



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO POR GPS/UMI
PARA ROBÔS MÓVEIS EM AMBIENTES EXTERNOS**

George Andrew Brindeiro

Brasília, dezembro de 2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO POR GPS/UMI
PARA ROBÔS MÓVEIS EM AMBIENTES EXTERNOS**

George Andrew Brindeiro

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Prof. Geovany Araújo Borges, ENE/UnB

Orientador

Prof. Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike, CIC/UnB

Co-orientadora

Prof. Renato Alves Borges, ENE/UnB

Examinador externo

Prof. Antônio Padilha Lanari Bó, ENE/UnB

Examinador interno

Dedicatória

À minha querida Mariana.

George Andrew Brindeiro

Agradecimentos

Como é bom escrever esta seção do relatório sem a pressão da entrega e apresentação do trabalho de graduação, para que eu possa dar a atenção devida àquela que talvez seja a seção mais importante do trabalho. Afinal, há muito o que se agradecer!

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores por tudo que me ensinaram, seja na sala de aula, seja na convivência diária. Agradeço à prof. Carla Koike pela sua franqueza, honestidade e humildade, que me fizeram entender o que é realmente ser um cientista – apesar de ser difícil ouvi-las, são as críticas construtivas que nos fazem crescer. Agradeço ao prof. Geovany Borges pelos “ensinamentos Jedi” que só um verdadeiro mestre poderia passar, e por seu sacrifício e liderança que fazem com que o LARA se torne cada vez mais uma referência em robótica no Brasil e no mundo. Agradeço também ao prof. Marcus Vinícius Lamar, por me mostrar que um trabalho difícil também pode ser muito divertido, e ao prof. Dívio Borges por ter me iniciado no mundo da pesquisa e desenvolvimento. Aos meus mestres, meu muito obrigado.

Queria agradecer a todos meus colegas pelo companheirismo e amizade que surgiram e cresceram nesses cinco anos de curso, em particular meus amigos André Geraldês, André Gama, Cíntia Martins, David Bevilaqua, Gabriel Figueiró, Jefferson Chaurais, José Oniram Limaverde, Thiago Barra e Thiago Rocha. Foram muitas madrugadas de estudo, muitos churrascos, muitos Barra’s lunch, muitos jogos de Pro Evolution Soccer (ou “Wingeleven”) e outros momentos marcantes que certamente ficarão na memória para sempre. Agradeço também aos meus colegas da UnBall, que sempre me surpreendem com o grande potencial dessa nova geração da Mecatrônica.

Gostaria de agradecer também aos colegas do LARA que me acompanharam nestes dois anos que eu frequentei o laboratório. Agradeço pela receptividade, conselhos e ajuda que recebi sempre que precisei. Em particular, agradeço aos colegas Bruno Amui e Felipe Brandão, que em muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, especialmente ao compartilharem sua experiência em projeto de placas de circuito impresso.

Por fim, os essenciais. Agradeço aos meus pais, Geraldo e Paula, pelo amor e apoio incondicional, e por me ensinarem que nada vem sem trabalho duro. Agradeço aos meus irmãos, Charles e Margaret, por serem meus melhores amigos há 23 anos. Agradeço também à minha querida Mariana por manter minha sanidade intacta durante os anos de curso. Obrigado pelo amor, carinho, compreensão, e todos momentos que passamos juntos nesses 67 meses – você é meu equilíbrio.

George Andrew Brindeiro

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de localização para robôs móveis em ambientes externos. Cada robô móvel é equipado com um módulo sensor composto por receptor GPS e Unidade de Medição Inercial (UMI), contendo acelerômetro, girômetro e magnetômetro triaxiais. O módulo sensorial desenvolvido neste trabalho permite também a utilização de GPS diferencial (DGPS) e a avaliação de algoritmos distribuídos para localização multi-robôs, através da troca de medidas entre robôs por meio de uma rede sem-fio. É apresentado também um estudo de algoritmos de localização baseados no filtro de Kalman, com foco na fusão sensorial GPS/UMI. A contribuição esperada deste trabalho é obter-se uma plataforma genérica de localização em ambiente externo para robôs móveis, para uso em trabalhos futuros no LARA.

ABSTRACT

This work describes the development of an outdoor robot localization system for mobile robots. Each robot is equipped with a sensor module containing a GPS receiver and an Inertial Measurement Unit (IMU), containing triaxial accelerometer, gyrometer and magnetometer. The sensor module developed in this work also permits the use of differential GPS (DGPS) and the evaluation of distributed algorithms for multi-robot localization, through the exchange of measurements between robots via a wireless network. A survey of Kalman filter based localization algorithms is presented, with focus on GPS/IMU sensor fusion. The expected contribution of this work is to obtain a generic platform for localization of mobile robots in outdoor environments, for use in future projects developed in the Laboratory of Automation and Robotics.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2	SISTEMAS DE POSICIONAMENTO GLOBAL	3
1.3	SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO INERCIAL.....	5
1.4	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	8
1.5	OBJETIVOS DO PROJETO	8
1.6	RESULTADOS ALCANÇADOS.....	8
1.7	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO.....	9
2	Fundamentação Teórica.....	10
2.1	INTRODUÇÃO.....	10
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.3	MODELAGEM MATEMÁTICA	13
3	Desenvolvimento.....	22
3.1	INTRODUÇÃO.....	22
3.2	DESCRIÇÃO DO HARDWARE.....	23
3.2.1	GPS NOVATEL OEMV-1	23
3.2.2	MEMSENSE NANOIMU.....	26
3.2.3	CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO	27
3.2.4	CIRCUITO DE COMUNICAÇÃO.....	29
3.2.5	PLACA DE INTERFACEAMENTO	32
3.2.6	PROJETO MECÂNICO	34
3.3	DESCRIÇÃO DO SOFTWARE	34
3.4	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO	35
4	Resultados Experimentais.....	36
4.1	INTRODUÇÃO.....	36
4.2	COLETAS DE DADOS DO GPS	36
4.2.1	DEC-06-2011(22H00): GPS COM MÓDULO SENSORIAL PARADO	37
4.2.2	DEC-13-2011(17H48): VOLTA DE CARRO NO CAMPUS	37
4.3	COLETAS DE DADOS DA UMI	42
4.3.1	DEC-13-2011(18H26): ZIGUE-ZAGUE DE CARRO NO ESTACIONAMENTO	42
4.3.2	DEC-15-2011(02H52): UMI COM MÓDULO SENSORIAL PARADO	43
4.3.3	DEC-15-2011(02H54): ROTAÇÕES DE 180° EM TORNO DOS EIXOS.....	43

4.4	DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	58
5	Conclusões.....	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	Anexos.....	67
I	Diagramas Esquemáticos.....	68
II	Descrição do conteúdo do DVD	75
III	Filtros de Kalman	76
III.1	FILTRO DE KALMAN	76
III.2	FILTRO DE KALMAN ESTENDIDO	78
III.3	FILTRO DE KALMAN ESTENDIDO CORRELATO.....	79
IV	Quatérnios.....	81
IV.1	DEFINIÇÃO DE QUATÉRNIOS	81
IV.2	PROPRIEDADES DE QUATÉRNIOS	82
IV.3	REPRESENTAÇÃO DE ATITUDE COM QUATÉRNIOS.....	83
IV.4	SEQUÊNCIAS DE ROTAÇÕES COM QUATÉRNIOS	83
IV.5	PROPAGAÇÃO DE ATITUDE COM QUATÉRNIOS.....	84
IV.6	CONVERSÃO ENTRE REPRESENTAÇÕES	84
IV.6.1	ÂNGULOS DE EULER \Rightarrow MATRIZ DE ROTAÇÃO.....	85
IV.6.2	ÂNGULOS DE EULER \Rightarrow QUATÉRNIO UNITÁRIO.....	85
IV.6.3	MATRIZ DE ROTAÇÃO \Rightarrow ÂNGULOS DE EULER.....	85
IV.6.4	MATRIZ DE ROTAÇÃO \Rightarrow QUATÉRNIO UNITÁRIO.....	85
IV.6.5	QUATÉRNIO UNITÁRIO \Rightarrow ÂNGULOS DE EULER.....	86
IV.6.6	QUATÉRNIO UNITÁRIO \Rightarrow MATRIZ DE ROTAÇÃO.....	86
V	Montagem do Módulo GPS/UMI.....	87
V.1	PLACA DE INTERFACE	87
V.2	GABINETE DO MÓDULO SENSORIAL.....	90
V.3	ESTRUTURAS AUXILIARES	92
V.4	TESTANDO O MÓDULO SENSORIAL GPS/UMI.....	95

