


Figura 3.9: Diferenciação simples

### 3.4.2 Diferenciação dupla

Se for possível observar um satélite adicional na mesma época, é possível fazer uma diferenciação dupla, ou seja, quando dois receptores  $r_i$  ( $i = 1$ ) (*rover*) e  $m$  (*master*) observam dois satélites  $s$  e  $p$  na mesma época  $t$ , a equação de observação por código pode ser diferenciada duplamente, dando origem à equação (3.23):

$$\begin{aligned}P_{r_im}^{ps}(t) &= P_{r_im}^p(t) - P_{r_im}^s(t) \\ &= \rho_{r_im}^{ps}(t) + I_{r_im}^{ps}(t) + T_{r_im}^{ps}(t) + \nu_{r_im}^{ps}(t)\end{aligned}\quad (3.23)$$

Desde que as condições de diferenciação (as observações sejam da mesma época e os *drifts* dos relógios entre observações seja muito pequeno), a diferenciação elimina os erros de relógio dos receptores. O termo  $\nu_{r_i m}^{ps}(t)$  contém a propagação do ruído das observações singulares. O processo de diferenciação dupla por observação de fase é bastante similar:

$$\begin{aligned}\lambda\Phi_{r_i m}^{ps}(t) &= \lambda\Phi_{r_i m}^p(t) - \lambda\Phi_{r_i m}^s(t) \\ &= \rho_{r_i m}^{ps}(t) + I_{r_i m}^{ps}(t) + T_{r_i m}^{ps}(t) \\ &\quad + \lambda N_{r_i m}^p s(t) + \eta_{r_i m}^{ps}(t)\end{aligned}\tag{3.24}$$

De acordo com as equações (3.23) e (3.24) o processo de diferenciação dupla elimina todos os erros relacionados com os relógios (receptores e satélites), ficando apenas o sistema vulnerável a ruídos de medição (4 observações por época) e erros de propagação modelados pelos termos  $I_{r_i m}^{ps}(t)$  e  $T_{r_i m}^{ps}(t)$ . À semelhança do que foi discutido anteriormente, se os receptores se encontrarem próximos, os erros de propagação na ionosfera e na troposfera são bastante reduzidos, tornando este método de diferenciação bastante robusto.

### 3.5 Determinação de orientação com múltiplas antenas

Os métodos de determinação de orientação através de configurações multi-antena baseiam-se na determinação das *baselines* (distância) entre antenas e posteriormente no cálculo dos parâmetros que caracterizam a posição e orientação do corpo em questão. De forma a ter um sistema com bom desempenho, é conveniente o uso de observações por fase depois de resolvidas as ambiguidades inteiras.

Estes sistemas podem ser caracterizados em dedicados e não dedicados: Os dedicados utilizam uma estrutura que liga todas as antenas a um receptor projetado de forma a ter todos os sinais sincronizados pela mesma fonte de relógio. Os sistemas não dedicados são compostos por vários pares antena - receptor. A nível de desempenho, não há grandes diferenças entre os dois, sendo os sistemas não dedicados mais modulares e geralmente mais económicos.

Assumindo que existem  $n$  receptores, um deles (geralmente o que tem melhor desempenho a nível de estimação de posição, melhor antena e livre de *multi-path*) é selecionado como a antena principal (*master*) enquanto que as outras são as antenas secundárias ou *slave*, (Ex:  $s_1, s_2, s_n$ ) implicando a formação de uma *baseline* entre estas e a antena principal. Esta *baseline* pode ser calculada com exatidões de decímetros utilizando observações por código ou centímetros, quando se utilizam observações por fase.

Apesar de ser desejável que a antena principal não se mova e que a sua posição seja conhecida com exatidão, em casos onde tal não é possível, a posição da antena principal pode ser estimada através de posicionamento absoluto (*point positioning*). Apesar deste método ter uma exatidão relativamente baixa (metros), tais erros afetam apenas a posição absoluta do sistema visto que, o processo de

posicionamento diferencial continua a fornecer bons resultados a nível de estimação das *baselines*. A incerteza associada à posição da antena principal não é, neste caso, propagada aos parâmetros de orientação.

### 3.5.1 Definição dos referenciais

De forma a apresentar o método de estimação dos parâmetros de orientação, é conveniente definir dois referenciais: o referencial de nível local (Local Level coordinate Frame (LLF)), que se obtém convertendo as coordenadas ECEF das antenas secundárias em relação à principal e o referencial de corpo rígido (Antenna Body Frame (ABF)), formado pela configuração das antenas GPS.

Assumindo que as antenas estão montadas numa plataforma rígida (a distância entre elas não muda), três antenas são necessárias para formar o ABF. A origem é escolhida como sendo a posição da antena principal (*master*, 1), o eixo Y coincide com a *baseline* da antena um com a antena dois.

O eixo X é perpendicular com o eixo Y e está no plano definido pelas antenas um, dois e três e finalmente o eixo Z é perpendicular aos restantes e aponta para cima. Este referencial só precisa de ser fixado uma vez, é imutável, enquanto o referencial LLF é atualizado época a época de acordo com as observações efetuadas.

### 3.5.2 Método de estimação

Os dois referenciais enunciados em 3.5.1 estão relacionados através de três rotações sequenciais por três ângulos de Euler. Cada rotação pode ser expressa através de uma matriz de rotação e as três matrizes podem generalizar uma qualquer rotação se forem multiplicadas por determinada ordem, ou seja, é possível mapear vectores ou pontos do referencial LLF para o ABF com a seguinte relação (3.25):

$$b_i = [R_x(r).R_y(p).R_z(y)].l_i = R_c.l_i \quad (3.25)$$

$$b_i = \begin{bmatrix} c_r c_y - s_r s_p s_y & c_r s_y + c_r s_p c_y & -s_r c_p \\ -c_p s_y & c_p c_y & s_y \\ s_r c_y - c_r s_p s_y & s_r s_y - c_r s_p c_y & c_r c_p \end{bmatrix} l_i \quad (3.26)$$

Onde  $y$ ,  $r$  e  $p$  são os ângulos R-P-Y,  $c$  e  $s$  representam  $\cos(\cdot)$  e  $\sin(\cdot)$ ,  $b_i$  é a posição da antena no referencial ABF e  $l_i$  corresponde à mesma posição no referencial LLF.

Tendo em conta a definição do referencial ABF, as coordenadas da antena dois e da antena três são, respectivamente  $b_2 = [0, b_{12}, 0]^T$  e  $b_3 = [x_{3,b}, y_{3,b}, 0]^T$  com  $b_{12}$  a *baseline* da antena um a dois. Substituindo a coordenada ABF da antena dois na equação 3.25 e aplicando a ortogonalidade da matriz de rotação, a coordenada da antena dois no referencial LLF é(3.27):

$$\begin{bmatrix} x_{2,l} \\ y_{2,l} \\ z_{2,l} \end{bmatrix} = b_{12} \begin{bmatrix} -c_p s_y \\ c_p c_y \\ s_p \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

O ângulo  $Y$  (*Yaw*) e o  $P$  (*Pitch*) são diretamente obtidos através da equação anterior:

$$yaw = -\arctan\left(\frac{x_{2,l}}{y_{2,l}}\right) \quad (3.28)$$

$$pitch = \arcsin\left(\frac{z_{2,l}}{b_{12}}\right) = \arctan\left(\frac{z_{2,l}}{\sqrt{x_{2,l}^2 + y_{2,l}^2}}\right) \quad (3.29)$$

Para determinar o ângulo de  $R$ , é necessária a coordenada (em LLF) da antena três ( $l_3$ ). Para tal, efetua-se uma rotação da coordenada LLF da antena três pelos ângulos  $Y$  e  $P$  resultantes das equações 3.28 e 3.29 dando origem a  $l'_3 = [x'_{3,l}, y'_{3,l}, z'_{3,l}]$ :

$$\begin{bmatrix} x'_{3,l} \\ y'_{3,l} \\ z'_{3,l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_p & s_p \\ 0 & -s_p & c_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_y & s_y & 0 \\ -s_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{3,1} \\ y_{3,1} \\ z_{3,1} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Esta nova coordenada é mapeada no referencial ABF de acordo com a equação (3.31):

$$\begin{bmatrix} x_{3,b} \\ y_{3,b} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_r & 0 & -s_r \\ 0 & 1 & 0 \\ s_r & 0 & c_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_{3,l} \\ y'_{3,l} \\ z'_{3,l} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

De notar que os componentes em  $x$  e  $y$  do vetor  $b_3 = [x_{3,b}, y_{3,b}, 0]$  não são explicitamente definidos, mas é possível derivar o ângulo  $R$  (*Roll*) a partir da terceira componente, ou seja:

$$roll = -\arctan\left(\frac{z'_{3,l}}{x'_{3,l}}\right) \quad (3.32)$$

### 3.6 Comunicação entre veículos (V2V)

O sistema de comunicação entre veículos, por ter especificidades próprias, não segue as mesmas normas que um sistema de comunicação sem fios tradicional, utilizado em grande parte dos dispositivos (telemóveis, computadores portáteis, etc).

O GCDC é um concurso aberto a equipas compostas por universidades, institutos de investigação e empresas interessadas em competir entre si no desenvolvimento e implementação de sistemas de navegação cooperativa para veículos autónomos em cenários muito realistas. A primeira edição do concurso ocorreu em 2011 e a segunda edição está prevista para 2016.

Como se trata de um concurso de cooperação entre equipas de vários pontos da Europa, é imperativo que o sistema de comunicação seja completamente padronizado, modular e permita o envio de toda a informação relevante em ambiente de cooperação, de forma a que todos os veículos comuniquem de forma eficiente. Para o efeito, a organização do evento desenvolveu um protocolo de comunicação baseado na pilha protocolar Communications Access for Land Mobiles (CALM-FAST) e na norma IEEE 80211.p.

A figura 3.10 mostra a pilha protocolar do GCDC de acordo com o modelo OSI. As últimas duas camadas (aplicação e apresentação), são suportadas pelo protocolo CALM-FAST que, por sua vez utiliza a norma IEEE 802.11p na camada de ligação e física. O endereçamento é conseguido através dos MAC permanentes.

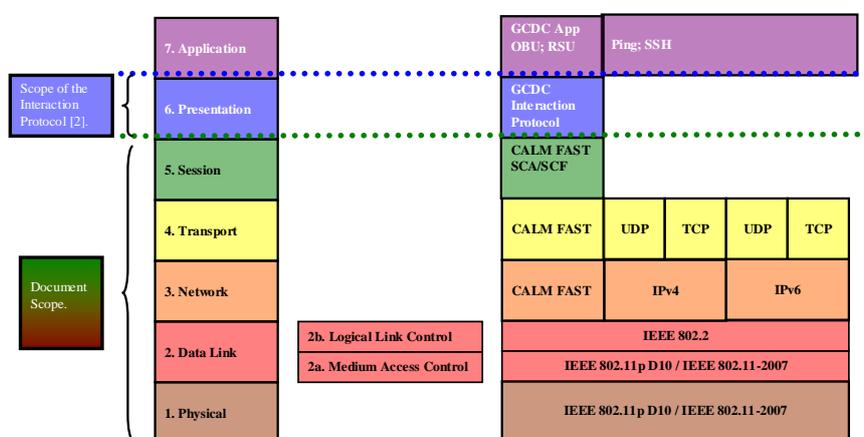


Figura 3.10: Modelo OSI do protocolo utilizado no GCDC [4]

As mensagens Cooperative Awareness Message (CAM) são mensagens normalizadas que contêm informação de identificação e localização de veículos em redes de veículos V2V. Estão definidas na norma ETSI TS 102 637-2 [31] em notação *Abstract Syntax Notation One* (ASN.1).

A ASN.1 é uma notação para descrever regras e estruturas para representação, codificação, transmissão e decodificação de dados, permitindo automatizar o processo de criação de mensagens e protocolos de comunicação.

# Capítulo 4

## Arquitetura e Implementação do Sistema

Neste capítulo é apresentada a arquitetura do sistema de localização desenvolvido e a forma como foi implementado. Numa primeira fase, é apresentada uma visão global do sistema, de seguida é apresentada a arquitetura detalhada desde a aquisição de observações à fase de estimação dos ângulos de orientação e por fim é referida a forma como o sistema foi implementado, com referência aos componentes de *Hardware* e *Software*.

### 4.1 Arquitectura do sistema

O sistema desenvolvido, compreende três entidades. Os veículos, equipados com dois receptores GPS posicionados longitudinalmente na cobertura do veículo, com um sistema de comunicação V2V e com uma unidade de processamento com acesso à internet (figura 4.1). As RSU, compostas por um receptor GPS e um módulo de comunicação V2I e por fim uma antena principal fixa (antena *master*), com capacidade para enviar as suas observações aos veículos e com posição bem conhecida.

A entidade principal do sistema é o veículo, que faz uso da informação proveniente das outras entidades para estimar a sua posição e orientação através de uma configuração multi-antena / multi-receptor. Como a estimação da orientação requer no mínimo três pontos não colineares e o veículo dispõe de apenas dois receptores, o sistema tem uma componente colaborativa, através do módulo de comunicação V2V.

Deste modo, quando há veículos ou RSUs nas proximidades, o veículo faz uso da informação (posição e *raw data* do receptor) proveniente da outra entidade de forma a estimar a sua orientação. Quando não há entidades próximas capazes de colaborar com o veículo, o sistema perde a capacidade de fornecer o ângulo de rotação em torno de  $x$  (figura 3.1), geralmente denominado *Roll*.

Por fim, a antena principal fixa (antena *master*) é utilizada para, através dum método de posicionamento RTK, estimar a posição absoluta do veículo.

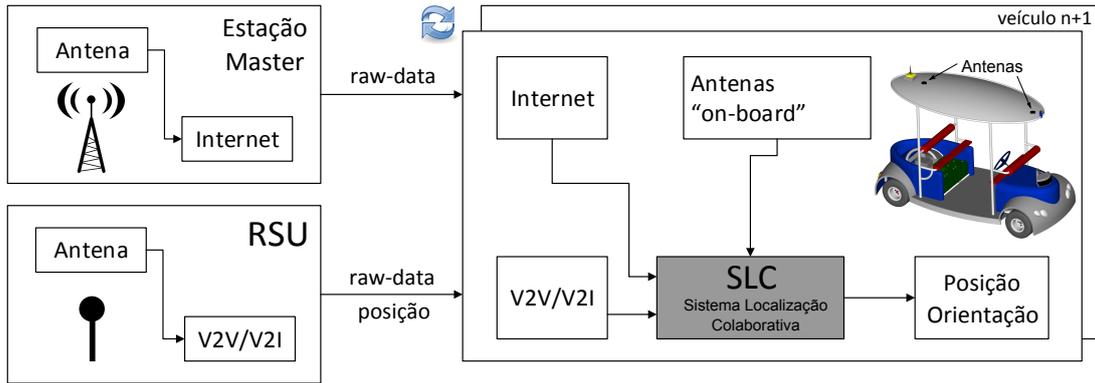


Figura 4.1: Arquitectura do Sistema de Localização Colaborativa

Para denominar as diferentes antenas vai ser utilizada a seguinte nomenclatura: Antena principal fixa ( $A_M$ ), antena da RSU ( $A_{rsu}$ ), antena principal do veículo, localizada no centro do seu eixo traseiro ( $A_{vm}$ ), antena secundária do veículo ( $A_{vs}$ ) e antena do veículo auxiliar ( $A_{v2}$ ).

Os processos de posicionamento relativo em qualquer das antenas seguirá a seguinte nomenclatura,  ${}^m D_s$  que indicando o mesmo processo entre a antena  $m$  (*master*) e  $s$  (*slave*).

#### 4.1.1 Posicionamento relativo

Na figura 4.2 está ilustrado o funcionamento do sistema de estimação. Os receptores GPS fornecem o *raw data* (pseudoranges, informações de *ephemerides*, etc) funcionando como as entradas do sistema.

Numa primeira fase ocorre um processo de posicionamento relativo a dois níveis: uma diferenciação local, onde as antenas secundária do veículo ( $A_{vs}$ ) e do veículo auxiliar ( $A_{v2}$ ) ou RSU ( $A_{rsu}$ ) são diferenciadas em relação à antena principal ( $A_{vm}$ ), e uma diferenciação global, onde a antena principal do veículo é diferenciada em relação à antena fixa (*master*),  $A_M$ .

Com a diferenciação global,  ${}^A D_{vm}$ , é possível estimar a posição absoluta do veículo, enquanto que com as locais ( ${}^{vm} D_{vs}$ ,  ${}^{vm} D_{v2}$  ou  ${}^{vm} D_{rsu}$ ), o interesse recai em analisar as posições relativas das antenas secundárias em relação à antena principal, em que a sua posição é calculada por método de posicionamento absoluto.

No final da fase de diferenciação, estão calculadas as posições relativas das antenas secundárias em relação à antena principal do veículo ( ${}^{vm} P_{vs}$ ,  ${}^{vm} P_{v2}$  ou  ${}^{vm} P_{rsu}$ ), a posição de  $A_{vm}$  utilizando posicionamento absoluto ( $P_{vm}$ ) e a posição da mesma antena utilizando posicionamento relativo com  $A_M$ , ou seja,  ${}^A P_{vm}$ .

#### 4.1.2 Processamento das observações

As observações (posições estimadas das diversas antenas durante a fase de posicionamento relativo), estão descritas num sistema de coordenadas global. Para

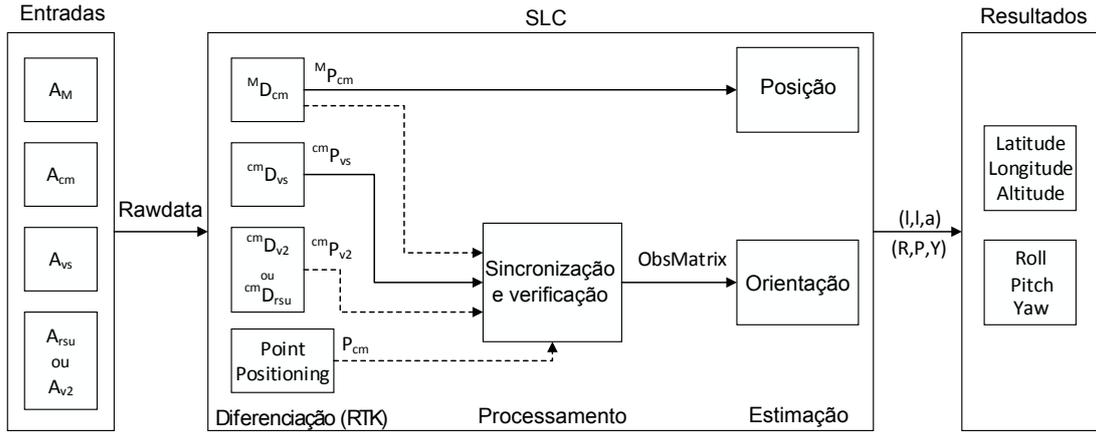


Figura 4.2: Sistema Localização colaborativa (SLC)

a localização absoluta do veículo ( ${}^A P_{vm}$ ) tal não é um inconveniente visto que grande parte dos sistemas de localização e navegação utilizam este sistema (latitude longitude e altura). Para o processo de estimação da orientação, no entanto, traz mais desvantagens que vantagens.

Aproximando a superfície terrestre a um plano local através da transformação de coordenadas para um sistema ENU, (ver 3.1) e escolhendo para ponto de tangência  $(0, 0, 0)$  a coordenada  $P_{vm}$  obtém-se um sistema de coordenadas intuitivo com origem na posição da antena principal do veículo e com as secundárias mapeadas de forma direta no mesmo plano. Esta transformação permite uma avaliação direta das *baselines*, uma fácil determinação de ângulos através de relações trigonométricas básicas e, no geral, facilita todo o processo de estimação da orientação. A figura 4.3 ilustra a transformação de coordenadas realizada com indicação das *baselines*, de interesse, entre as antenas.

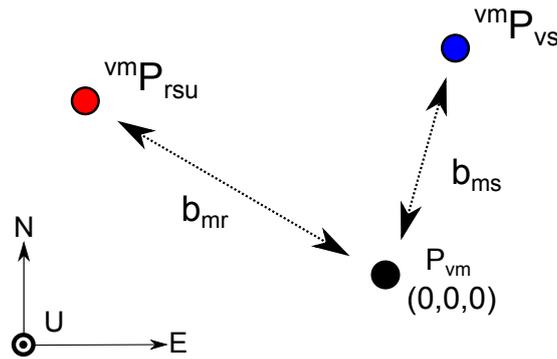


Figura 4.3: Sistema de Coordenadas ENU com  $P_{vm}$  na origem

No caso da antena secundária do veículo, o tamanho da *baseline*  $b_{ms}$  pode ser usado como figura de mérito para verificar a validade de determinada observação, ou seja, se  $b_{ms}$  for muito diferente da *baseline* real (fixa e facilmente mensurável), provavelmente irá propagar erros grosseiros aquando da estimação dos ângulos de orientação. Uma estratégia a seguir será descartar as observações que falhem o teste da *baseline*.

Sejam  $br_{mv}$  o tamanho real da *baseline* entre a antena principal e secundária do veículo e  $\sigma_{b1}$  o valor de tolerância admitida. A condição de validade para determinada observação é:

$$|b_{ms} - br_{mv}| < \sigma_{b1} \quad (4.1)$$

A escolha do valor de  $\sigma_{b1}$  está diretamente ligado à incerteza admissível nos ângulos *Yaw*, *Pitch* e ao tamanho real da *baseline*. A equação 4.2 traduz esta relação, sendo o ângulo de incerteza máximo  $\theta_m$ . A título de exemplo, para uma *baseline* de 1.3 metros, com um ângulo de incerteza admissível de 3.5 graus, o valor da tolerância para o teste da *baseline* será aproximadamente 8 centímetros.

$$\sigma_{b1} = \tan(\theta_m).br_{mv} \quad (4.2)$$

No caso da terceira coordenada, (proveniente do receptor de uma RSU ou de um veículo secundário) este tipo de verificação não é válida, a *baseline* não tem valor fixo nem é conhecido a priori. É possível, no entanto, tirar partido do duplo posicionamento relativo da antena principal do veículo e fazer algumas comparações.

No caso de um veículo nas proximidades, (para as RSU o processo é semelhante) os sistemas de comunicação trocam dois tipos de informação: O *raw-data* das antenas principais, para diferenciação local, e a sua posição  ${}^A P_{vm}$  (resultante do posicionamento relativo com a antena *master*). Estando os veículos relativamente próximos é de esperar que a *baseline* calculada a partir de  ${}^A P_{vm}$  e  ${}^A P_{v2m}$ , ( ${}^A b_{v2m}$ ) seja idêntica com  $b_{v2m}$ , figura 4.4.

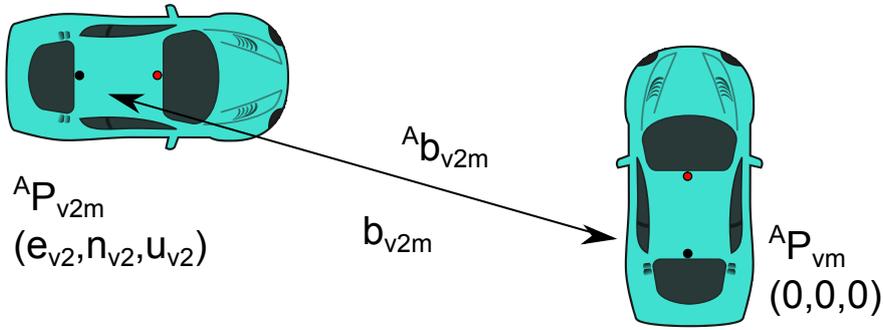


Figura 4.4: *Baselines* nas diferentes diferenciações

De forma análoga ao que foi feito para a verificação de  $b_{ms}$ , é possível comparar as *baselines*  ${}^A b_{v2m}$  e  $b_{v2m}$  a aferir se têm valores próximos (equação 4.3):

$$|{}^A b_{v2m} - b_{v2m}| < \sigma_{b2} \quad (4.3)$$

O valor de  $\sigma_{b2}$  é porém mais difícil de dimensionar, depende de variados factores como a qualidade dos processos de posicionamento relativo, distância à antena *master* e distância entre veículos. Dada a geometria do problema, é de todo conveniente que  $\sigma_{b2}$  seja dado em função da distância dos veículos, ou

seja  $\sigma_{b2}(d)$  e que assuma valores maiores quando os veículos estão afastados e menores quando estão mais próximos.

Por fim, quando as observações que não cumprem os testes de *baseline* estão descartadas, é possível fazer uma média aritmética das posições observadas (por exemplo, uma média a cada 1 segundo), desde que a velocidade do veículo seja baixa o suficiente para que tal não introduza erros. Resta apenas sincronizar as observações de acordo com os respectivos *timestamps* e o processo de estimação da orientação fica deveras simplificado. O diagrama seguinte (figura 4.5) ilustra as diversas fases de processamento descritas nesta secção.

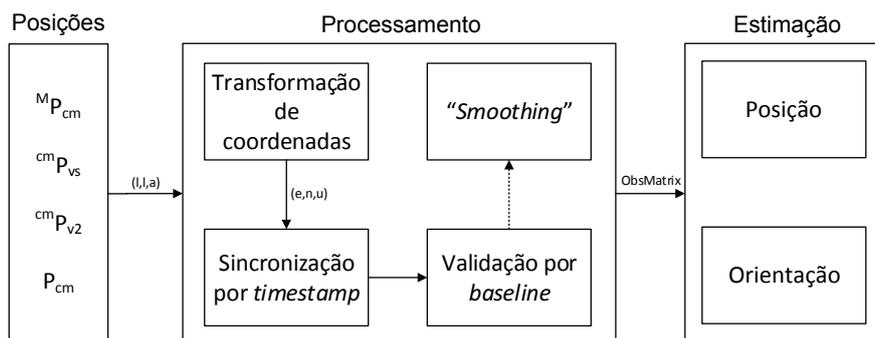


Figura 4.5: Módulo de processamento de observações

### 4.1.3 Estimação da orientação

No processo de estimação da orientação são necessárias, depois da fase de validação, as coordenadas da antena secundária do veículo e se disponível, a coordenada complementar fornecida pelo sistema de comunicação.

Durante a fase de processamento referida anteriormente, foi possível calcular as coordenadas destas antenas em relação à antena principal do veículo. A partir deste ponto, o processo de estimação de orientação é trivial, sendo semelhante ao método discutido em 3.5.