LISTA DE FIGURAS

1.1	Localização: essencial para a capacidade de autonomia de robôs móveis	1
1.2	Constelação de satélites do sistema GPS	3
1.3	Ilustração do princípio da triangulação	4
1.4	Propagação de sinais GPS.....	5
1.5	Modelos de sensores presentes em uma UMI	6
2.1	Sistemas de coordenadas de referência	14
3.1	Diagrama de blocos do módulo sensorial GPS/UMI	22
3.2	GPS NovAtel OEMV-1	24
3.3	Conector do GPS NovAtel OEMV-1	25
3.4	MEMSense NanoIMU NA02-0300F050R	27
3.5	Pacote de dados da MEMSense NanoIMU	28
3.6	Reguladores de tensão lineares	29
3.7	Esquemático da seção de alimentação do módulo sensorial GPS/UMI	30
3.8	Transceptores RS-232 e RS-485	31
3.9	Conector DB-9 fêmea (face da conexão).....	31
3.10	Esquemático da seção de comunicação do módulo sensorial GPS/UMI	32
3.11	Revisões da Placa de Interfaceamento do Módulo GPS/UMI.....	32
3.12	Projeto do módulo sensorial GPS/UMI no SolidWorks.....	34
4.1	Dec-06-2011(22h00): Dados de posição (ECEF).....	38
4.2	Dec-06-2011(22h00): Desvio padrão da posição (ECEF)	38
4.3	Dec-06-2011(22h00): Dados de velocidade (ECEF).....	39
4.4	Dec-06-2011(22h00): Desvio padrão da velocidade (ECEF)	39
4.5	Dec-13-2011(17h48): Dados de posição (ECEF).....	40
4.6	Dec-13-2011(17h48): Desvio padrão da posição (ECEF).....	40
4.7	Dec-13-2011(17h48): Dados de velocidade (ECEF).....	41
4.8	Dec-13-2011(17h48): Desvio padrão da velocidade (ECEF)	41
4.9	Dec-13-2011(18h26): Dados do girômetro	44
4.10	Dec-13-2011(18h26): Dados do acelerômetro	44
4.11	Dec-13-2011(18h26): Dados do magnetômetro.....	45
4.12	Dec-13-2011(18h26): Temperatura do girômetro	45
4.13	Dec-13-2011(18h26): Dados do girômetro (filtrados)	46
4.14	Dec-13-2011(18h26): Dados do acelerômetro (filtrados)	46
4.15	Dec-13-2011(18h26): Dados do magnetômetro (filtrados).....	47

4.16	Dec-13-2011(18h26): Dados do girômetro (filtrados e calibrados)	47
4.17	Dec-13-2011(18h26): Integração dos dados do girômetro.....	48
4.18	Dec-15-2011(02h52): Dados do girômetro	48
4.19	Dec-15-2011(02h52): Dados do acelerômetro	49
4.20	Dec-15-2011(02h52): Dados do magnetômetro.....	49
4.21	Dec-15-2011(02h52): Temperatura do girômetro	50
4.22	Dec-15-2011(02h52): Dados do girômetro (filtrados).....	50
4.23	Dec-15-2011(02h52): Dados do acelerômetro (filtrados)	51
4.24	Dec-15-2011(02h52): Dados do magnetômetro (filtrados).....	51
4.25	Dec-15-2011(02h52): Dados do girômetro (filtrados e calibrados)	52
4.26	Dec-15-2011(02h54): Dados do girômetro	52
4.27	Dec-15-2011(02h54): Dados do acelerômetro	53
4.28	Dec-15-2011(02h54): Dados do magnetômetro.....	53
4.29	Dec-15-2011(02h54): Temperatura do girômetro	54
4.30	Dec-15-2011(02h54): Dados do girômetro (filtrados).....	54
4.31	Dec-15-2011(02h54): Dados do acelerômetro (filtrados)	55
4.32	Dec-15-2011(02h54): Dados do magnetômetro (filtrados).....	55
4.33	Dec-15-2011(02h54): Dados do girômetro (filtrados e calibrados)	56
4.34	Dec-15-2011(02h54): Integração dos dados do girômetro.....	56
4.35	Dec-06-2011(22h00): Dados de posição do GPS exportados para o <i>Google Earth</i>	57
4.36	Dec-13-2011(17h48): Dados de posição do GPS exportados para o <i>Google Earth</i>	57
4.37	Dec-13-2011(18h26): Trajetória do experimento desenhada no <i>Google Earth</i>	58
I.1	Esquemático da placa de interface do módulo sensorial GPS/UMI.....	69
I.2	Placa de interface do módulo sensorial GPS/UMI.....	70
I.3	Face superior do gabinete do módulo sensorial GPS/UMI.....	71
I.4	Face lateral esquerda do gabinete do módulo sensorial GPS/UMI.....	72
I.5	Face lateral direita do gabinete do módulo sensorial GPS/UMI	73
I.6	Base de fixação da antena do GPS.....	74
V.1	Placa de interface do módulo sensorial GPS/UMI.....	87
V.2	Testes do circuito de alimentação da placa de interface	89
V.3	Verificação da folga de altura e lateral	90
V.4	Módulo sensorial sendo testado antes da montagem do gabinete	91
V.5	Gabaritos para furação das faces do gabinete	91
V.6	Gabarito fixado na face do gabinete	92
V.7	Fixação do gabinete utilizando sargento.....	93
V.8	Fabricação dos furos da porta serial	93
V.9	Montagem final do gabinete	93
V.10	Felicidade depois de algumas horas de trabalho	93
V.11	Placa de suporte da antena do receptor GPS	94
V.12	Estrutura de suporte da antena do receptor GPS no robô Pioneer 3-AT	94
V.13	Montagem independente do módulo sensorial GPS/UMI	94
V.14	<i>Software</i> proprietário para teste dos sensores	95

LISTA DE TABELAS

1.1	Fontes de erro em receptores GPS	5
3.1	Características do GPS NovAtel OEMV-1	24
3.2	Pinos do GPS NovAtel OEMV-1	25
3.3	<i>Strobes</i> do GPS NovAtel OEMV-1	26
3.4	Características da MEMSense NanoIMU NA02-0300F050R.....	27
3.5	Conteúdo do pacote de dados da MEMSense NanoIMU	28
3.6	Características dos reguladores de tensão LM7805 e LD33V.....	29
3.7	Características dos transceptores MAX3232, MAX232 e MAX485	31
3.8	Lista de componentes da placa de interfaceamento do módulo GPS/UMI	33

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

X, Y, Z	Eixos ortonormais de um sistema de coordenadas tridimensional
\mathbf{v}	Vetor de velocidade
\mathbf{f}	Vetor de força específica
\mathbf{g}	Vetor de aceleração gravitacional
\mathbf{m}	Vetor de campo magnético
\mathbf{C}_f^m	Matriz de rotação do sistema M para o sistema F
\mathbf{q}_f^m	Quatérnio de rotação do sistema M para o sistema F
ω_{ib}^b	Velocidade angular do sistema B em relação ao sistema I no sistema \mathbf{B}
λ	Latitude
Λ	Longitude
e_{pseudo}	Erro da pseudo-medição
\mathbf{b}_x	Viés referente à medida x
η_s	Ruído branco gaussiano de média nula associado ao sensor S

Sobrescritos

\cdot	Varição temporal
\sim	Medição corrompida por erros
$\hat{}$	Valor estimado
b	Vetor no sistema B
e	Vetor no sistema E
n	Vetor no sistema N
i	Vetor no sistema I

Subscritos

ω	Referente à medida de velocidade angular (girômetro)
f	Referente à medida de força específica (acelerômetro)
(k)	Referente ao instante k de amostragem

Operadores

\otimes	Produto de quatérnios
\times	Produto vetorial
$ \cdot $	Módulo de vetor
$\ (\cdot)\ $	Norma euclideana
$\mathbf{y}^{[m:n]}$	Elementos de m a n do vetor \mathbf{y}

Siglas

API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AT	All Terrain
C/A	Coarse/Acquisition Code
CAN	Controller Area Network
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
CDGPS	Canada-wide DGPS Service
CMR	Compact Measurement Record
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DGPS	Differential GPS
DRS	Dead Reckoning System
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
ECI	Earth Centered Inertial
EDA	Electronic Design Automation
FIFO	First In First Out
FK	Filtro de Kalman
FKE	Filtro de Kalman Estendido
FKEC	Filtro de Kalman Estendido Correlato
FKU	Filtro de Kalman Unscented
GBAS	Ground Based Augmentation System
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
I ² C	Inter-Integrated Circuit
INS	Inertial Navigation System
LARA	Laboratório de Automação e Robótica
LED	Light Emitting Diode
LIDAR	Light Detection And Ranging
LNA	Low-noise Amplifier
LSB	Least Significant Byte
LVTTL	Low Voltage Transistor-Transistor Logic
MEMS	Micro-electromechanical Systems

MSB	Most Significant Byte
Mutex	Mutual Exclusion
NMEA	National Marine Electronics Association
OEM	Original Equipment Manufacturer
PAC	Pulse Aperture Correlator
PCI	Placa de Circuito Impresso
P-code	Precision Code
POSIX	Portable Operating System Interface
PPS	Pulse Per Second
PV	Position Valid
P(Y)	Encrypted Precision Code
RS	IEEE Reference Standard
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real-Time Kinematic
RX	Recepção
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
TTL	Transistor-Transistor Logic
TX	Transmissão
UMI	Unidade de Medição Inercial
USB	Universal Serial Bus
VANT	Veículo Aéreo Não-Tripulado
VARF	Variable Frequency

Capítulo 1

Introdução

*If you don't know where you are going,
any road will get you there.*

Lewis Carroll

1.1 Contextualização

Desde os primeiros estudos no campo da robótica, o público geral tem a idéia de que robôs são máquinas concebidas pelo homem à sua imagem e semelhança, dotadas de vontade própria e capacidades avançadas de mobilidade, manipulação e percepção [1]. Mesmo que rudimentar e falha, esta noção culturalmente estabelecida do que seriam robôs remonta a uma característica específica que é ainda hoje o Santo Graal deste campo do conhecimento: a capacidade de autonomia. Para o desenvolvimento desta capacidade é essencial que um robô, como o ilustrado na Figura 1.1, tenha informações acerca de onde ele está, para onde deve ir e como chegar ao seu objetivo.