Sejam as coordenadas da antena secundária do veículo  ${}^{vm}P_{vs} = (e_2, n_2, u_2)$  e do veículo auxiliar ou RSU  ${}^{vm}P_{v2} = (e_3, n_3, u_3)$ . Para os ângulos *Yaw* e *Pitch* é apenas necessária a antena secundária do veículo:

$$yaw = \arctan 2(n_2, e_2)^1 \quad (4.4)$$

$$pitch = -\arctan 2\left(u_2, \sqrt{e_2^2 + n_2^2}\right) \quad (4.5)$$

Para o cálculo do ângulo de *Roll* é necessária uma transformação de coordenadas semelhante à equação 3.30, dando origem a  $(e'_3, n'_3, u'_3)$ . Depois da transformação, basta aplicar a equação seguinte:

$$roll = \arctan 2(u'_3, n'_3) \quad (4.6)$$

<sup>1</sup> $\arctan 2(Y, X)$  indica a tangente inversa nos quatro quadrantes  $([-\pi, \pi])$  [32]

## 4.2 Implementação

### 4.2.1 Componentes do setup experimental

Nesta secção são brevemente descritos os componentes de Hardware do sistema. Como já referido, o sistema é constituído por receptores GPS (dois colocados na cobertura do veículo uma antena fixa e outra por RSU), o sistema de comunicação V2V e um computador portátil com acesso à internet. Os receptores utilizados fazem parte do kit de avaliação da *ublox*, *EVK-6T* [33].

Este kit de avaliação traz o receptor *ublox LEA-6T*, disponibiliza comunicação Universal Serial Bus (USB), algum software de configuração e uma antena GPS ativa, *ANN-MS*. É portanto um sistema bastante útil devido à facilidade de instalação no veículo, à simples interface de comunicação e à capacidade de devolver *raw data*, necessário para o sistema RTK.

A tabela 4.1 contém alguns dados de desempenho do receptor utilizado (*ublox LEA-6T*).

LEA-6T	
Receptor	50 Canais Freq. L1 e código C/A SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS
Sensibilidade	-160 dBm
Freq. Amostragem	5 Hz

Tabela 4.1: Características do receptor *LEA-6T*

A antena fixa (*master*) tem como requisitos principais estar perfeitamente localizada (a sua posição ser fielmente conhecida) e ter capacidade para transmitir as suas observações via rede. O Instituto Geográfico do Exército (IGeoE) tem implementado desde 2006 a rede SERVIR, que consiste num conjunto de estações de referência permanentes de observações GNSS, espalhadas pelo território nacional que permite fornecer correções DGPS, observações em tempo real para posicionamento por RTK ou dados para pós-processamento.

Uma destas antenas está instalada no edifício da Brigada Ligeira de Intervenção, (centro de Coimbra) e reúne as condições necessárias para ser utilizada como estação principal no sistema desenvolvido: Não existem interferências electromagnéticas no local de instalação da antena, não existem fontes de *multipath* próximas nem fontes de obstrução do sinal (edifícios ou árvores mais altas que a antena). Além disto, está a uma distância relativamente curta dos locais de teste escolhidos, o que permite um desempenho elevada no sistema de posicionamento. A tabela 4.2 sumariza algumas características da estação base (Estação 9 do projeto SERVIR).

O sistema de comunicação V2V é constituído por um *router* GCDC, baseado num sistema ALIX 2D2. As ALIX 2D2 são placas de formato pequeno otimizadas para roteamento sem fios e possuem ranhuras Mini PCI que permitem a ligação de placas Unex DCMA-86P2 que integram o chip Atheros AR5414-B2B e tem

SERVIR - Estação 9	
Cidade	Coimbra
Receptor	Trimble NetR5
Constelação	GPS e GLONASS
Antena	Zephyr Geodetic Model 2
Referência	TRM55971.00
Coord. Cartesianas (m)	
Coord. X	4825559.40669
Coord. Y	-714122.57772
Coord. Z	4095579.23948

Tabela 4.2: Características da estação 9 SERVIR

ligação a uma antena externa, de forma a ser colocada na cobertura do veículo, *Laird TRAB58003P*.

O chip AR5414-B2B é um dos componentes mais importantes do sistema pois as suas características permitem, através de um módulo modificado do kernel Linux, o funcionamento da rede sem fios 802.11p [34].

Como *ground truth*, de forma a averiguar o desempenho do sistema desenvolvido, foi utilizado um sensor IMU/GPS de alto desempenho, o *Xsens MTi-G-700* capaz de fornecer posição e orientação com erros muito pequenos e o sistema RTK *TOPCON HiperPro* capaz de fornecer soluções de posição com erros milimétricos. A figura 4.6 esquematiza em diagrama o *setup* experimental utilizado.

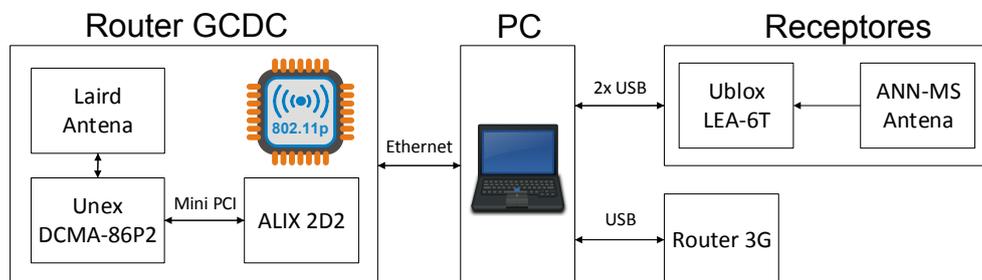


Figura 4.6: Esquema do Setup Experimental

## 4.2.2 Descrição dos módulos de software

Do ponto de vista do software, o sistema pode ser visto como a interligação de 3 módulos: O sistema de aquisição e posicionamento relativo, o sistema de comunicação V2V e o sistema de processamento e estimação de orientação.

O sistema de aquisição e diferenciação das observações é responsável por fazer o processamento do *raw data* proveniente dos diversos receptores e devolver as diversas soluções de posicionamento relativo (RTK) discutidas em 4.1.1. Como este sistema é bastante complexo, uma implementação de raiz que seja minimamente robusta torna-se temporalmente dispendiosa. Como tal optou-se pela utilização

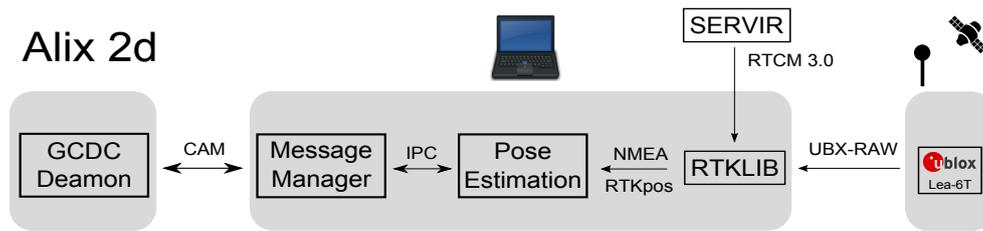


Figura 4.7: Módulos de Software e protocolos de comunicação

de sistemas livres, já com maturação suficiente para serem considerados estáveis e funcionais.

Foram consideradas duas soluções possíveis: a *toolbox* para *Matlab goGPS* desenvolvida em Itália, como tese de Doutorado de Eugenio Realini, sendo neste momento um projeto suportado por uma comunidade bastante alargada de utilizadores, e o conjunto de bibliotecas implementadas em C/C++ desenvolvido por T. Takasu, *RTKLIB*.

Foram feitos alguns testes e obtiveram-se resultados idênticos com as duas soluções, a escolha recaiu sobre o *RTKLIB* por ter um melhor comportamento no interface com o sistema *SERVIR* e por estar já portado para o sistema operativo *Android*, o que possibilita a ligação do GPS a um *smartphone* ou *tablet* facilitando a recolha de dados.

O software do sistema de comunicação funciona repartido em dois componentes de *Hardware*: Os sistemas ALIX executam a distribuição Linux OpenWrt com um módulo modificado do kernel para permitir o funcionamento em 802.11p. A pilha protocolar CALM FAST é implementada em espaço de utilizador por um daemon (processo de background) denominado calmd. Além disso, o calmd é responsável pela retransmissão de mensagens provenientes de uma ligação TCP/IP para a ligação sem fios CALM FAST 802.11p e vice-versa. A comunicação com o módulo de estimação de orientação é conseguida através de *sockets* TCP/IP locais. Na figura 4.8 está representado o sistema de comunicação GCDC utilizado.

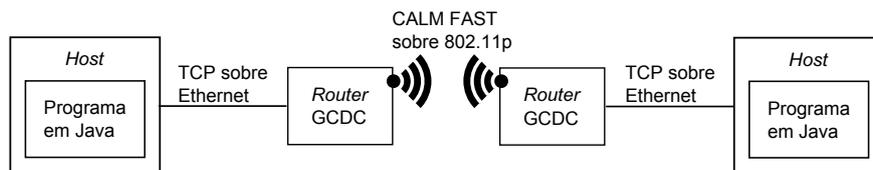


Figura 4.8: Módulos de Software e protocolos de comunicação

Quanto às CAM, utilizou-se o *BinaryNotes* para codificar/descodificar as mensagens ASN.1 e para gerar código de composição de mensagens. O compilador ASN.1 BinaryNotes gera, a partir de um ficheiro de estrutura de mensagem na notação ASN.1, código na linguagem Java para compor e aceder aos elementos da mensagem. O BinaryNotes também fornece uma biblioteca em Java para codificar e decodificar as mensagens transmitidas [35].

O módulo de processamento e estimação de orientação foi implementado como uma *toolbox* em *MATLAB*, sendo capaz de funcionar em tempo real, através das

ligações (via TCP/IP *sockets*) com o módulo de posicionamento relativo e com o módulo de comunicação V2V, e também em pós-processamento através da leitura de ficheiros no formato *NMEA* [36] ou o formato típico de saída do *RTKLIB*, ficheiros (*.pos*). Em ambos os casos, o processo de estimação é semelhante. A figura 4.9 apresenta os principais blocos de *software* da *toolbox* desenvolvida.

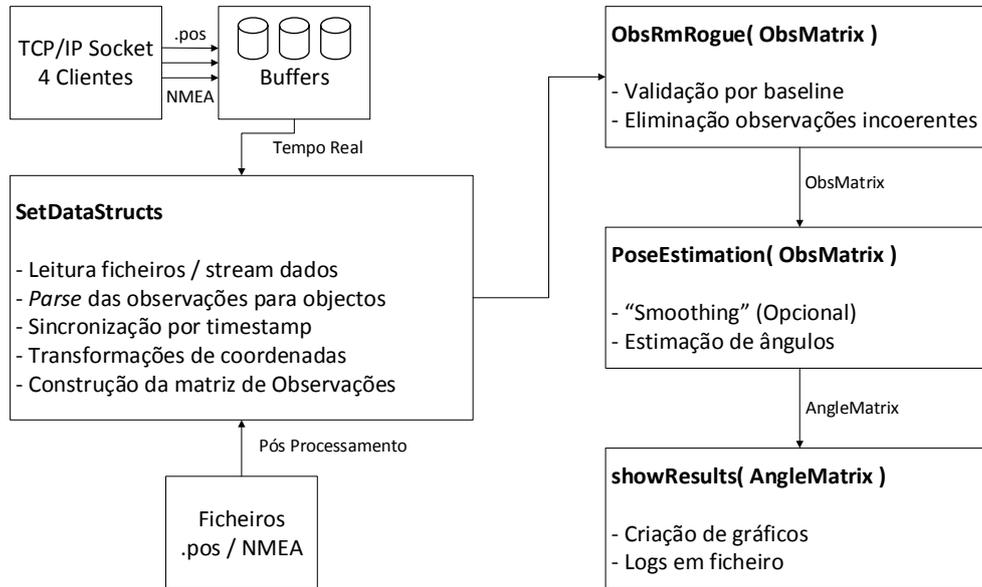


Figura 4.9: Blocos principais da *toolbox* de estimação

Os dados de entrada têm uma estrutura relativamente rígida (quer sejam no formato de saída RTKLIB ou NMEA), figura 4.10. No caso de funcionamento em tempo real, o sistema dispõe de um *buffer* que guarda as últimas observações de forma a poder recuperar de atrasos ou falhas de envio de algum receptor. De forma a tratar devidamente as observações, o processo começa por ler cada observação (*buffer* ou ficheiro) e guarda-a como objecto de uma classe (*ObsGGA* ou *ObsRTKpos*). Guarda simultaneamente estes objetos num *array* de forma a facilitar a sua sincronização.

```

GPST          lat(deg)    long(deg)    height(m) Q ns sdn(m)  sde(m)  sdu(m)  sdne(m)  sdeu(m)  sdun(m)  age(s)  ratio
2014/12/22 12:13:50.000  40.217206192 -8.497745908  68.2720  2  9  0.0178  0.0185  0.0386  -0.0041  0.0044  -0.0190  0.00  1.1

```

Figura 4.10: Exemplo de Observação RTKLIB *.pos*

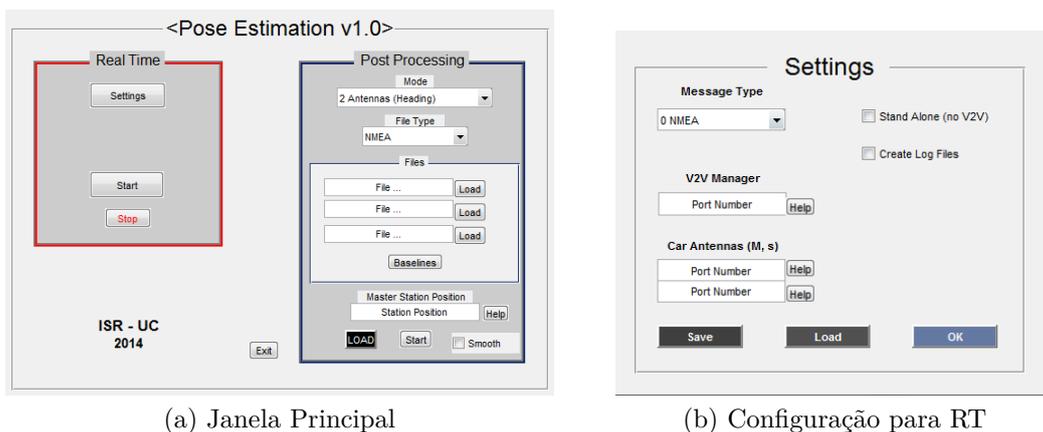
O processo passa depois por uma sincronização através do *timestamp* (atributo de cada objecto) que integra cada observação. Esta sincronização dá origem a uma matriz de observações (*llaObsMatrix*) que tem por cada linha as coordenadas de cada antena disponível em determinado instante de tempo, ou seja ( $t, lla_{vm}, lla_{vs}, lla_{v2}$ ).