Na pesquisa em robótica móvel, em particular, muitos esforços têm sido empregados na definição de arquiteturas de controle que possibilitassem graus cada vez maiores de autonomia em ambientes cada vez mais complexos. Embora o nível de autonomia de determinado robô seja



Figura 1.1: Localização: essencial para a capacidade de autonomia de robôs móveis

limitado por seus recursos físicos, o estudo destas arquiteturas de controle permite que certos subsistemas sejam incluídos desde seu projeto visando a concepção de um robô que seja “autônomo o suficiente” para sua aplicação principal. Estes subsistemas podem consistir, por exemplo, de sistemas de localização, planejamento de trajetória, evitamento de obstáculos, interação natural homem-robô, controladores de juntas, e processamento sensorial de baixo nível.

De acordo com Bekey [2], um robô autônomo é uma máquina inteligente capaz de executar tarefas independentemente, sem interferência explícita de um ser humano. Siegwart e Nourbakhsh [3] exaltam a capacidade de locomoção como um fator primordial na concepção de robôs autônomos, para que possam atuar em ambientes não estruturados sem supervisão. Thrun, Burgard e Fox [4] consideram que a capacidade de lidar com a incerteza inerente à interação por meio de atuadores com o mundo real e sua percepção por meio de sensores é essencial para o sucesso de robôs autônomos, e defendem o uso de métodos probabilísticos para o desenvolvimento desta característica. Independente da abordagem empregada, pesquisadores em robótica acreditam ser essencial a incorporação de algoritmos que possibilitem o processamento de dados de sensores e extração de informações de interesse para a inferência do estado atual do mundo.

Tradicionalmente, os diversos subsistemas são estudados de forma independente, já que tentam resolver problemas complexos ainda em aberto. Para robôs móveis é possível dizer que um sistema de localização é, excetuando-se controles de baixo nível, o subsistema mais básico. Sem o conhecimento ao menos parcial de onde se encontra, não é possível para um robô planejar trajetórias, navegar ou executar tarefas que envolvam sua mobilidade de forma eficiente. Quando esta estimativa não está disponível, as ações do robô usualmente têm como objetivo a reaquisição de uma estimativa de localização por meio da exploração, em que a movimentação do robô visa a aquisição de informações sobre o ambiente em que ele se encontra.

Existem diversos sistemas robóticos atuais que realizam alguma forma de fusão sensorial entre receptores GPS e unidades de medição inercial para localização em ambientes externos. Veículos aéreos não-tripulados, cuja aplicação nas áreas de patrulhamento, sensoriamento remoto e vistoria de grandes estruturas como linhas de transmissão está se tornando cada vez mais comum, adotam esta combinação de sensores como ponto de partida para seus sistemas de localização. Veículos autônomos, tais como os desenvolvidos no contexto dos desafios *DARPA Grand Challenge* e *DARPA Urban Challenge* promovidos pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, também incorporam GPS e UMI ao seu conjunto de sensores devido ao seu caráter complementar e à quantidade de estudos realizados sobre esta composição de sensores na última década [5,6].

Devido à importância de sistemas de localização, e visando o desenvolvimento de uma plataforma comum que pudesse ser utilizada nos robôs móveis do Laboratório de Automação e Robótica e demais laboratórios colaboradores na Universidade de Brasília, justifica-se este trabalho que se inicia com o projeto de um módulo sensorial que disponibilizasse os dados dos sensores adquiridos, passa pelo estudo de técnicas de filtragem estocástica voltadas para a localização de robôs móveis e se finaliza com a implementação de algoritmos previamente desenvolvidos no LARA [7–9].

Espera-se que os resultados deste trabalho sejam aproveitados em trabalhos futuros, seja como ferramenta para aplicações de robótica móvel em ambiente externo, quanto como ponto de partida para a proposição de algoritmos mais sofisticados de localização, como a localização de múltiplos

robôs utilizando medições de GPS diferencial disponibilizadas no *hardware* desenvolvido.

1.2 Sistemas de Posicionamento Global

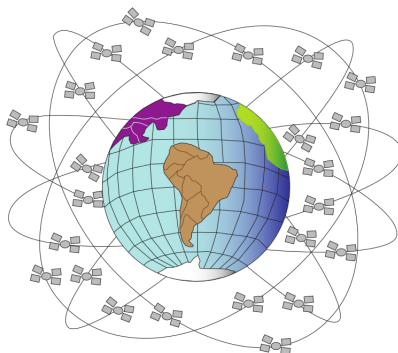


Figura 1.2: Constelação de satélites do sistema GPS

Sistemas de localização global baseados em satélite foram idealizados nos anos 60, no contexto da corrida armamentista da Guerra Fria. O sistema NAVSTAR¹, lançado pelos Estados Unidos no fim dos anos 70 para uso militar, foi o primeiro sistema de posicionamento global a entrar em funcionamento [10]. Outros sistemas foram propostos em seguida, desde o sistema GLONASS (Rússia), atualmente em pleno funcionamento, até os sistemas Galileo (Europa) e Compass (China), planejados e em diferentes estágios de desenvolvimento. Em 1983, o governo estadunidense decidiu liberar o uso civil do sistema GPS, embora com restrições de precisão através da chamada disponibilidade seletiva [11]. Esta limitação induzida através da introdução de erros variantes no tempo de até 100 m impossibilitou a disseminação do uso civil de receptores GPS até o ano 2000, quando a popularização de tecnologias DGPS culminou na desativação da disponibilidade seletiva². A partir deste evento, receptores GPS têm sido utilizados amplamente em diversos dispositivos, tais como navegadores, rastreadores, celulares, aviônicos e sistemas de localização para robótica.

O funcionamento de sistemas de localização global baseados em satélite (denominados GNSS a partir deste ponto do texto, sem perda de generalidade) é fundamentado no princípio da triangulação, em que o conhecimento exato das distâncias para $N + 1$ pontos de referências determinam a localização de um ponto em um espaço N -dimensional. O caso bidimensional é ilustrado na Figura 1.3, em que são apresentadas as estimativas possíveis para a posição do receptor, dado o conhecimento das distâncias para diferentes números de pontos de referência. As estimativas de posição representam as soluções do sistema não-linear de equações relacionando as coordenadas do receptor e suas distâncias para transmissores com posição conhecida.

É possível imaginar que seria necessário o conhecimento das distâncias de um receptor GNSS para quatro satélites para a determinação de sua localização no espaço tridimensional. No caso

¹NAVSTAR é o nome oficial do sistema popularmente conhecido como GPS.

²Tecnologias de GPS diferencial, além de mitigarem erros devido a efeitos ionosféricos, possibilitavam a correção de erros induzidos pela disponibilidade seletiva. Isto ocorre porque estes efeitos afetam receptores em uma mesma região de forma aproximadamente uniforme, de modo que uma estação base de localização precisamente conhecida é capaz de transmitir correções para outros receptores.

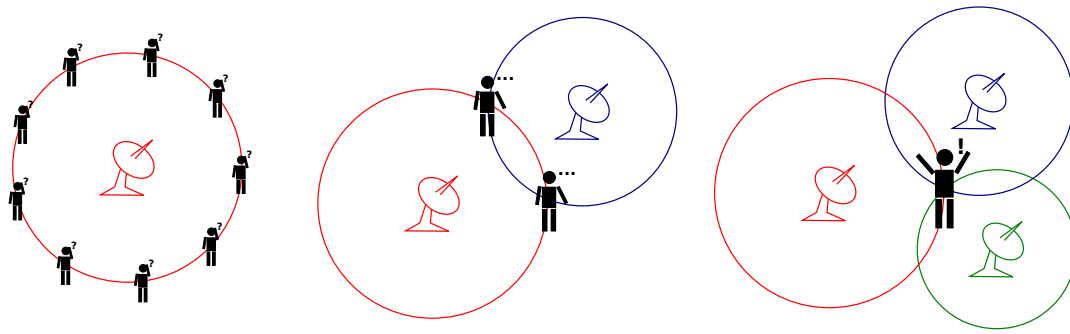


Figura 1.3: Ilustração do princípio da triangulação

ideal isto seria falso já que, dentre as duas estimativas de posição possíveis com três satélites visíveis, apenas uma se encontra na superfície terrestre. Na realidade, porém, a determinação da distância do receptor para os satélites é feita a partir do conhecimento da órbita dos satélites, do tempo de propagação de ondas de radiofrequência emitidas pelos satélites e da velocidade de propagação destas ondas na atmosfera terrestre. Infelizmente todos estes fatores são fontes de erro nas estimativas de distância, tornando necessária a utilização de mais um satélite para que as equações de triangulação tenham solução. As distâncias estimadas desta forma são chamadas na literatura de pseudodistâncias (em inglês, *pseudorange*).

As complicações resultantes da utilização de pseudodistâncias para localização são inúmeras: os relógios de receptores GNSS são imprecisos e dessincronizados com os relógios dos satélites, a propagação do sinal GNSS não é uniforme em toda atmosfera terrestre, suas ondas são recebidas através de múltiplos caminhos devido a reflexões e refrações, ou ainda são obstruídas por obstáculos. Alguns destes efeitos de propagação estão retratados na Figura 1.4, e uma estimativa do erro introduzido por cada uma das fontes citadas, apresentada por Jeffrey [10], é referida na Tabela 1.1.