Com as observações sincronizadas é possível fazer a transformação de coordenadas para o sistema ENU, dando origem à matriz *enuObsMatrix*, que contém por linha as coordenadas das antenas disponíveis no plano ENU, com centro na coordenada da antena principal do veículo.

A matriz  $enuObsMatrix$  serve de entrada ao sistema de validação, que implementa os métodos discutidos em 4.1.2. Sempre que dada observação não cumpra os requisitos previamente estabelecidos pelo utilizador é eliminada e a matriz de entrada atualizada de forma a que no final só contenha observações consideradas válidas.

Por fim, o processo de estimação utiliza a informação da matriz de observações  $enuObsMatrix$  para estimar os ângulos de orientação do veículo, seguindo o método discutido em 4.1.3. O resultado é outra matriz que contém os ângulos de rotação estimados, a posição absoluta do veículo e o respectivo *timestamp*. Os resultados são guardados em ficheiro e mostrados ao utilizador recorrendo a gráficos com os ângulos em função do tempo.

Na figura 4.11 está representada a janela principal da *toolbox* desenvolvida. Está dividida nos dois modos de operação: com a introdução de ficheiros em modo de pós-processamento ou em tempo real através das ligações por TCP/IP socket. A figura ao lado mostra o menu de configuração do sistema para funcionamento em tempo real.



(a) Janela Principal

(b) Configuração para RT

Figura 4.11: *Screenshots* da *toolbox* MATLAB desenvolvida

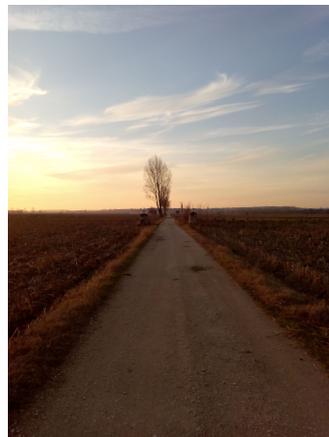
# Capítulo 5

## Testes e Resultados

Neste capítulo são apresentados os testes efetuados e os resultados obtidos. Começa-se por testar o sistema de comunicação V2V e posteriormente o sistema de localização desenvolvido, SLC. O local de testes escolhido é um campo aberto de cultivo, com poucas árvores e bastante espaçadas entre si. O piso é em terra batida, com algumas irregularidades. As razões que levaram à escolha deste terreno prendem-se com o facto de não haver fontes de *multipath* nas redondezas, ausência de circulação que pudesse perturbar os testes e porque permite percorrer distâncias relativamente elevadas (+600m) em linha recta, facilitando os testes ao sistema de comunicação. A figura 5.1 mostra o local de testes escolhido e o local de instalação das RSU.



(a) RSU e veículo de teste



(b) Área de testes

Figura 5.1: Área de testes e local de instalação das RSU

### 5.1 Sistema de comunicação V2V / V2I

De forma a estudar e comprovar a validade do sistema de comunicação escolhido (router e pilha protocolar utilizada no GCDC e descrita no capítulo anterior)

foi desenvolvida uma aplicação de medição de RTT entre dois nós de comunicação. Neste teste é medido o tempo *back-to-back*, ou seja, inclui a construção da mensagem e o seu envio no lado emissor, (percorrendo toda a pilha protocolar) e posteriormente a sua descodificação quando é devolvida pelo nó retransmissor. De grosso modo, o medidor de RTT é composto por dois programas. O emissor cria um *socket* de comunicação com o router GCDC, prepara uma mensagem CAM com uma identificação numérica sequencial e publica-a na rede. Fica à espera que o retransmissor a envie de volta e calcula o RTT. O programa retransmissor só recebe a mensagem e reenvia, sem a alterar.

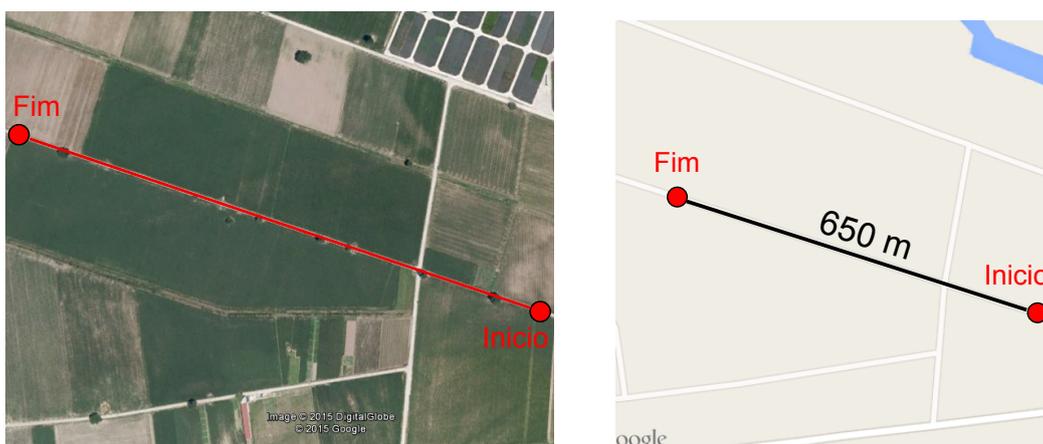


Figura 5.2: Percurso de teste para o sistema de comunicação

Pretende-se com o medidor de RTT determinar qual a variação dos tempos de recepção das mensagens com a distância e qual o alcance do sistema de comunicação. Para proceder ao teste, o nó retransmissor foi montado num veículo enquanto que o nó emissor se manteve fixo. Foi-se aumentando a distância até deixar de haver comunicação entre os dois nós. A figura 5.2 mostra o trajeto percorrido no decorrer do teste.

Os resultados obtidos mostram que o RTT não tem qualquer correlação com a distância (figura 5.3), mantém-se relativamente constante ao longo do percurso com um valor médio de  $112ms$  e desvio padrão  $6.45ms$ . A tabela 5.1 resume os resultados do teste de RTT efectuado.

Resultados do teste de RTT (ms)	
Tempo médio	112
Desvio Padrão	6.45

Tabela 5.1: Resultados do teste de RTT

De seguida testou-se o número de mensagens perdidas, ou por outro lado, o número de mensagens recebidas pelo transmissor a diferentes distâncias, como ilustrado na figura 5.4. É facilmente observável que o sistema de comunicação tem um bom desempenho a  $50m$  mas decai rapidamente para valores de *Hit Rate* a rondar os 50% até aos  $300m$ .

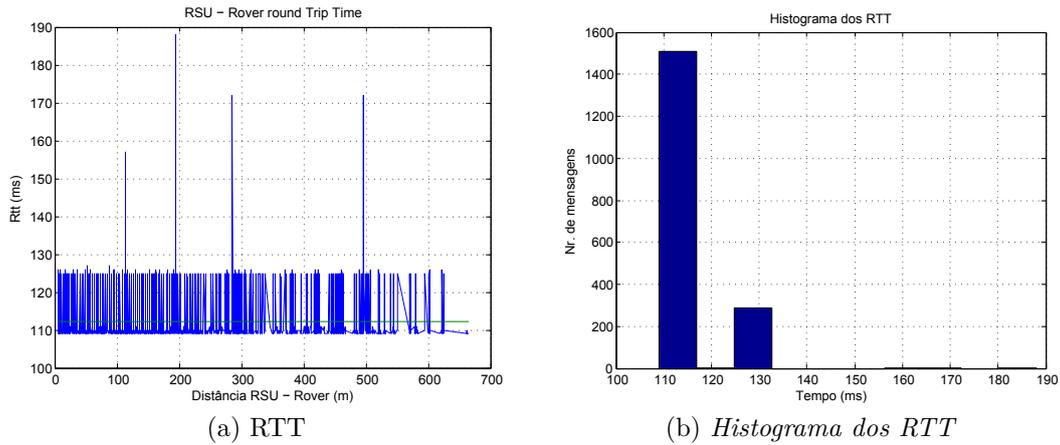


Figura 5.3: Resultados dos testes ao sistema de comunicação

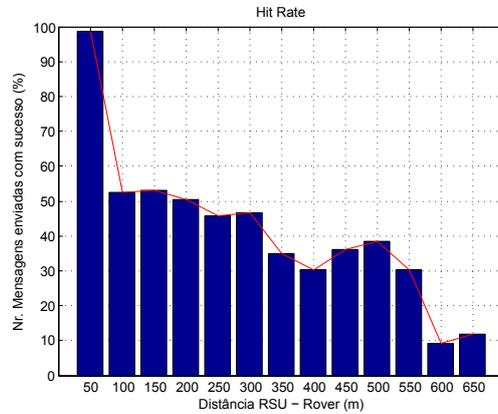


Figura 5.4: Percentagem de mensagem devolvidas

Em conjunto com este teste, foi medido o *ping* entre os routers GCDC obtendo valores na ordem dos  $2ms$ . Viu-se também que este valor não está correlacionado com a distância, mantendo-se constante ao longo do teste.

Apesar deste assunto não ter sido explorado, a disparidade entre os valores de *ping* e de RTT levam a crer que existe um *bottleneck* na camada de aplicação do protocolo GCDC. Uma hipótese colocada para justificar este atraso foi o tempo de criação das mensagens. Foram medidos os tempos de criação das CAM e verificou-se que o processo demora menos de  $1ms$  invalidando assim a hipótese colocada. Para mitigar este problema, será provavelmente necessário modificar a estrutura interna do sistema de comunicação.

## 5.2 Estimação da orientação

O sistema de estimação da orientação foi testado no mesmo cenário que o sistema de comunicação. Foram adicionados dois receptores GPS, colocados longitudinalmente na cobertura do veículo e uma RSU no local indicado na figura 5.5.

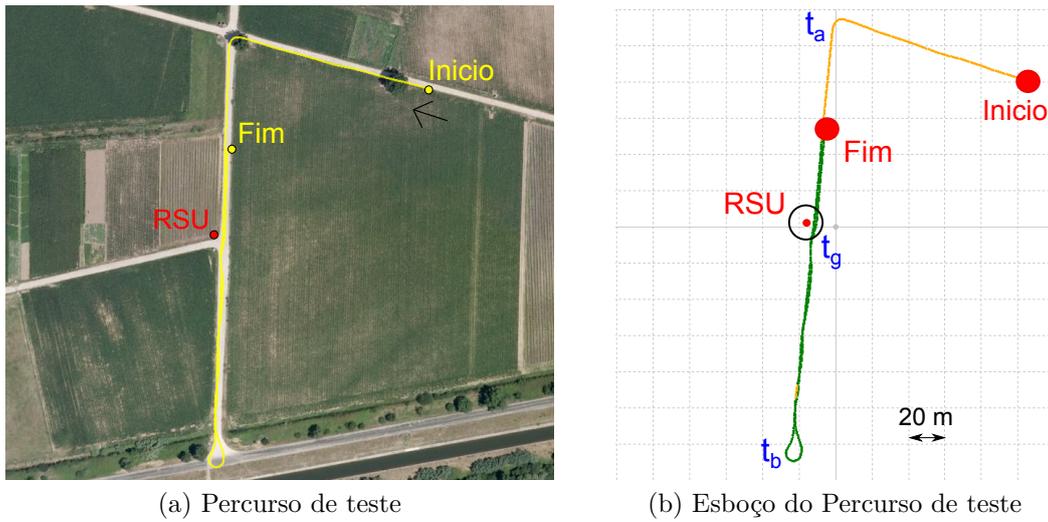


Figura 5.5: Teste ao sistema de estimação da Orientação

O teste consiste no percurso indicado na figura 5.5 com o veículo a iniciar a marcha em direção a Noroeste, virando para Sul em  $t_a$ , aproximando-se a primeira vez da RSU em  $t_{g1}$ . Segue nesta direção até  $t_b$ , fazendo depois uma inversão de marcha reaproximando-se da RSU em  $t_{g2}$ , acabando o percurso com direção a Norte. Todo o percurso é efetuado a velocidade baixa ( $8 - 10\text{Km/h}$ ) e relativamente constante.

Depois da fase de posicionamento relativo, o SLC faz a verificação por *baselines*. Para tal é necessário o conhecimento da *baseline* real ( $br_{mv}$ ), e o valor de tolerância admitida ( $\sigma_{b1}$ ). Neste teste, a *baseline* real foi medida e corresponde a 1.27 metros. O parâmetro de tolerância utilizado foi  $\sigma_{b1} = 0.08\text{m}$ . Na tabela seguinte 5.6 apresentam-se os valores médios da *baseline* entre as antenas do veículo, antes e depois do processo de verificação.

Baseline estimada entre antenas do veículo		
Verificação	Antes	Depois
Nr. Observações	1125	984
Média (m)	1.298	1.279
Desvio Padrão (m)	0.091	0.014

Figura 5.6: Média e Desvio Padrão da *baseline* estimada após verificação

É possível constatar que o módulo de verificação rejeitou 141 observações, o que equivale a aproximadamente 12.5% de todas as observações. Estimções da *baseline* próximas do valor real não significam, por si só, que a estimativa dos ângulos de orientação vai ser boa. É, no entanto um bom indicador que o sistema de posicionamento relativo forneceu observações afetadas com pouco erro.

Isto significa que há um compromisso claro entre a confiança nas soluções de orientação que o SLC fornece e o parâmetro de filtragem  $\sigma_{b1}$ . De forma prática, se este parâmetro for muito pequeno, há o risco do módulo de verificação de

observações filtrar demasiadas amostras incapacitando a estimação dos ângulos de orientação. Se por outro lado, o parâmetro  $\sigma_{b1}$  for muito elevado, há o risco do SLC começar a devolver soluções de orientação com muito erro associado. Neste teste, apesar dos 12% de observações rejeitadas pelo módulo de verificação, só em 3 segundos o SLC não devolveu uma solução de orientação: do segundo 140 ao 142 e no segundo 152. É importante que o receptor tenha um período de amostragem curto de forma a aumentar a probabilidade de não haver falhas no sistema.

Como discutido em 4.1.3 para a estimação dos ângulos *Yaw/Heading* e *Pitch* bastam os receptores do veículo. A figura 5.7 ilustra os resultados obtidos para o ângulo *Yaw*, comparando-os com o *ground truth* utilizado (*Xsens MTi-G-700*). Foram também adicionadas ao gráfico duas marcas ( $t_a$  e  $t_b$ ) que são os instantes de tempo correspondentes às mudanças de direção, ilustradas na figura 5.5.

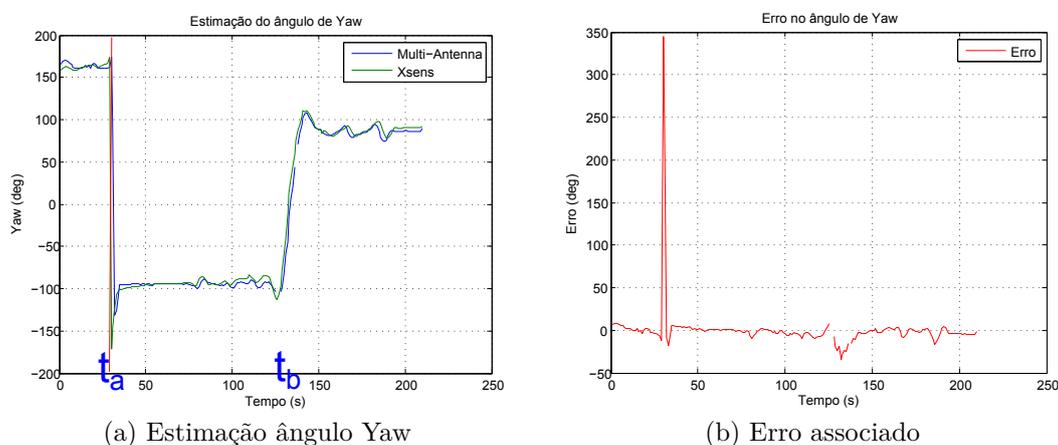


Figura 5.7: Resultados da estimação do ângulo *Yaw* e erro associado.

Os resultados mostram que o SLC é competente na estimação dos ângulos de *Yaw* conseguindo um erro médio na ordem dos 7 graus no percurso efetuado. É perceptível em ambos os gráficos as alturas em que o sistema deixa de fornecer estimações (o sistema de verificação filtra todas as observações). O pico de erro acontece numa transição, podendo ser explicado na medida em que o método de fusão do *Xsens* é bastante mais rápido que o sistema de multi-antenas, tornando-o muito mais sensível a variações de direção bruscas.

A figura 5.8 apresenta a estimação do ângulo de *Pitch* e o erro associado, quando comparado com o *Xsens*.

O erro varia 2 a 3 graus, com o erro médio a rondar os 0.5 graus. Observando os gráficos nota-se, no entanto, um pequeno atraso em relação ao *ground truth*, que pode ser explicado pela ação de *smoothing* a 1 segundo. Apesar de não ser muito perceptível nestes gráficos, o sistema continua a não conseguir fornecer estimações de *Pitch* durante os 3 segundos onde não há observações disponíveis.

Para a estimação do ângulo de *Roll* é utilizada informação proveniente da RSU, como discutido no capítulo anterior. O valor de *Roll* só tem significado caso o veículo e a RSU se encontrem próximos. Para este teste, o valor de

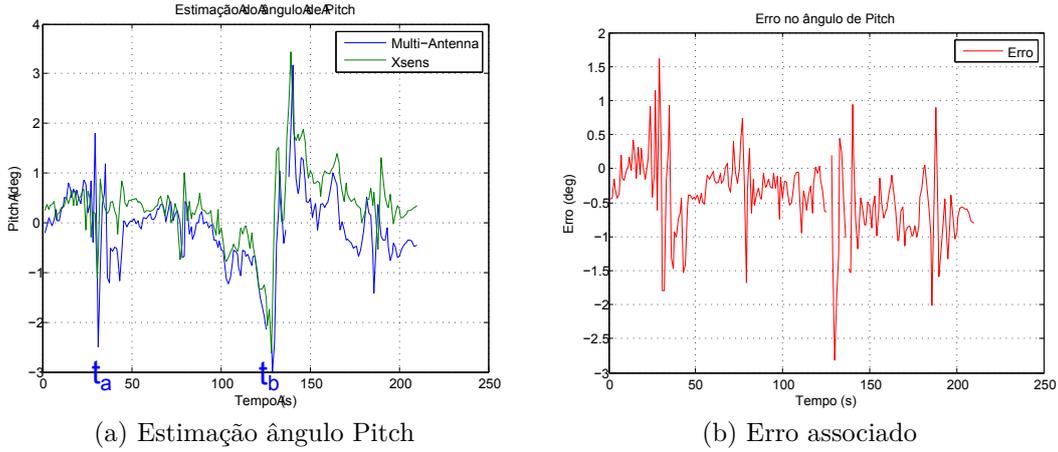


Figura 5.8: Resultados da estimação do ângulo *Pitch* e erro associado.

distância escolhido para que o SLC estime o ângulo de *Roll* foi de 10 metros. Como consequência direta, só numa pequena parte do percurso (nas imediações da RSU) é que o ângulo de *Roll* é estimado. A figura 5.9 mostra a estimação do ângulo de *Roll* nas duas aproximações à RSU. Uma primeira aproximação acontece passados cerca de 90 segundos após o início da marcha no sentido Norte-Sul com uma duração de 10 segundos. Apesar da informação relativa à RSU estar disponível durante um intervalo de tempo mais longo, (basta estar ao alcance do sistema V2V) a estimação do ângulo de *Roll* só acontece quando o veículo está nas imediações da RSU. A segunda aproximação tem praticamente a mesma duração, já que o veículo exibe uma velocidade relativamente constante, acontecendo por volta dos 200 segundos. De acordo com os gráficos da figura 5.9 é perceptível um *offset* de cerca de 2.5 graus do SLC para o *ground truth*. Como este *offset* se mantém relativamente constante ao longo das duas aproximações, leva a crer que é um erro sistemático com possível origem nas medições de altura efetuadas à cobertura do veículo e ao receptor da RSU. Estas medições de altura são necessárias para que, na fase de estimação do ângulo *Roll*, se tenha em conta a diferença de altura entre os receptores do veículo e da RSU. Apesar do *offset*, o sistema de estimação consegue um erro médio na ordem dos 2.8 graus.

A tabela seguinte (5.2) sumariza os erros médios obtidos nos 3 ângulos R-P-Y ao longo dos 650m do percurso de teste (figura 5.5).

Erros médios de estimação (graus)	
Roll	2.77
Pitch	0.54
Yaw	7.13

Tabela 5.2: Erros médios de Estimação dos ângulos R-P-Y

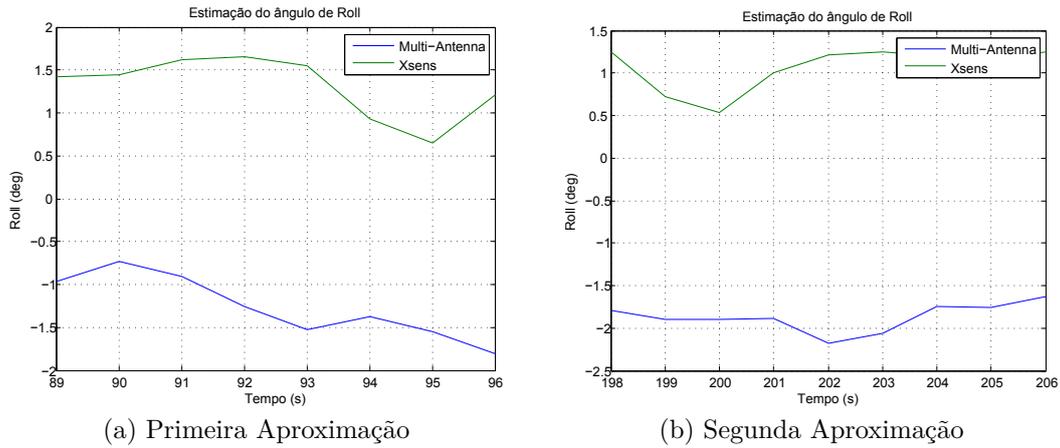


Figura 5.9: Resultados da estimação do ângulo *Roll*

### 5.3 Posição absoluta

De acordo com o discutido no capítulo anterior, a estimativa da posição do veículo é conseguida através dum processo de posicionamento relativo (RTK) entre a antena principal do veículo ( $A_c$ ) com a antena principal fixa ( $A_M$ ).

Como *ground truth* foi utilizado o sistema *TOPCON HiperPro*, um sistema RTK de elevada precisão, composto por dois receptores: um receptor fixo suportado por tripé, e outro móvel que foi acoplado ao veículo de testes, tal como indica a figura 5.10.



(a) Receptor Base



(b) Receptor *rover* montado à direita do veículo

Figura 5.10: Instalação do *TOPCON HiperPro*

O percurso escolhido é no mesmo local de testes, bastante similar com o percurso utilizado para testar o sistema de determinação de orientação (figura 5.11). Está também marcada a posição onde se dispôs a antena principal do *TOPCON*.

A figura 5.11b mostra a posição da antena principal do veículo ao longo do percurso. De notar que a parte inicial e final do percurso se encontra marcada

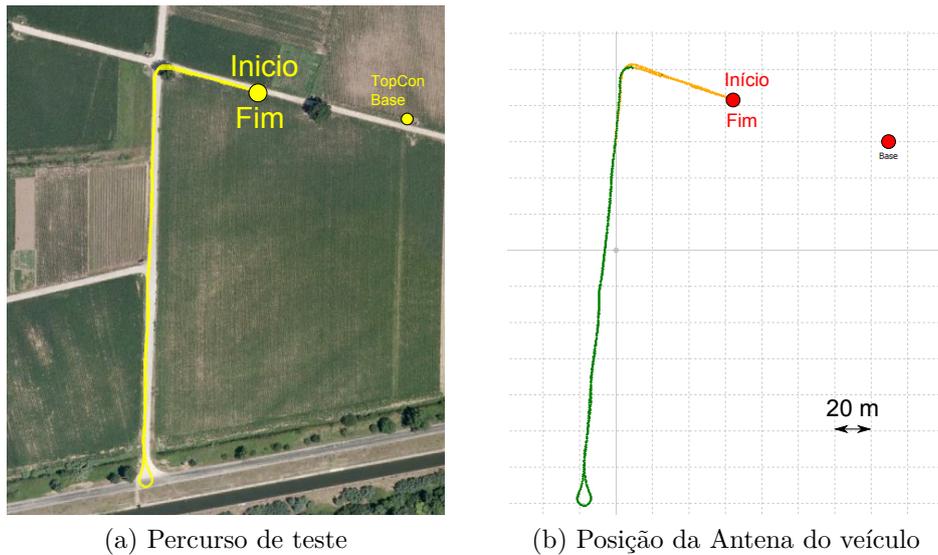


Figura 5.11: Percurso de teste efectuado

a laranja e o restante a verde. A diferença de cores ao longo de percurso serve para ilustrar o estado da resolução das ambiguidades inteiras de fase.

Recordando a secção 3.2.1, as ambiguidades inteiras têm que ser calculadas e fixadas. Enquanto isso não acontecer há uma degradação de desempenho no posicionamento. Na figura 5.11b pontos a verde significam ambiguidades inteiras resolvidas e fixadas (*fixed*) para todos os satélites, por outro lado pontos a laranja indicam uma solução de vírgula flutuante (*float*), denotando uma degradação de desempenho.

Na figura seguinte (5.12) apresentam-se os resultados do SLC na estimação da posição do veículo.