O posicionamento relativo dos satélites em relação ao receptor também pode introduzir erros nas medidas fornecidas pelo receptor GPS. Caso os satélites visíveis estejam muito próximos, os erros das pseudodistâncias tendem a ter um efeito maior, uma vez que os cálculos realizados envolvem diferenças de distâncias e nestas situações o erro aparece como uma componente significativa da diferença [11]. Este efeito é chamado de Diluição da Precisão (em inglês, *Dilution of Precision*) e pode ser quantificado pelo receptor durante a determinação de sua posição. Quando esta informação é fornecida pelo receptor, é possível utilizá-la em algoritmos de localização como uma métrica relativa à qualidade da medida disponível.

Além de medidas de posição, receptores GNSS são capazes de fornecer estimativas precisas de velocidade a partir do efeito Doppler. Por serem baseadas em fenômenos distintos, as medições de posição e velocidade fornecidas pela maioria dos receptores GNSS podem ser consideradas descorrelacionadas entre si. Outra aplicação menos comum de receptores GNSS é o fornecimento de referências precisas de tempo, possível após o procedimento de sincronização de seu relógio com os relógios atômicos dos satélites GNSS. Este procedimento consiste no atraso e avanço do relógio do receptor, visando a minimização do erro residual de triangulação.

Uma ótima referência para primeira consulta sobre conceitos relacionados a sistemas GNSS

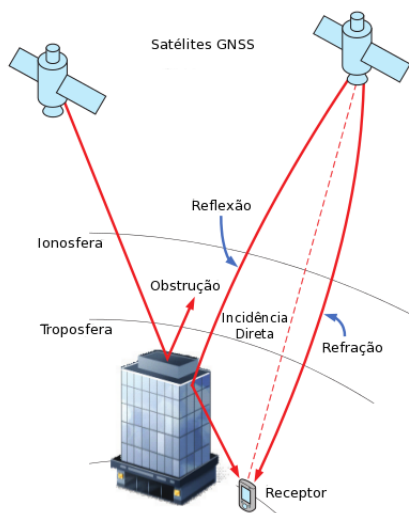


Figura 1.4: Propagação de sinais GPS

Tabela 1.1: Fontes de erro em receptores GPS

Fonte	Faixa de Erro
Sincronismo de relógio	$\pm 2,0m$
Desvios de órbita	$\pm 2,5m$
Atrasos ionosféricos	$\pm 5,0m$
Atrasos troposféricos	$\pm 0,5m$
Ruído no receptor	$\pm 0,3m$
Multi-caminhos	$\pm 1,0m$

é o livro *An Introduction to GNSS* [10], escrito por Charles Jeffrey para a NovAtel Inc. O livro *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration* [11] de Grewal, Weill e Andrews apresenta o assunto de forma mais técnica, detalhando equações e princípios de funcionamento dos sistemas GNSS e metodologias de integração com sistemas de navegação inercial.

1.3 Sistemas de Navegação Inercial

Sistemas de navegação inercial, também conhecidos como INS, são dispositivos compostos de unidades de processamento e unidades de medição inercial, e têm como objetivo a obtenção de estimativas de posição, velocidade e orientação de um corpo através da integração de dados aceleração e velocidade de rotação [12]. Este processo não necessita de referências externas, e é conhecido como navegação estimada ou *dead reckoning*. Apesar de ter suas origens em aplicações militares como caças, mísseis e torpedos, sistemas baseados em sensores inerciais têm crescido em relevância para aplicações civis. Esta popularização se deu devido a avanços recentes nos processos de fabricação de sensores baseados em MEMS, que possibilitaram a redução de seu custo e melhoria de sua qualidade. Algumas aplicações atuais de UMIs incluem interfaces naturais de interação com computadores, sistemas de navegação pessoal e sistemas de localização para robôs móveis.

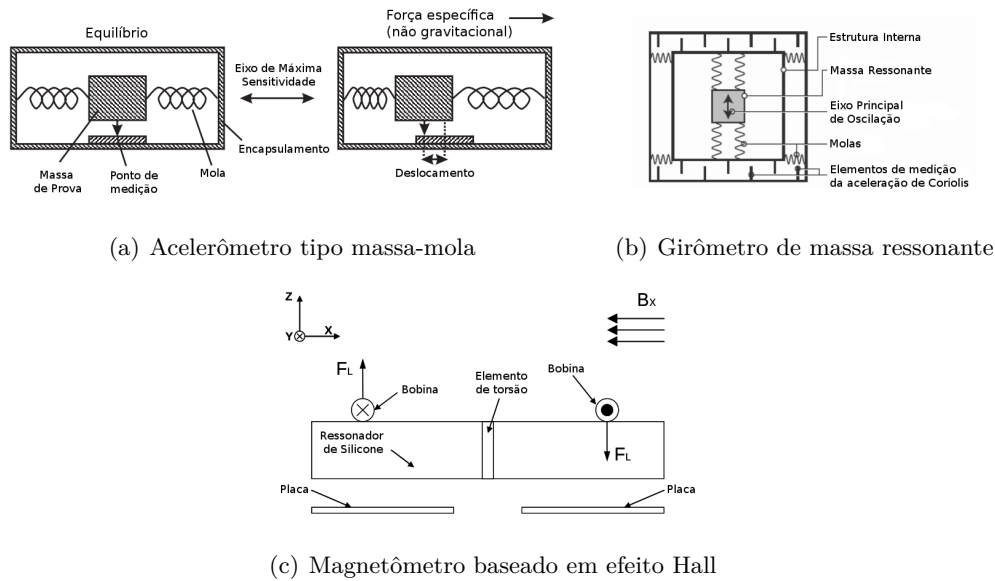


Figura 1.5: Modelos de sensores presentes em uma UMI

Um grande problema de sistemas de navegação inercial surge da necessidade de se integrar dados de sensores que fornecem medições corrompidas por erros sistemáticos e ruído aleatório para obter-se as estimativas de posição, velocidade e orientação desejadas. É possível provar que este processo leva à divergência das estimativas devido à integração do erro de medição, que é significativo em sistemas de baixo custo. Devido à impossibilidade de se utilizar este sistema independentemente, torna-se necessária a inclusão de outros sensores para correção periódicas das estimativas obtidas através da integração dos acelerômetros e girômetros. Para correção da posição e velocidade uma opção popular é a utilização de receptores GPS, discutidos na seção 1.2. Para a correção de atitude é comum utilizar-se sensores de campo magnético, tirando proveito da direção aproximadamente constante do campo magnético terrestre – esta abordagem é tão disseminada, que há UMIs que já incluem magnetômetros alinhados aos acelerômetros e girômetros dentro de um mesmo encapsulamento.

Girômetros e acelerômetros estão disponíveis no mercado em uma ampla gama de modelos com variações significativas em custo, tamanho, peso e desempenho, sendo que sensores de alto desempenho são usualmente maiores e mais caros. Sensores baseados em sistemas micro-eletromecânicos, mais conhecidos pela sigla MEMS, oferecem a vantagem de terem baixo custo, tamanho e peso reduzidos, e alta tolerância a choques, mas têm baixo desempenho. Apesar da quantidade de modelos diferentes, girômetros geralmente utilizam a aceleração de Coriolis para efetuar a medição da velocidade de rotação de um corpo, e acelerômetros geralmente utilizam sistemas massa-mola que permitem a aferição da força específica a que está submetida uma pequena massa de prova. Devido a isso, é preciso considerar que girômetros são afetados pela velocidade de rotação do globo terrestre e que a aceleração inercial do corpo não é diretamente medida por acelerômetros, sendo necessária uma estimativa da aceleração gravitacional para tanto.

O acelerômetro apresentado na Figura 1.5(a) contém uma massa de prova capaz de livre movimentação em relação ao encapsulamento da UMI, sendo restrito por molas. O ponto de

medição mede a posição da massa de prova em relação ao encapsulamento. Quando uma força de aceleração é aplicada ao longo do eixo de máxima sensibilidade do encapsulamento, a massa de prova inicialmente mantém sua velocidade devido à inércia, e o encapsulamento se movimenta em relação à massa de prova. Isto leva à distensão de uma mola e à compressão da outra, alterando a força que é transmitida para a massa de prova a partir do encapsulamento. Este processo continua até que se atinja o equilíbrio dinâmico, em que a posição da massa de prova em relação ao encapsulamento é proporcional à força aplicada ao corpo em que o encapsulamento está fixado. Como previamente mencionado, esta força desconsidera o efeito da gravidade, que age diretamente sobre a massa de prova e demais componentes do acelerômetro, impossibilitando sua aferição por deslocamento relativo. Assim, diz-se que acelerômetros medem a aceleração específica ou aceleração não-gravitacional de um corpo.

O girômetro apresentado na Figura 1.5(b) contém um elemento que é submetido a um movimento harmônico simples em um eixo. A aceleração de Coriolis produzida pela rotação do encapsulamento provoca um movimento oscilatório perpendicular ao eixo principal de oscilação, cuja amplitude é proporcional à velocidade angular. A medição desta amplitude no sensor apresentado [13] é feita por meio de sensores capacitivos. Rotações relativas ao eixo principal de oscilação não produzem acelerações de Coriolis. O projeto destes sensores usualmente restringe a oscilação provocada a apenas um dos eixos perpendiculares, de modo que é possível determinar um eixo principal de medição de velocidade angular.

Magnetômetros podem ser projetados a partir de diversos princípios físicos do eletromagnetismo, porém alguns dos mais populares são aqueles baseados no efeito Hall [14], como ilustrado na Figura 1.5(c). Estes sensores produzem uma tensão elétrica proporcional ao campo magnético aplicado, sendo também capazes de detectar seu sentido. Silicene dopado possui um alto coeficiente Hall, tornando-se uma boa escolha de material para a fabricação deste tipo de transdutor. Em sistemas de navegação inercial utiliza-se magnetômetros para a correção de atitude, sob a hipótese que a fonte principal do campo magnético medido é proveniente do globo terrestre. Esta suposição nem sempre é verdadeira, devido à presença de campos de maior intensidade que o terrestre e a interações com materiais ferromagnéticos próximos ao sensor.

Não espera-se neste texto apresentar uma descrição detalhada dos diferentes modelos dos sensores citados, mas justificar através da apresentação dos modelos da Figura 1.5 algumas das características que surgem conforme a tecnologia adotada nos sistemas de medição. Devido ao princípio de funcionamento de sensores baseados em MEMS, estes estão sujeitos a diversos efeitos indesejados [15] dentre os quais podemos ressaltar:

- **Viés** ou **Polarização** se refere a erros constantes e independentes do valor medido, usualmente dominantes no erro de medição. É possível realizar procedimentos de calibração para correção deste termo de erro, embora sejam sujeitos a lentas variações temporais. Esse efeito é conhecido como deriva de viés (em inglês, *bias drift*) e torna conveniente a separação do viés em dois termos denominados viés estático, que corresponde a um valor que se mantém fixo durante a operação do sensor, e viés dinâmico, que corresponde a variações que ocorrem normalmente em períodos da ordem de minutos e variações devido à temperatura.
- Alguns erros afetam o valor medido conforme um fator multiplicativo, ou **Fator de Escala**,

de modo que erros maiores são introduzidos quando a variável medida assume valores mais elevados. **Sensitividade entre Eixos** se refere a erros de fator de escala introduzidos devido ao desalinhamento de eixos de medição.

- Todos sensores inerciais possuem algum grau de **Ruído Aleatório**, introduzido por motivos que abrangem desde ruído em sua alimentação até vibração mecânica. Este ruído é usualmente especificado pelos fabricantes de sensores a partir de seu desvio-padrão típico e máximo, ou como ruído de passeio aleatório, já considerando a integração desta fonte de erro suposta gaussiano para aplicação em sistemas de navegação inercial.

1.4 Definição do problema

Neste trabalho é abordado o problema da localização de robôs móveis em ambiente externo, utilizando um receptor GPS e uma unidade de medição inercial dotada de acelerômetro, girômetro e magnetômetro triaxiais. Este problema envolve a estimação da posição, velocidade e atitude do robô a partir de medições obtidas a partir destes sensores. Para tanto, é primordial a utilização de algum algoritmo de fusão sensorial – neste trabalho, foi escolhido o Filtro de Kalman Estendido Correlato, devido à não-linearidade do modelo de processo adotado e à correlação existente entre as etapas de predição e correção do Filtro de Kalman, quando se utiliza o algoritmo TRIAD para correção da atitude conforme a metodologia empregada.

1.5 Objetivos do projeto

O objetivo principal deste trabalho de graduação é desenvolver um sistema de localização para robôs móveis atuando em ambientes externos, capaz de fornecer estimativas de posição, velocidade e atitude a partir de medições obtidas de um receptor GPS e de uma unidade de medição inercial composta de acelerômetro, girômetro e magnetômetro triaxiais. Para tanto é necessário fazer o projeto de um módulo sensorial GPS/UMI para alimentação dos sensores e adequação de seus protocolos de comunicação para que seja possível disponibilizar as medições de forma simples para robôs móveis dotados de portas seriais. Além disso, torna-se necessário o desenvolvimento de *software* específico para interface com o *hardware* desenvolvido, tanto para a coleta de dados voltados para a avaliação de algoritmos de localização *offline*, quanto para a localização em tempo-real de robôs móveis em ambientes externos.

1.6 Resultados alcançados

Neste trabalho realizou-se o projeto e a montagem do primeiro protótipo de um módulo sensorial GPS/UMI para localização de robôs móveis em ambientes externos. *Software* específico para coleta de dados foi desenvolvido na linguagem C para avaliação de algoritmos de localização *offline*, implementados no ambiente MATLAB durante trabalhos anteriores realizados no Laboratório de Automação e Robótica. Não foi possível a realização de experimentos bem-sucedidos contendo dados simultâneos de ambos sensores, devido a dificuldades encontradas na utilização

da plataforma robótica escolhida. Como alternativa, apresenta-se então uma análise dos dados coletados dos sensores individualmente a partir de um computador pessoal.

1.7 Apresentação do manuscrito

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre a localização de robôs móveis em ambiente externo e apresentada a modelagem utilizada neste trabalho. No Capítulo 3 são apresentadas todas as etapas de projeto do módulo sensorial GPS/UMI, desde os circuitos de alimentação e comunicação que fazem parte da placa de interfaceamento dos sensores até seu projeto mecânico, passando também pelo desenvolvimento do *software* associado para coleta de dados e descrição do sistema de localização utilizado. No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos na coleta de dados realizada individualmente com o GPS e UMI do módulo sensorial. O Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho, bem como propostas de trabalhos futuros com a plataforma desenvolvida. Os anexos contém material complementar sobre filtros de Kalman, quatérnios para representação de atitude e procedimentos de montagem e teste do módulo sensorial GPS/UMI, além dos esquemáticos desenvolvidos no decorrer do projeto e da descrição do conteúdo do CD.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

*If I have seen further it is by
standing on the shoulders of giants.
Sir Isaac Newton*

2.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar soluções presentes na literatura para a localização de robôs móveis em ambientes externos encontradas na revisão bibliográfica realizada, além de descrever a modelagem utilizada no sistema de localização desenvolvido neste trabalho.

2.2 Revisão Bibliográfica

Esta seção tem como objetivo descrever diferentes abordagens encontradas na literatura para o problema da localização de robôs móveis em ambientes externos. A revisão bibliográfica feita durante o desenvolvimento do trabalho seguiu três linhas de pesquisa: localização utilizando integração GPS/UMI, localização utilizando outras combinações de sensores, localização cooperativa de robôs móveis em ambiente externo. Artigos que desenvolvem métodos de caracterização dos sensores utilizados foram analisados sempre que relevante.

Analisando a literatura recente sobre a localização de robôs móveis em ambientes externos, observa-se a popularidade de esquemas de integração GPS/UMI. Isto ocorreu principalmente devido a dois fenômenos: a desativação da disponibilidade seletiva do sistema GPS pelo governo americano em maio de 2000, que resultou em grande melhoria na estimativa de posição fornecida por receptores GPS civis, e o aperfeiçoamento das tecnologias de fabricação de MEMS, que possibilitou a disseminação de sensores inerciais de baixo custo em tamanho reduzido.

Dentre os métodos utilizados para fusão sensorial, nota-se a preponderância de abordagens probabilísticas baseadas no filtro de Kalman. Levando em consideração que a estimação de pose é um problema de natureza não-linear, os filtros mais vistos na literatura são o filtro de Kalman estendido (FKE) [7, 8, 16–27] e o filtro de Kalman *Unscented* (FKU) [16, 21, 28]. O uso do filtro de Kalman estendido correlato (FKEC) foi proposto por Borges, Bó e Ishihara [9] para situações

em que os ruídos de processo e medição são correlacionados, como é o caso quando as medidas do acelerômetro são utilizadas tanto na etapa de predição quanto na etapa de correção.

Variantes do filtro de Kalman baseadas em lógica fuzzy foram utilizadas para rejeição de dados espúrios. Caron et al. [29] propõem o uso de regras Fuzzy para ponderação das contribuições das medições a partir de seu grau de confiabilidade, obtido através de teste de hipótese qui-quadrado. Shen et al. [30] utilizam regras Fuzzy para ponderação do ganho K e ajuste em tempo de execução das matrizes de covariância Q e R do filtro de Kalman, de acordo com indicadores de divergência da estimativa de posição e de qualidade das medições dos sensores.

Apesar da dominância das versões não-lineares clássicas do filtro de Kalman, outras abordagens são vistas na literatura. Filtros complementares foram propostos por Macharet et al. [31, 32] como alternativa para se diminuir o custo computacional da estimativa de atitude tridimensional de robôs móveis. Em algoritmos de localização cooperativa observa-se a utilização de filtros a partícula [33, 34] e uma versão distribuída do FKU [35].

Adicionando-se sensores com informação redundante, é possível se aumentar a robustez do sistema de localização. Mesmo quando é escolhida a integração GPS/UMI, é comum adicionar-se a odometria do robô como alternativa para a etapa de predição [24, 26, 27, 36, 37]. Em aplicações de robótica aérea, barômetros são utilizados para obter-se uma medida indireta da altitude a partir da pressão atmosférica [8, 20, 38]. Por possibilitarem uma medida absoluta para correção da estimativa de atitude, magnetômetros e bússolas digitais são amplamente utilizados [8, 9, 37, 38], muitas vezes sendo incluídas como sensores adicionais em UMIs. Adicionalmente, algumas UMIs presentes na literatura contém apenas um girômetro no eixo normal ao solo [26] ou se utilizam acelerômetros redundantes para medição da velocidade angular e aceleração do robô móvel [23].

Diversas combinações diferentes de sensores, algumas excluindo GPS ou UMI, são propostas pra localização de robôs em ambientes externos. Levinson e Thrun [39] propõem a utilização de LIDAR para localização e cartografia simultâneos em conjunção com a fusão sensorial GPS/UMI em ambientes urbanos, em que a disponibilidade de sinal GPS é reduzida. Outras composições de sensores observadas incluem câmeras omnidirecionais, GPS e odometria [40]; câmeras e GPS [41]; UMI e sensores óticos de dispositivos apontadores para computadores [42]; marcadores ativos [43] e LIDAR [44–48]. Por fim, alguns trabalhos tentam utilizar sistemas baseados apenas em UMI [49, 50], apesar de sua estimativa de posição divergir com o tempo.