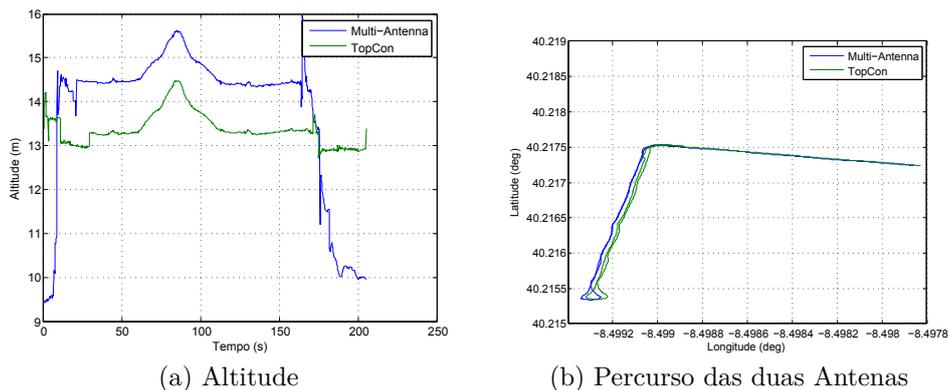


Figura 5.12: Resultados da altitude e Latitude em função da Longitude

Fazendo uma análise aos gráficos da figura 5.12, nota-se um *offset* em latitude e longitude, podendo em parte ser explicado pela distância que separa as antenas no *setup* experimental. Em relação à altura, destacar 3 fases distintas: a primeira até sensivelmente aos 10 segundos, a segunda até aos 170 segundos e por fim a

última, até acabar o teste.

Na primeira fase, o sistema de posicionamento ainda não resolveu todas as ambiguidades inteiras o que provoca uma degradação do desempenho a nível de altura. Na segunda fase, apesar do *offset* demonstrado, o sistema tem um comportamento idêntico ao *TOPCON*. Na última fase, por obstrução de um satélite ou chegada de um novo ao horizonte, o sistema tem que recalcular as ambiguidades e há outra perturbação no desempenho.

A tabela 5.13 sumariza os erros médios ao longo de percurso de teste efetuado.

<b>Localização Absoluta</b>		
	<b>Planar</b>	<b>Total</b>
Erro Médio (m)	2.485	2.985
Desvio Padrão (m)	0.776	0.683

Figura 5.13: Erro médio e desvio padrão associado ao percurso de teste

Foram realizados testes adicionais ao SLC (apresentados no apêndice A), com o objectivo de aferir o desempenho do sistema noutra tipo de ambiente e com condições climatéricas mais degradadas. Outro objectivo dos testes foi estudar o efeito que a posição relativa da antena auxiliar tem na fase de estimação do ângulo de *Roll*, ou seja, qual o comportamento do sistema na situação em que a antena auxiliar está perto de ficar colinear com as antenas do veículo.

## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho Futuro

Nesta dissertação foi proposta a implementação de um sistema de localização (estimação da posição e orientação), baseado numa configuração multi-receptor GNSS e comunicação V2V. Este sistema faz uso de técnicas de posicionamento relativo com dupla diferenciação, vulgarmente designado RTK e baseia o seu processo de comunicação na norma IEEE 802.11p. Esta proposta visa fornecer uma solução alternativa de baixo custo aos sistemas de localização existentes, sem uma acentuada perda de desempenho.

O sistema de comunicação é parte crucial nas ações colaborativas do veículo. O facto de ter sido utilizada uma arquitetura extremamente modular, traz as vantagens inerentes a ter um sistema fechado. Todavia, complica o processo de correção de problemas ou introdução de melhorias. Para esta aplicação em particular, considera-se aceitável o *overhead* temporal (cerca de 50ms) que a pilha protocolar do GCDC introduz. Porém, pode tornar-se uma limitação em sistemas com taxas de processamento mais rápidas. Uma vantagem em utilizar posicionamento relativo com antenas próximas é a eliminação de ruído atmosférico. O sistema implementado é relativamente robusto a condições atmosféricas como nebulosidade moderada - não foi testado em condições chuvosas ou nebulosidade intensa. No entanto, é de esperar um decréscimo de desempenho quando há fontes de *multipath* próximas, como edifícios ou árvores altas, uma vez que erros de posicionamento relativamente pequenos, na ordem dos decímetros, podem propagar erros grosseiros no cálculo dos ângulos R-P-Y. Para atenuar este efeito, foi desenvolvido o sistema de validação de observações por *baseline*, que filtra as observações que podem provocar estimativas com erros elevados. Um inconveniente óbvio é que, em condições muito adversas, é possível que várias observações seguidas não cumpram os requisitos e sejam, portanto, descartadas. Nesta situação, o sistema deixa de fornecer os ângulos de orientação até que novas observações sejam consideradas válidas. Por esta razão, é importante que o período de amostragem dos receptores seja elevado, de forma a aumentar a probabilidade de haver observações válidas em ambientes adversos, ou como alternativa, implementar um algoritmo capaz de fornecer soluções mesmo quando não há observações disponíveis.

Foi alcançado o objectivo de manter o custo total do *setup* baixo, evitando-

se os custos proibitivos dum sistema de localização de performance *automotive grade*. A título de exemplo, o conjunto de antenas, receptores e módulo de comunicação tem um valor bastante reduzido em comparação com os sistemas utilizados como *ground-truth*. Resta referir que o sistema desenvolvido provou ser capaz de estimar os ângulos de rotação R-P-Y associados ao veículo e a sua posição absoluta com erros admissíveis no decorrer do percurso de teste. Foram realizados testes noutra ambiente, com condições climatéricas mais degradadas e o desempenho do sistema manteve-se dentro dos objetivos traçados. Foi também estudada a limitação geométrica na estimação do ângulo de *Roll* e possíveis formas de contornar esta limitação. Destaca-se a necessidade de realizar testes adicionais em ambiente urbano e condições climatéricas muito adversas, de forma a aferir com exatidão quais as potencialidades reais do SLC.

Por fim, apresentam-se as seguintes propostas para trabalho futuro:

- Teste e avaliação da performance do sistema em ambiente urbano.
- Alteração do método de estimação de forma a utilizar simultaneamente informação de vários agentes nas proximidades.
- Introdução das covariâncias do EKF do RTKLIB no processo de estimação.
- Migração do sistema de forma a ser integrado em ROS.

# Bibliografia

- [1] Wikipedia, *Earth-centered inertial*, June 2014. [http://en.wikipedia.org/wiki/Earth-centered\\_inertial](http://en.wikipedia.org/wiki/Earth-centered_inertial).
- [2] Wikipedia, *Geodetic datum*, Nov. 2014. [http://en.wikipedia.org/wiki/Geodetic\\_datum](http://en.wikipedia.org/wiki/Geodetic_datum).
- [3] E. Realini, *goGPS: free and constrained relative kinematic positioning with low cost receivers*. PhD thesis, Politecnico di Milano, Feb. 2009.
- [4] J. de Jongh, *GCDC Communications Stack: Building and installing the CALM FAST router*, 3.0 ed., 2014.
- [5] L. Bento, R. Parafita, and U. Nunes, “Intelligent traffic management at intersections supported by v2v and v2i communications,” in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*, pp. 1495–1502, Sept 2012.
- [6] B. Liu, M. Adams, and J. Ibanez-Guzman, “Multi-aided inertial navigation for ground vehicles in outdoor uneven environments,” in *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pp. 4703–4708, April 2005.
- [7] A. Ndjeng, S. Glaser, and D. Gruyer, “A multiple model localization system for outdoor vehicles,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 2007 IEEE*, pp. 1050–1055, June 2007.
- [8] W. Wang and D. Wang, “Land vehicle navigation using odometry/ins/vision integrated system,” in *Cybernetics and Intelligent Systems, 2008 IEEE Conference on*, pp. 754–759, Sept 2008.
- [9] I. Skog and P. Handel, “In-car positioning and navigation technologies a survey,” *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp. 4–21, March 2009.
- [10] B. Barshan and H. Durrant-Whyte, “Inertial navigation systems for mobile robots,” *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 328–342, Jun 1995.

- [11] G. Dissanayake, S. Sukkarieh, E. Nebot, and H. Durrant-Whyte, “The aiding of a low-cost strapdown inertial measurement unit using vehicle model constraints for land vehicle applications,” *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 731–747, Oct 2001.
- [12] C. R. CARLSON, J. C. GERDES, and J. D. POWELL, “Error sources when land vehicle dead reckoning with differential wheelspeeds,” *Navigation*, vol. 51, no. 1, pp. 13–27, 2004.
- [13] N. Drawil, H. Amar, and O. Basir, “Gps localization accuracy classification: A context-based approach,” *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 262–273, March 2013.
- [14] P. Delmas, C. Tessier, C. Debain, and R. Chapuis, “Gnss bias correction for localization systems,” in *Information Fusion, 2008 11th International Conference on*, pp. 1–6, June 2008.
- [15] L. Petit and J. Ayadi, “Mems-based reconfigurable antenna for enhanced gnss localization,” in *Design and Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era, 2008. DTIS 2008. 3rd International Conference on*, pp. 1–6, March 2008.
- [16] D. M. Truong and T. H. Ta, “Development of real multi-gnss positioning solutions and performance analyses,” in *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2013 International Conference on*, pp. 158–163, Oct 2013.
- [17] M. Uenoyama, H. Nakamura, and H. Nishitani, “Novel position estimation for gps and low-cost ins fusion,” in *Position, Location, And Navigation Symposium, 2006 IEEE/ION*, pp. 630–635, April 2006.
- [18] J. Gao, M. Petovello, and M. Cannon, “Development of precise gps/ins/wheel speed sensor/yaw rate sensor integrated vehicular positioning system,” in *Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation (ION NTM’06), Monterey, CA*, pp. 780–792, 2006.
- [19] S. Y. Cho and W.-S. Choi, “Robust positioning technique in low-cost dr/gps for land navigation,” *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 55, pp. 1132–1142, Aug 2006.
- [20] P. Davidson, J. Hautamäki, J. Collin, and J. Takala, “Improved vehicle positioning in urban environment through integration of gps and low-cost inertial sensors,” in *Proceedings of the the European Navigation Conference (ENC’09)*, 2009.
- [21] Z. Wu, M. Yao, H. Ma, W. Jia, and F. Tian, “Low-cost antenna attitude estimation by fusing inertial sensing and two-antenna gps for vehicle-mounted satcom-on-the-move,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 62, pp. 1084–1096, March 2013.

- [22] J. Britt, D. Broderick, D. Bevly, and J. Hung, “Dynamic testing and calibration of gaussian processes for vehicle attitude estimation,” in *Machine Learning and Applications and Workshops (ICMLA), 2011 10th International Conference on*, vol. 1, pp. 124–128, Dec 2011.
- [23] D. Gu and N. El-Sheimy, “Heading accuracy improvement of mems imu/dgps integrated navigation system for land vehicle,” in *Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION*, pp. 1292–1296, May 2008.
- [24] U. Maeder and M. Morari, “Attitude estimation for vehicles with partial inertial measurement,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 60, pp. 1496–1504, May 2011.
- [25] B. Wang, C. Zhai, and X. Zhan, “Gps-based attitude determination raim method study and optimize,” in *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on*, pp. 4561–4565, Aug 2009.
- [26] L.-Y. Hsu and T.-L. Chen, “Applying a three-antenna gps and suspension displacement sensors to a road vehicle,” in *Sensors, 2009 IEEE*, pp. 1593–1597, Oct 2009.
- [27] G. Karagiannis, O. Altintas, E. Ekici, G. Heijenk, B. Jarupan, K. Lin, and T. Weil, “Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions,” *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 13, pp. 584–616, Fourth 2011.
- [28] R. Parker and S. Valaee, “Vehicle localization in vehicular networks,” in *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006 Fall. 2006 IEEE 64th*, pp. 1–5, Sept 2006.
- [29] W.-Y. Lin, M.-W. Li, K.-C. Lan, and C.-H. Hsu, “A comparison of 802.11 a and 802.11 p for v-to-i communication: A measurement study,” in *Quality, Reliability, Security and Robustness in Heterogeneous Networks*, pp. 559–570, Springer, 2012.
- [30] I. Skog, *Low-Cost Navigation Systems: A Study of Four Problems*. PhD thesis, KTH, School of Electrical Engineering, Dec. 2009.
- [31] “Intelligent transport systems (ITS); vehicular communications; basic set of applications; part 2: Specification of cooperative awareness basic service.”
- [32] MathWorks, *Documentation: atan2*, Dec. 2014. <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2.html>.
- [33] u-blox AG, *EVK-6 evaluation kits*, June 2009. [www.u-blox.com/en/evaluation-tools-a-software/gps-evaluation-kits/evk-6-evaluation-kits.html](http://www.u-blox.com/en/evaluation-tools-a-software/gps-evaluation-kits/evk-6-evaluation-kits.html).

- [34] Eric Koenders, "CALM FAST router, design, v0.1," Mar. 2010.
- [35] A. Abdurakhmanov, *BinaryNotes: Developers Guide*, Nov. 2014. <http://bnotes.sourceforge.net/BinaryNotes.pdf>.
- [36] G. Baddeley, *GPS - NMEA sentence information*, June 2001. <http://aprs.gids.nl/nmea/>.

# Apêndice A

## Testes adicionais ao SLC

Para o teste com dois veículos foi escolhida a zona do iParque Coimbra, já que está dotada de boas condições para os diferentes testes ao SLC. É possível organizar uma grande variedade de percursos. O ambiente circundante, com algumas árvores e edifícios, confere realismo aos cenários de teste. A figura seguinte ilustra o ambiente de testes ao SLC e os veículos utilizados, com o devido *setup* experimental.



Figura A.1: Ambiente de testes e *setup* experimental

### A.1 Teste 1

O primeiro teste consistiu no percurso assinalado na figura A.2. O objectivo foi testar o desempenho do SLC na estimação dos ângulos de orientação e localização absoluta num cenário onde há veículos a cruzar com alguma distância lateral (cerca de 25m). De seguida mostram-se os resultados obtidos durante o percurso de duas voltas ao circuito da figura A.2. Ambos os veículos percorrem o percurso no mesmo sentido, embora desfasados de forma a cruzarem-se nas rectas.

#### A.1.1 Estimação dos ângulos da orientação

Utilizou-se para parâmetro do sistema de verificação de *baseline* interna, 15cm. Com este parâmetro, o sistema de verificação por *baseline* interna do veículo

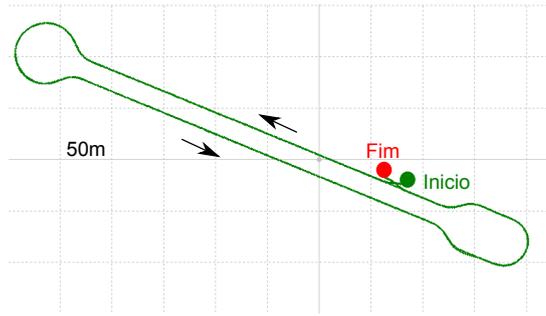


Figura A.2: Primeiro percurso de teste

filtrou 275 observações, cerca de um décimo do total. Como consequência, há períodos de tempo em que o SLC não fornece estimações. Como parâmetro para o sistema de verificação de *baseline* exterior (entre veículos) foi utilizado  $1m$ , com o sistema a fazer estimação do ângulo de *Roll* a partir dos  $25m$  de distância. Nas figuras seguintes apresentam-se os resultados de estimação para os ângulos de *Yaw* e *Pitch*.

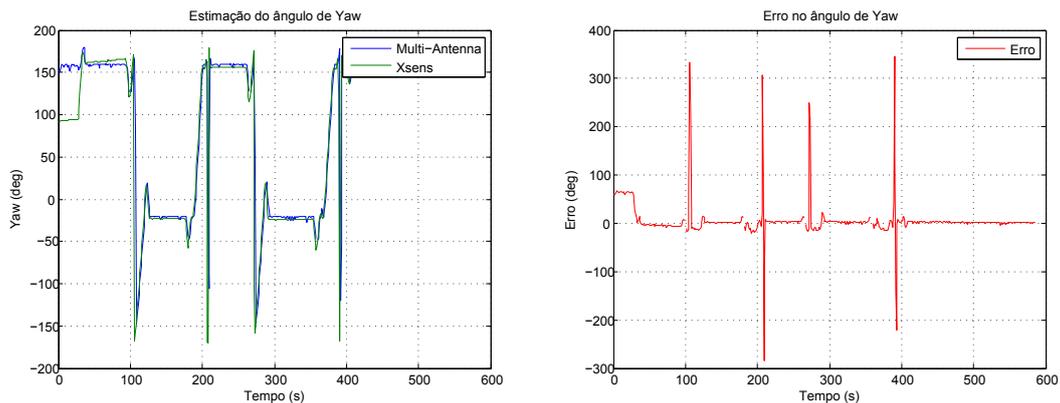


Figura A.3: Estimação do ângulo de *Yaw* e o erro associado

Foi argumentado no capítulo 4 deste trabalho que o ângulo de *Roll* estimado pelo SLC só teria validade no caso de se poder assumir que os veículos estão no mesmo plano. Neste sentido, o sistema desenvolvido só estima o ângulo quando o veículo estiver próximo. Neste teste, o valor de proximidade escolhido como limiar para que o SLC comece a estimar *roll* foi  $25m$ . Durante o percurso os veículos raramente estão a essa distância, com exceção de 3 situações: No início, em que estão estacionados como mostra a figura A.1, quando se cruzam e no final do teste.

O facto do teste começar com os veículos em linha é propositado. O objectivo é mostrar que o SLC é extremamente sensível em zonas em que o ponto auxiliar para o cálculo do *roll* está praticamente colinear com as antenas do veículo. Nesse caso, como os resultados obtidos ilustram, qualquer tipo de ruído provoca grande oscilação no processo de estimação.

Pelos gráficos da figura A.5 é perceptível que o SLC estima o ângulo de *Roll*

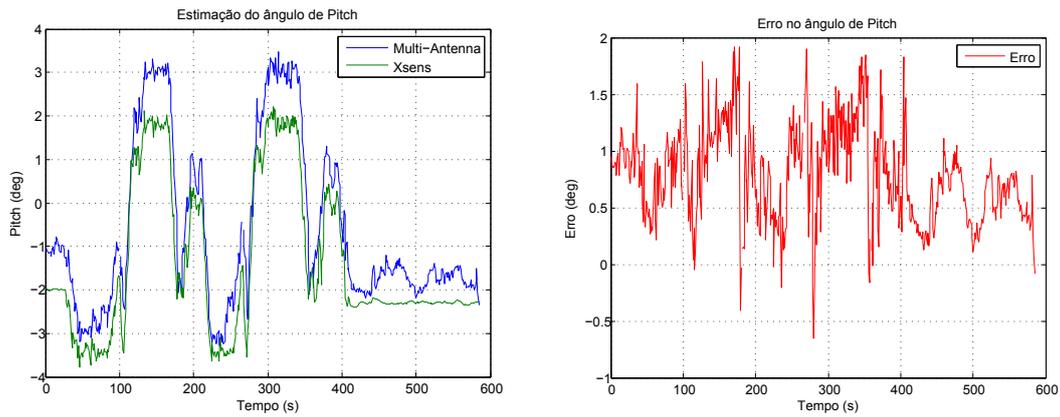


Figura A.4: Estimação do ângulo de *Pitch* e o erro associado

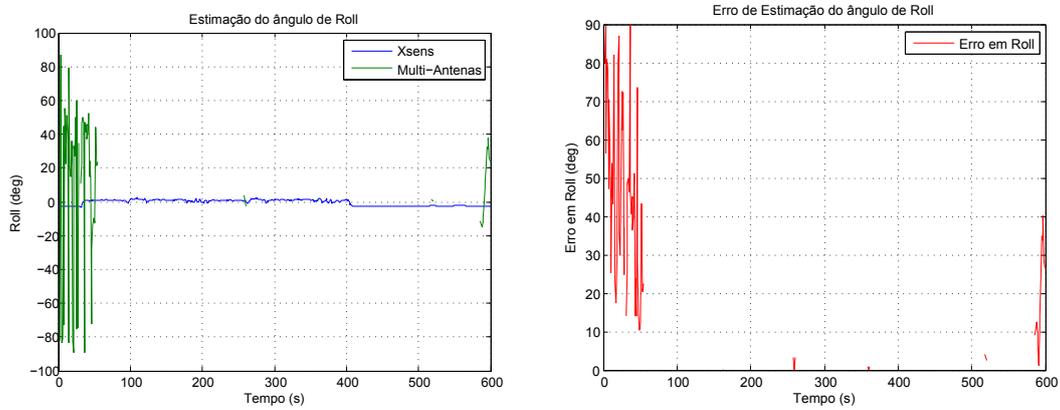


Figura A.5: Estimação do ângulo de *Roll* e o erro associado

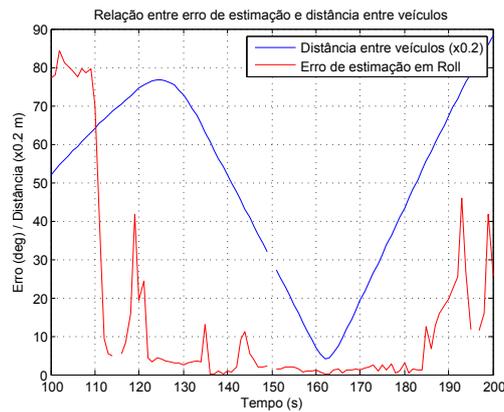


Figura A.6: Erro de estimação de *Roll* em função da distância entre veículos

no início e no final do percurso, onde a configuração de receptores está muito próxima de ser colinear e o sistema é muito sensível ao ruído. Estima também alguns pontos intermédios do circuito, quando os veículos se cruzam e a distância entre eles é mínima. De forma a clarificar a relação que existe entre o erro de

estimação do ângulo *Roll* e a distância entre os veículos, o gráfico da figura A.6 ilustra a variação do erro de estimação durante a primeira vez que os veículos se cruzam. À medida que os veículos se aproximam, até se cruzarem, o valor do erro de estimação tende a decrescer para valores muito baixos.

A tabela seguinte (A.3) sumariza os erros médios obtidos nos 3 ângulos R-P-Y ao longo do percurso de teste. De notar que o erro médio do ângulo de estimação de *Roll* é muito elevado, mas tal se deve aos extremos do percurso. Quando os veículos se cruzam, o SLC consegue estimar os ângulo *Roll* com erros bastante baixos.

Erros médios de estimação (graus)	
Yaw	16.64
Pitch	0.77
Roll	9.59

Tabela A.1: Erros médios de Estimação dos ângulos R-P-Y

### A.1.2 Estimação da posição absoluta

Os resultados obtidos na estimação da posição absoluta demonstram que o SLC, no percurso descrito na figura A.2 , conseguiu erros de posição inferiores a  $1m$ , quando comparado com o *TOPCON Hyper Pro*. As figuras seguintes mostram a evolução do erro ao longo do teste e por fim, a tabela A.2 sumariza os valores médios de erro e desvio padrão conseguidos.

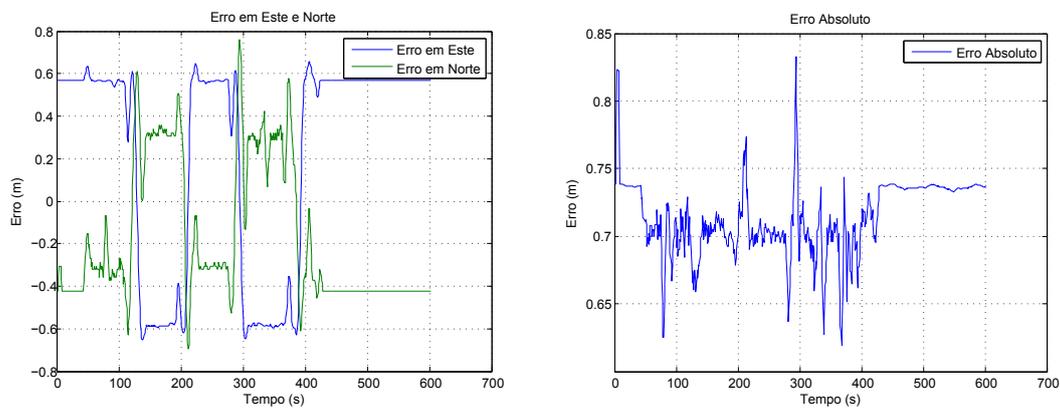


Figura A.7: Erros na estimação de posição: erro em Este, Norte e erro absoluto

Estimação de Posição (m)	
Erro médio	0.71
Desvio Padrão	0.074

Tabela A.2: Erro médio e desvio padrão do processo de estimação de posição

## A.2 Teste 2

O segundo teste consistiu no percurso assinalado pela figura A.8. Os objetivos do primeiro teste mantêm-se para este, com a diferença de testar o SLC num cenário em que os veículos se cruzam a uma distância curta (passam um pelo outro).

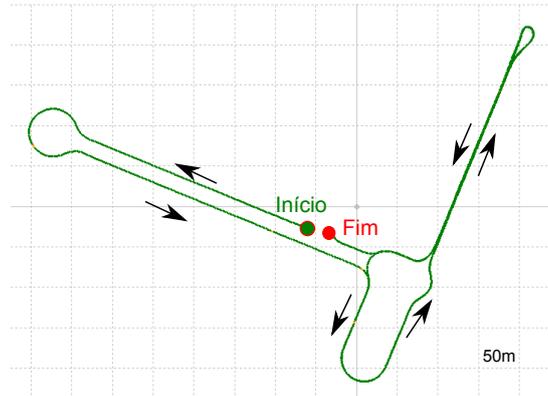


Figura A.8: Segundo percurso de teste

### A.2.1 Estimação dos ângulos da orientação

Recordando o teste anterior, em que colocando os veículos em linha tornava a estimação de *Roll* muito sensível a erro, é de esperar que neste teste aconteça o mesmo na situação de cruzamento aproximado dos veículos. Isto acontece porque a geometria do conjunto de receptores fica muito próxima de atingir uma singularidade (quando os três receptores forem colineares). Uma possível solução para ultrapassar este problema seria fazer a estimação de ângulo *Roll* apenas quando os veículos estivessem completamente em anti-paralelo. Para veículos com velocidades elevadas, tal seria muito difícil de realizar.

As figuras seguintes demonstram os resultados obtidos neste teste, para a estimação dos ângulos *Yaw* e *Pitch*.

Observando o gráfico da figura A.11, nota-se um desfasamento entre os resultados fornecidos pelo SLC e pelo sistema de *ground-truth*. Sendo que o veículo começou o segundo teste de posição idêntica ao primeiro, é de esperar que o ângulo de *Yaw* também se mantenha idêntico. De acordo com a figura A.3, tal acontece, o que apoia a hipótese de ser o sistema *Xsens* a não dar uma solução de orientação correta. Indagando sobre o funcionamento do *Xsens*, chega-se à conclusão que este utiliza o receptor GPS em conjunto com o IMU para calibrar a sua orientação. Dito isto, o *Xsens* precisa de algum tempo em movimento até estar apto para fornecer estimativas de orientação com baixo grau de erro, justificando assim o desfasamento existente entre o SLC e o *Xsens* no início de cada teste.