Uma grande desvantagem da integração GPS/UMI é a degradação do sinal GPS devido a obstruções e multicaminhos em cânions urbanos, em ambientes internos ou na presença de vegetação cerrada. A presença de fontes de campo magnético, tais como linhas de transmissão e instalações elétricas, também é uma preocupação por violar a premissa de que os magnetômetros medem a intensidade do campo magnético terrestre. Estas dificuldades são sérias, já que a ausência de sensores exteroceptivos implica na execução exclusiva da etapa de predição do filtro utilizado, levando à divergência da estimativa obtida pelo sistema de localização.

Muitos trabalhos realizam experimentos para verificar a robustez de seus sistemas a períodos de perda do sinal GPS [24, 26, 37, 38]. Outros tentam tornar seus sistemas tolerantes a falhas utilizando filtragem híbrida [51], mínimos quadrados ponderados [17], domínios de validade fuzzy [29] e fusão ótima entre integração GPS/UMI e GPS/DRS [36]. A necessidade de se trabalhar em ambientes

com indisponibilidade de sinal GPS é a principal motivação para o crescimento de abordagens baseadas em combinações de câmeras e UMI, particularmente em VANTs [52, 53].

Ao se utilizar filtros estocásticos, certas suposições são feitas quanto às variáveis aleatórias envolvidas no modelo adotado. Por isso, é importante caracterizar os modelos de erro dos sensores utilizados, para verificar sob quais condições é possível se utilizar determinados filtros, e quais adaptações devem ser realizadas nestes para que estes se adequem à realidade. Em particular, é notório que sensores baseados em MEMS estão sujeitos a vieses, variações no fator de escala, não-linearidade na faixa de operação, desalinhamento entre eixos, sensibilidade cruzada entre eixos e sensibilidade à temperatura. Alguns trabalhos encontrados têm como objetivo quantificar estes efeitos em UMIs de baixo custo [28, 54–56]. Para lidar com estes problemas, a solução mais comum é a estimação conjunta de parâmetros de calibração dos sensores [22, 30].

Quanto ao modelo de erro de receptores GPS, sabe-se que as estimativas de posição e velocidade fornecidas por receptores GPS têm erros que variam com o tempo e a posição, devido a efeitos atmosféricos e multicaminhos. Abdel-Hafez [57] propõe a estimação em tempo de execução da matriz de covariância do erro de medição do GPS, utilizando métodos de mínimos quadrados de autocovariância. Além disso, por ser necessário posicionar a antena do GPS em local com boa visibilidade dos satélites, em geral a estimativa de posição fornecida pelo receptor é deslocada em relação ao Sistema B . Muitos trabalhos consideram este deslocamento desprezível frente ao ruído de medição do GPS, porém à medida que a precisão do sistema de localização aumenta, a influência deste fator é acentuada. Hemerly e Schad [24] propõem a compensação do deslocamento da antena através da inclusão deste como variável de estado do filtro.

Segundo Grewal et al. [11], os algoritmos de fusão GPS/UMI podem ser classificados entre fracamente e fortemente acoplados. A literatura tratando da localização de robôs móveis utilizando GPS/UMI apresenta, em geral, abordagens fracamente acopladas, em que a fusão sensorial é realizada entre estimativas de posição e velocidade fornecidas pelo receptor GPS e os dados da UMI. Apesar disso, soluções fortemente acopladas, em que a integração dos dados do GPS é feita a nível de *pseudoranges*, também são observadas, principalmente em trabalhos desenvolvidos por fabricantes de hardware dedicado. Aghili e Salerno [38], por exemplo, propõem um modelo estatístico de erro para as *pseudoranges*. Edwards, Clark e Bevly [22] apresentam uma implementação de um sistema profundamente integrado, baseado no algoritmo de rastreamento de vetores.

Ângulos de Euler são amplamente utilizados para a representação da atitude de robôs móveis, embora abordagens baseadas em quatérnios [8, 9, 20] tenham adquirido maior popularidade nos últimos anos devido à ausência do fenômeno denominado *gimbal lock* nesta representação. Em geral a determinação da atitude de robôs móveis em ambientes externos é feita a partir das medidas de acelerômetros, girômetros e magnetômetros, eventualmente auxiliadas por medidas de odometria, mas há trabalhos que também utilizam dados de receptores GPS para esta tarefa [18, 38].

Algoritmos distribuídos para localização utilizando GPS/UMI não foram suficientemente explorados na literatura, de acordo com a pesquisa bibliográfica realizada. Nas abordagens tradicionais é necessária alguma forma de observação entre robôs (e.g. câmeras, LIDAR) para possibilitar a troca de informações de localização [33, 34, 58, 59]. Alguns receptores GPS disponibilizam informações de correção DGPS que podem ser transmitidas por um meio sem fio de uma estação

base fixa para estações móveis. Esta característica pode ser aproveitada em um sistema de localização multi-robôs baseado em GPS/UMI através da relaxação da condição de estação base estática, em que todos robôs atuam como estações base e receptores de medições. Existem trabalhos que se aproveitam de características similares ao GPS diferencial, embora com modelos bastante simples [35, 60–63]. Quando se considera que tecnologias DGPS são capazes de mitigar efeitos ionosféricos, que correspondem a erros da ordem de 5m [10], é possível apreciar seu grande potencial de uso em sistemas de localização para robôs móveis.

2.3 Modelagem matemática

O modelo adotado neste manuscrito é similar ao utilizado em trabalhos anteriores desenvolvidos no LARA [7–9]. Esta seção descreve as equações que compõem o modelo, os parâmetros envolvidos e as etapas do algoritmo de localização. Mais detalhes sobre o filtros de Kalman e representações de atitude utilizando quatérnios podem ser vistos nos Anexos III e IV.

Sistemas de coordenadas

Os seguintes sistemas de coordenadas são empregados neste trabalho (Figura 2.1):

- **Sistema de coordenadas inercial**, ECI (do inglês *Earth-Centered Inertial*) ou Sistema I , é um sistema de coordenadas fixo em relação à rotação da Terra. Este sistema tem sua origem fixada no centro de gravidade da Terra, o eixo X alinhado à intersecção da eclíptica com o equador celestial (no momento do equinócio da primavera no hemisfério norte), o eixo Z alinhado ao pólo norte, e o eixo Y determinado conforme a regra da mão direita.
- **Sistema de coordenadas centrado e fixado na Terra**, ECEF (do inglês *Earth-Centered, Earth Fixed*) ou Sistema E , é um sistema de coordenadas que acompanha a rotação da Terra. Sua origem coincide com a origem do Sistema I , mas seu eixo X é alinhado à intersecção entre o Equador e o meridiano de Greenwich.
- **Sistema de coordenadas fixo ao robô** ou Sistema B , é um sistema de coordenadas fixado no chassis do robô, preferencialmente em seu centro de gravidade. No sistema desenvolvido, em particular, a origem deste sistema coincide com a origem do sistema de coordenadas da UMI, e as medidas dos sensores inerciais são tomadas em torno de seus eixos.
- **Sistema de coordenadas de navegação** ou Sistema N , é definido neste trabalho como um sistema geográfico local que é mantido fixo¹, com sua origem coincidente à posição do robô no instante de inicialização do sistema. O eixo Z deste sistema de coordenadas aponta para o centro da Terra, o eixo X aponta em direção ao norte geográfico e o eixo Y é perpendicular aos anteriores, formando um plano XY tangente à superfície da Terra.

¹Por se tratar de um sistema fixo, esta definição de Sistema N difere daquela dada por Titterton e Weston [12], em que a origem do Sistema N coincide com a origem do Sistema B a todo instante

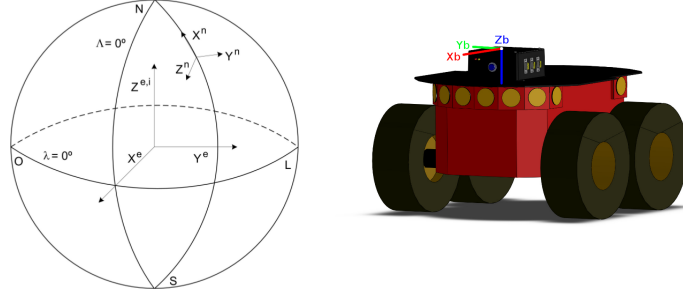


Figura 2.1: Sistemas de coordenadas de referência

Algoritmo TRIAD

O algoritmo TRIAD é uma solução determinística para a estimativa da atitude de um corpo em relação a um sistema de coordenadas a partir de dois vetores não-colineares definidos em seu sistema de coordenadas, desenvolvido em 1964 por Harold D. Black. Esta estimativa é dada diretamente, conforme o conjunto de equações 2.1, em que \mathbf{u} e \mathbf{v} são vetores unitários correspondentes aos vetores de referência. No caso do sistema desenvolvido, estes vetores são referentes a \mathbf{g} e \mathbf{m} , considerados fixos e constantes no Sistema N e mensuráveis no Sistema B . Para tanto, assume-se que a aceleração do robô é desprezível em relação à gravidade e que não há fontes significativas de interferência magnética. Apesar da atitude ser dada no formato de matriz de rotação, sua conversão para a representação em quatérnios é simples, conforme delineado no Anexo IV.

$$\mathbf{C}_n^b = \begin{bmatrix} \mathbf{i}^b & \vdots & \mathbf{j}^b & \vdots & \mathbf{k}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}^n & \vdots & \mathbf{j}^n & \vdots & \mathbf{k}^n \end{bmatrix}^T \quad (2.1a)$$

$$\mathbf{i} = \mathbf{u} \quad (2.1b)$$

$$\mathbf{j} = \frac{\mathbf{u} \times \mathbf{v}}{|\mathbf{u} \times \mathbf{v}|} \quad (2.1c)$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{i} \times \mathbf{j} \quad (2.1d)$$

Resumo da abordagem adotada

Este trabalho se utiliza do filtro de Kalman Estendido Correlato para fusão dos dados fornecido um receptor GPS e uma UMI dotada de girômetro, acelerômetro e magnetômetro triaxiais. São utilizadas as estimativas de posição e velocidade fornecidas pelo receptor GPS no Sistema E , e as medições de velocidade angular, força específica e campo magnético fornecidas pela UMI no Sistema B . Supõe-se também que as medições provenientes do girômetro e acelerômetro são perturbadas por vieses que variam lentamente conforme um modelo de passeio aleatório.

As estimativas fornecidas pelo receptor GPS utilizado contém informações sobre a incerteza das medidas que podem ser utilizadas no filtro². As medidas fornecidas pela UMI, por outro lado,

²É vantajoso termos informações acerca da incerteza das estimativas de posição e velocidade do receptor GPS, uma vez que já foi tratado na literatura que o erro destas medidas varia conforme a posição e o tempo

não contém tais informações, de modo que a variância adotada para cada um dos sensores que a compõem é aquela caracterizada pelo fabricante no *datasheet*, ou estimada através das medições.

O vetor de estado \mathbf{x} é composto pelo quatérnio de atitude, vetor de velocidade e vetor de posição do robô, expressos no Sistema N , além dos vieses do girômetro e acelerômetro, totalizando 16 variáveis de estado. O vetor de controle \mathbf{u} é composto pelas medições do girômetro e acelerômetro³. Por fim, o vetor de medição \mathbf{y} é composto pela estimativa do quatérnio de atitude fornecida pelo algoritmo TRIAD a partir das medições do acelerômetro e magnetômetro, das estimativas de velocidade e posição fornecidas pelo receptor GPS referidas no Sistema N , e de um termo de erro relacionado à uma pseudo-medição que visa manter a norma unitária do quatérnio de atitude, essencial para que este represente corretamente uma transformação de coordenadas. A equação 2.2 ressalta os vetores mencionados, que formam a base do filtro adotado.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_n^b \\ \mathbf{v}^n \\ \mathbf{r}^n \\ \mathbf{b}_\omega \\ \mathbf{b}_f \end{bmatrix}_{16 \times 1} ; \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_{ib}^b \\ \mathbf{f}^b \end{bmatrix}_{6 \times 1} ; \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_n^b \\ \mathbf{v}^n \\ \mathbf{r}^n \\ e_{pseudo} \end{bmatrix}_{11 \times 1} \quad (2.2)$$

Modelo de processo

As equações diferenciais básicas que regem a dinâmica do sistema são dadas pelo conjunto de equações 2.3, em que a matriz \mathbf{A} é obtida a partir da estimativa corrente de atitude \mathbf{q}_n^b através de uma transformação da representação em quatérnios para a representação em matriz de rotação. O vetor gravidade \mathbf{g}^n é considerado um parâmetro fixo e pré-determinado do modelo.

$$\dot{\mathbf{q}}_n^b = -\frac{1}{2} \mathbf{q}_n^b \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{\omega}_{ib}^b \end{bmatrix} \quad (2.3a)$$

$$\dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{C}_n^b \mathbf{f}^b + \mathbf{g}^n \quad (2.3b)$$

$$\dot{\mathbf{r}}^n = \mathbf{v}^n \quad (2.3c)$$

Conforme o modelo adotado as medidas do girômetro e acelerômetro são enviesadas por \mathbf{b}_ω e \mathbf{b}_f e, portanto, devem ser corrigidas conforme o conjunto de equações 2.4 antes de serem aplicadas nas equações de processo. Estes vieses fazem parte do vetor de estados, sendo estimados pelo filtro.

$$\boldsymbol{\omega}_{ib}^b = \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ib}^b - \mathbf{b}_\omega \quad (2.4a)$$

$$\mathbf{f}^b = \tilde{\mathbf{f}}^b - \mathbf{b}_f \quad (2.4b)$$

A discretização do modelo não-linear apresentado no conjunto de equações 2.3 é dada pelo conjunto de equações 2.5. Na equação 2.5a, há termos auxiliares para facilitar a apresentação do

³Apesar de efetivamente fornecerem medições estes sensores dão informações sobre como o processo evolui e, por isso, suas medições são considerados entradas de atuação neste contexto

resultado, que são detalhados no conjunto de equações 2.6. A matriz auxiliar \mathbf{W} é formada a partir das componentes de $\boldsymbol{\omega}_{ib}^b$ conforme a definição do produto de quatérnios. Os termos δ_i representam pequenos incrementos de ângulo em torno de cada eixo no referencial do corpo. O termo d representa, por sua vez, a norma do vetor de incrementos de ângulo $\delta = (\delta_x, \delta_y, \delta_z)$.

$$\mathbf{q}_{n(k)}^b = e^{-\mathbf{W}^{(k)}\Delta t} \mathbf{q}_{n(k-1)}^b \quad (2.5a)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(d/2) & -\delta_x \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & -\delta_y \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & -\delta_z \frac{\text{sen}(d/2)}{d} \\ \delta_x \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & \cos(d/2) & \delta_z \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & -\delta_y \frac{\text{sen}(d/2)}{d} \\ \delta_y \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & -\delta_z \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & \cos(d/2) & \delta_x \frac{\text{sen}(d/2)}{d} \\ \delta_z \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & \delta_y \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & -\delta_x \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & \cos(d/2) \end{bmatrix} \mathbf{q}_{n(k-1)}^b \quad (2.5b)$$

$$\mathbf{v}^n_{(k)} = \mathbf{v}^n_{(k-1)} + (\mathbf{C}_{n(k-1)}^b \mathbf{f}^b_{(k)} + \mathbf{g}^n) \Delta t \quad (2.5c)$$

$$\mathbf{r}^n_{(k)} = \mathbf{r}^n_{(k-1)} + \mathbf{v}^n_{(k-1)} \Delta t + (\mathbf{C}_{n(k-1)}^b \mathbf{f}^b_{(k)} + \mathbf{g}^n) \frac{\Delta t^2}{2} \quad (2.5d)$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ -\omega_x & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ -\omega_y & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_z & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6a)$$

$$\delta_i = \omega_i \Delta t \quad (2.6b)$$

$$d = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2} \quad (2.6c)$$

Modelo de medição

As medições que são realizadas pelo sistema de localização proposto são todas diretamente relacionadas ao vetor de estados, exceto pela pseudo-medição da norma do quatérnio de atitude do robô. Apesar disso, elas precisam ser adaptadas para refletirem o vetor de medição apresentado previamente. Os dados obtidos do acelerômetro e magnetômetro, por exemplo, são processados utilizando-se o algoritmo TRIAD para determinação de uma medição direta do quatérnio de atitude do robô, conforme o conjunto de equações 2.1. Já as estimativas de posição e velocidade fornecidas pelo receptor GPS, que são dadas no Sistema E , precisam ser convertidas para o Sistema N , utilizando a matriz de rotação \mathbf{C}_n^e e as coordenadas da origem do Sistema N . Esta matriz é obtida a partir da latitude λ e longitude Λ correspondentes à posição inicial do robô, que define a origem do Sistema N , conforme a equação 2.7. O conjunto de equações 2.9 apresenta as conversões que devem ser aplicadas às medições do GPS para sua aplicação no filtro.

$$\mathbf{C}_n^e = \begin{bmatrix} -\text{sen}\lambda \cos\Lambda & -\text{sen}\lambda \text{sen}\Lambda & \cos\lambda \\ -\text{sen}\Lambda & \cos\Lambda & 0 \\ -\cos\lambda \cos\Lambda & -\cos\lambda \text{sen}\Lambda & -\text{sen}\lambda \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{r}^n(k) = \mathbf{C}_n^e(\mathbf{r}_{(k)}^e - \mathbf{r}_{(0)}^e) \quad (2.8)$$

$$\mathbf{v}^n(k) = \mathbf{C}_n^e \mathbf{v}_{(k)}^e \quad (2.9)$$

Um fator importante a ser ressaltado é que as medições de posição e velocidade no receptor GPS podem ser consideradas descorrelacionadas, o que possibilita que ambas variáveis sejam estimadas independentemente. Isto se dá uma vez que a velocidade não é estimada diretamente pela taxa de variação da posição obtida pelo receptor GPS através da triangulação de *pseudoranges*, mas através de técnicas baseadas no efeito Doppler.