Na figura seguinte estão representados os resultados obtidos no processo de estimação do ângulo *Roll* ao longo do percurso. De forma a auxiliar a análise,

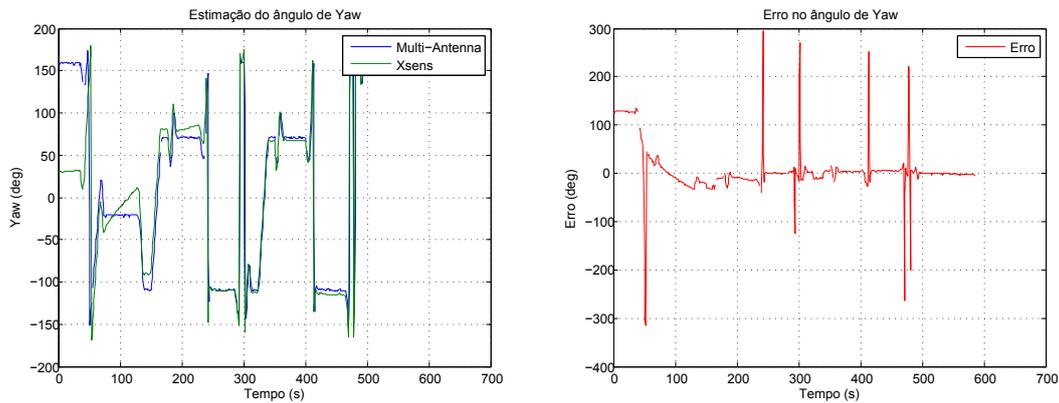


Figura A.9: Estimação do ângulo de *Yaw* e o erro associado, teste 2

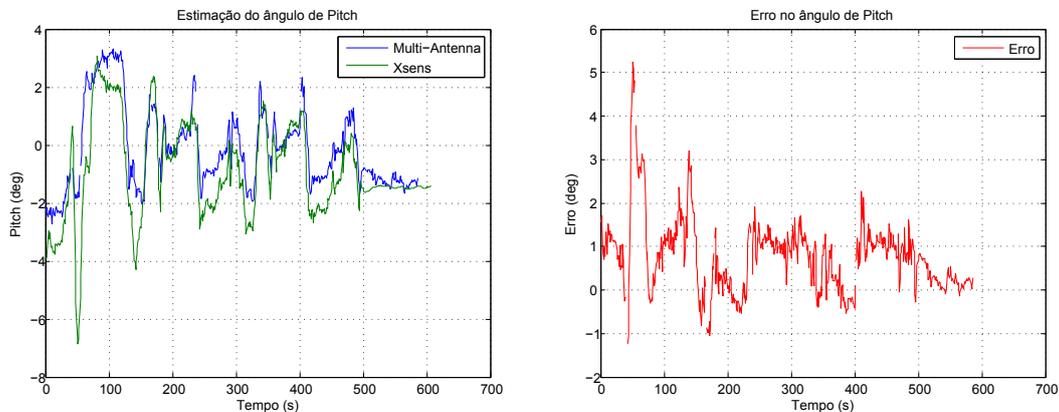


Figura A.10: Estimação do ângulo de *Pitch* e o erro associado, teste 2

foi introduzida a distância entre veículos (preto a tracejado) com uma escala ajustada aos dados já existentes.

Sempre que a geometria dos receptores tende a ficar colinear, caso do cruzamento entre veículos, é visível que o ângulo estimado de *Roll* tende a tomar valores extremos. Durante a primeira aproximação, que foi feita no mesmo trecho que o percurso do primeiro teste, o SLC estima o ângulo de *Roll* com erros aceitáveis (na ordem dos 5 graus). Durante a aproximação seguinte, onde os veículos se cruzam, o valor de *Roll* atinge valores extremos, ora positivos nos instantes antes de se cruzarem, ora negativos, nos instantes seguintes ao cruzamento. Este comportamento conduz a um desempenho muito deficiente do sistema de estimação, devendo ser evitado através da não utilização de informação proveniente de veículos com receptores próximos da zona de singularidade. Na tabela seguinte estão agrupados os erros médios estimados ao longo do percurso. O fraco desempenho do SLC na estimação do ângulo de *Roll* nas condições de teste, está bem patente no valor anormal de erro médio conseguido.

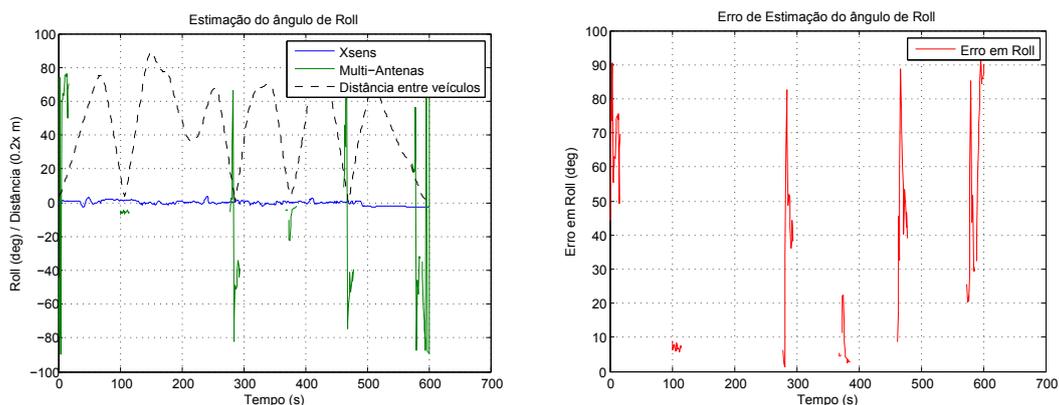


Figura A.11: Estimação do ângulo de *Roll* e o erro associado, teste 2

Erros médios de estimação (graus)	
Yaw	12.08
Pitch	0.86
Roll	40.70

Tabela A.3: Erros médios de Estimação dos ângulos R-P-Y, teste 2

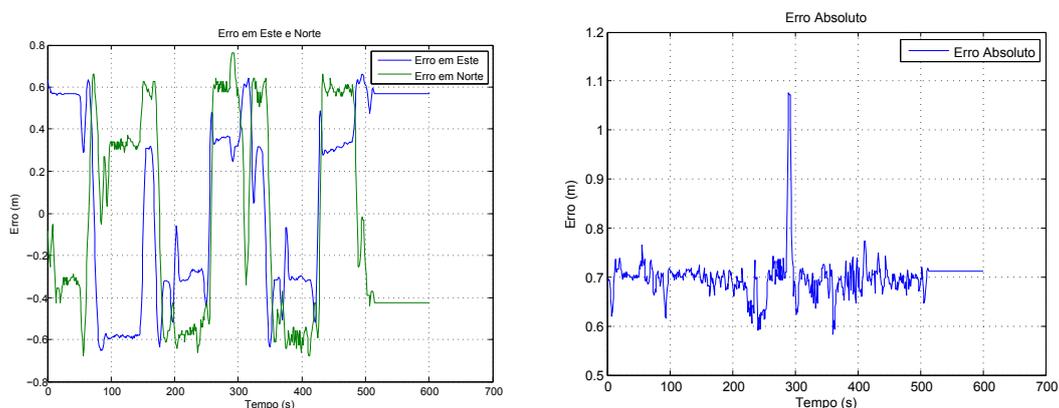


Figura A.12: Erros na estimação de posição: erro em Este, Norte e erro absoluto

## A.2.2 Estimação da posição absoluta

Neste teste, os resultados do processo de estimação de posição absoluta foram bastante parecidos com os do teste anterior. Na figura A.12 está ilustrada a evolução do erro ao longo do percurso de teste.

Estimação de Posição (m)	
Erro médio	0.698
Desvio Padrão	0.14

Tabela A.4: Erro médio e desvio padrão do processo de estimação de posição

# Apêndice B

## Descrição do Setup Experimental

Neste apêndice é descrito o *setup* experimental utilizado ao longo dos testes, bem como os sistemas utilizados como *ground truth*. A figura seguinte descreve os módulos de *hardware* utilizados e as suas ligações.

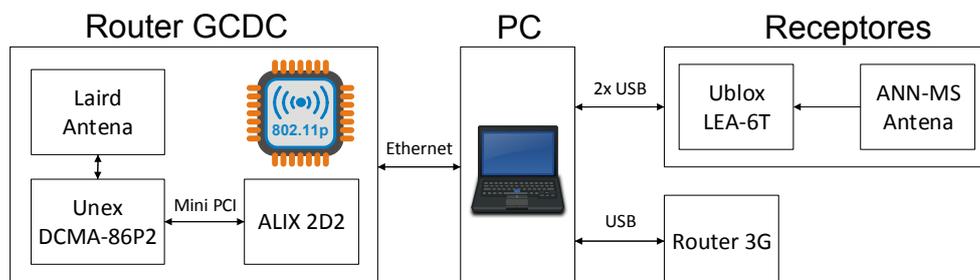


Figura B.1: Esquema do Setup Experimental

### B.1 Receptores GPS

Os receptores utilizados fazem parte do *kit* de avaliação *ublox* EVK-6T, constituído por um receptor LEA-6T (incorporado numa placa que implementa uma interface de comunicação USB, porta série e ligação à antena por cabo coaxial) e uma antena ativa de baixo custo, *ANN-MS*, como ilustrado na figura B.2. As características principais deste receptor estão ilustradas na tabela 4.1, a tabela seguinte complementa esta informação.

LEA-6T	
Frequência máxima de mensagem de navegação	5 Hz
Tempo de primeiro <i>fix</i> ( <i>cold start</i> )	26 s
Exatidão posicionamento horizontal	2.5 m

Tabela B.1: Características adicionais do receptor *LEA-6T*

Como *ground truth* do processo de estimação de posição foi utilizado o sistema RTK *TopCon HiperPro*. Constituído por 2 receptores de alto desempenho



Figura B.2: *Kit de avaliação ublox evk-6t*

com comunicação rádio, implementam um sistema RTK capaz de produzir resultados de posicionamento na ordem dos milímetros. A tabela B.2 resume as características principais do sistema *HiperPro*.

HiperPro	
Sinais adquiridos	L1, L2, C/A, P e GLONASS
Desempenho RTK	Horizontal: 10 mm Vertical: 15 mm
Frequência máxima	20 Hz
Antena	UHF integrada

Tabela B.2: Características principais do sistema *TopCon HiperPro*



Figura B.3: Sistema *TopCon HiperPro*

## B.2 Router GCDC

O sistema de comunicação V2V é constituído por um *router* GCDC. Estes *routers* foram desenvolvidos como sistema de comunicação V2V a utilizar no

concurso de navegação colaborativa (GCDC).

Os routers GCDC são baseados em sistemas *ALIX 2D2*. As *ALIX 2D2* são placas de formato pequeno otimizadas para roteamento sem fios e possuem ranhuras Mini PCI que permitem a ligação de placas *Unex DCMA-86P2*. As placas *Unex* integram o chip *Atheros AR5414-B2B*, um dos componentes mais importantes do sistema, pois as suas características permitem, através de um módulo modificado do *kernel* Linux, o funcionamento da rede sem fios IEEE 802.11p.

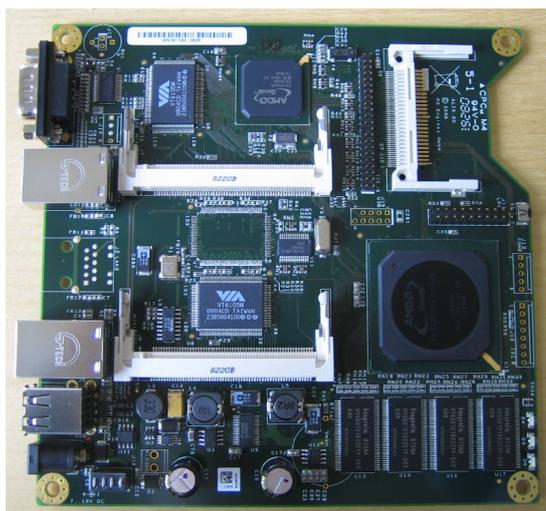


Figura B.4: Placa *ALIX 2D2*

Na tabela B.3 estão ilustradas algumas das especificações da placa *ALIX 2D2*.

ALIX 2D2	
Processador	500 MHz AMD Geode LX800
Memória	256 MB DDR DRAM
Expansão	2x miniPCI, bus LPC
Conectividade	2 Portos Ethernet
Alimentação	DC, 7-20V

Tabela B.3: Especificações principais da placa *ALIX 2D2*

### B.3 *Xsens MTi-G-700*

Como sistema de *ground truth* para a estimação dos ângulos de orientação, foi utilizado o sensor *Xsens MTi-G-700*, ilustrado na figura B.5. Este é um sistema GPS/INS que oferece soluções de posição e orientação de elevada qualidade, através dum processo interno de fusão sensorial entre acelerómetros, magnetómetros e GPS.

Quando há sinal de GPS disponível, o sensor calibra internamente os seus dados de orientação (principalmente o ângulo de *Yaw*) através da fusão entre os



Figura B.5: Sensor *Xsens MTi-G-700*

dados do GPS e dos acelerómetros. Durante os testes verificou-se que é necessário algum tempo em movimento até que o sensor calibre o ângulo de *Yaw* de forma a que quando o eixo X do sensor está a apontar para Norte, o sistema devolva um ângulo de  $90^\circ$ .

A tabela seguinte ilustra as especificações mais relevantes deste sistema:

Xsens MTi-700 GPS	
Estabilidade do giroscópio	10 graus/hora
Exatidão Roll	0.3 graus
Exatidão Pitch	0.3 graus
Exatidão Yaw	1 grau

Tabela B.4: Especificações principais do sensor *Xsens MTi-700 GPS*