De acordo com Kuipers [64], operadores de rotação baseados em quatérnios devem ter norma unitária. Entretanto, devido a erros numéricos inerentes ao algoritmo TRIAD para correção de atitude e ao processo de propagação de atitude (equações 2.1 e 2.5a), observa-se a divergência da norma do quatérnio durante a execução de algoritmos de localização que utilizam estas equações. A abordagem utilizada neste trabalho para evitar este problema é a inclusão de uma pseudo-medição do desvio da norma do quatérnio para a norma unitária [7], conforme visto na equação 2.10. Esta metodologia é alinhada a técnicas de filtragem por restrições de igualdade [65], e deve ser aplicada a cada etapa de correção para garantir a estabilidade do algoritmo de localização.

$$e_{pseudo(k)} = 1 - \left\| \mathbf{q}_{n(k)}^b \right\| \quad (2.10)$$

Equações do filtro de Kalman estendido correlato

Conforme o desenvolvimento apresentado no Anexo III, a definição do filtro de Kalman inicia-se com a apresentação do modelo do sistema em questão. É possível observar que o modelo do conjunto de equações 2.11 se adequa ao problema de localização apresentado, definido-se os vetores de estado, controle e medição de acordo com a equação 2.2 e utilizando-se as equações 2.5 a 2.10.

$$\mathbf{x}_{(k)} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{(k-1)}, \mathbf{u}_{(k)}) + \mathbf{w}_{(k)} \quad (2.11a)$$

$$\mathbf{y}_{(k)} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}) + \mathbf{v}_{(k)} \quad (2.11b)$$

Para maior clareza, explicita-se os termos das funções \mathbf{f} e \mathbf{h} nas equações 2.12 e 2.13. A partir das equações do modelo de proceso e de medição apresentados, desenvolveu-se cada termo através da aplicação das equações para conversão de quatérnios para matrizes de cossenos diretores e da multiplicação das matrizes envolvidas nas equações vetoriais. O conjunto de equações 2.14 contém termos que foram resumidos na expansão de $\mathbf{C}_{n(k-1)}^b \mathbf{f}_{(k)}^b$. Os índices temporais dos termos dos vetores de estado e controle envolvidos foram omitidos para facilitar a visualização das equações, ficando implícitos pela definição dos argumentos das funções em questão.

O próximo passo é a linearização do modelo não-linear apresentado, conforme apresentado nas equações 2.15 a 2.18. Vale ressaltar que nesta derivação considera-se que há ruído no vetor de

controle, e por isso torna-se necessário calcular a jacobiana $\mathbf{F}_u = \frac{\partial f}{\partial u}$ para a etapa de propagação de incerteza. Esta matriz também é utilizada quando é considerada a correlação entre ruído de processo e medição no FEKC – uma consequência direta da utilização do algoritmo TRIAD na etapa de correção do algoritmo. O conjunto de equações 2.19 contém derivadas parciais que foram resumidas nas jacobianas \mathbf{F}_x , \mathbf{F}_u e \mathbf{H}_x para melhor visualização de sua estrutura, e o conjunto de equações 2.20 contém termos destas derivadas parciais que foram resumidos pelo mesmo motivo.

Um detalhe importante é que as jacobianas \mathbf{G}_u e \mathbf{G}_m , relativas à medição convertida do TRIAD, são calculadas numericamente nesta implementação⁴, e portanto não aparecem explicitamente na dedução abaixo. Utilizando o modelo linearizado é possível aplicar o filtro de Kalman estendido correlato, apresentado no Anexo III, conforme as etapas delineadas no algoritmo 1.

Modelo não-linear

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_{(k-1)}, \mathbf{u}_{(k)}) = \begin{bmatrix} \cos(d/2)q_0 & -\delta_x \frac{\text{sen}(d/2)}{d}q_1 & -\delta_y \frac{\text{sen}(d/2)}{d}q_2 & -\delta_z \frac{\text{sen}(d/2)}{d}q_3 \\ \delta_x \frac{\text{sen}(d/2)}{d}q_0 & \cos(d/2)q_1 & \delta_z \frac{\text{sen}(d/2)}{d}q_2 & -\delta_y \frac{\text{sen}(d/2)}{d}q_3 \\ -\delta_y \frac{\text{sen}(d/2)}{d}q_0 & \delta_z \frac{\text{sen}(d/2)}{d}q_1 & \cos(d/2)q_2 & -\delta_x \frac{\text{sen}(d/2)}{d}q_3 \\ -\delta_z \frac{\text{sen}(d/2)}{d}q_0 & -\delta_y \frac{\text{sen}(d/2)}{d}q_1 & \delta_x \frac{\text{sen}(d/2)}{d}q_2 & \cos(d/2)q_3 \\ v_x + (c_x + g_x)\Delta t \\ v_y + (c_x + g_y)\Delta t \\ v_z + (c_z + g_z)\Delta t \\ r_x + v_x\Delta t + (c_x + g_x)\frac{\Delta t^2}{2} \\ r_y + v_y\Delta t + (c_y + g_y)\frac{\Delta t^2}{2} \\ r_z + v_z\Delta t + (c_z + g_z)\frac{\Delta t^2}{2} \\ b_{\omega x} \\ b_{\omega y} \\ b_{\omega z} \\ b_{f x} \\ b_{f y} \\ b_{f z} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}) = \left[q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad v_x \quad v_y \quad v_z \quad r_x \quad r_y \quad r_z \quad 1 - \|\mathbf{q}_n^b\| \right]^T \quad (2.13)$$

$$c_x = (q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)f_x + (2q_1q_2 - 2q_0q_3)f_y + (2q_1q_3 + 2q_0q_2)f_z \quad (2.14a)$$

$$c_y = (2q_1q_2 + 2q_0q_3)f_x + (q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2)f_y + (2q_2q_3 - 2q_0q_1)f_z \quad (2.14b)$$

$$c_z = (2q_1q_3 - 2q_0q_2)f_x + (2q_2q_3 + 2q_0q_1)f_y + (q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2)f_z \quad (2.14c)$$

⁴É possível observar como isso é feito no arquivo `localization_filter_model_gtriad.m`, presente no CD.

Linearização do modelo

$$\mathbf{x}_{(k)} \approx \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}, \mathbf{u}_{(k)}) + \mathbf{F}_x \left(\mathbf{x}_{(k-1)} - \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} \right) + \mathbf{F}_u \mathbf{u}_{(k)} + \mathbf{w}_{(k)} \quad (2.15a)$$

$$\mathbf{y}_{(k)} \approx \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{(k)}) + \mathbf{H}_x \left(\mathbf{x}_{(k-1)} - \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} \right) + \mathbf{v}_{(k)} \quad (2.15b)$$

$$\mathbf{F}_x = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_4 & \mathbf{0}_{4 \times 3} & \mathbf{0}_{4 \times 3} & \frac{\partial \mathbf{q}_n^b}{\partial \mathbf{b}_\omega} & \mathbf{0}_{4 \times 3} \\ \frac{\partial \mathbf{v}^n}{\partial \mathbf{q}_n^b} & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \frac{\partial \mathbf{v}^n}{\partial \mathbf{b}_f} \\ \frac{\partial \mathbf{r}^n}{\partial \mathbf{q}_n^b} & \Delta t \mathbf{I}_3 & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \frac{\partial \mathbf{r}^n}{\partial \mathbf{b}_f} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{F}_u = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{q}_n^b}{\partial \omega_{ib}^b} & \mathbf{0}_{4 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \frac{\partial \mathbf{v}^n}{\partial \mathbf{f}^b} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \frac{\partial \mathbf{r}^n}{\partial \mathbf{f}^b} \\ \mathbf{0}_{6 \times 3} & \mathbf{0}_{6 \times 3} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{H}_x = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_4 & \mathbf{0}_{4 \times 3} & \mathbf{0}_{4 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 \\ \frac{\partial e_{pseudo}}{\partial \mathbf{q}_n^b} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \mathbf{q}_n^b}{\partial \mathbf{b}_w} = - \begin{bmatrix} \alpha_x q_0 + \beta_x \Sigma_{q0} - \gamma q_1 & \alpha_y q_0 + \beta_y \Sigma_{q0} - \gamma q_2 & \alpha_z q_0 + \beta_z \Sigma_{q0} - \gamma q_3 \\ \alpha_x q_1 + \beta_x \Sigma_{q1} + \gamma q_0 & \alpha_y q_1 + \beta_y \Sigma_{q1} - \gamma q_3 & \alpha_z q_1 + \beta_z \Sigma_{q1} + \gamma q_2 \\ \alpha_x q_2 + \beta_x \Sigma_{q2} + \gamma q_3 & \alpha_y q_2 + \beta_y \Sigma_{q2} + \gamma q_0 & \alpha_z q_2 + \beta_z \Sigma_{q2} - \gamma q_1 \\ \alpha_x q_3 + \beta_x \Sigma_{q3} - \gamma q_2 & \alpha_y q_3 + \beta_y \Sigma_{q3} + \gamma q_1 & \alpha_z q_3 + \beta_z \Sigma_{q3} + \gamma q_0 \end{bmatrix} \quad (2.19a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{q}_n^b}{\partial \omega_{ib}^b} = \begin{bmatrix} \alpha_x q_0 + \beta_x \Sigma_{q0} - \gamma q_1 & \alpha_y q_0 + \beta_y \Sigma_{q0} - \gamma q_2 & \alpha_z q_0 + \beta_z \Sigma_{q0} - \gamma q_3 \\ \alpha_x q_1 + \beta_x \Sigma_{q1} + \gamma q_0 & \alpha_y q_1 + \beta_y \Sigma_{q1} - \gamma q_3 & \alpha_z q_1 + \beta_z \Sigma_{q1} + \gamma q_2 \\ \alpha_x q_2 + \beta_x \Sigma_{q2} + \gamma q_3 & \alpha_y q_2 + \beta_y \Sigma_{q2} + \gamma q_0 & \alpha_z q_2 + \beta_z \Sigma_{q2} - \gamma q_1 \\ \alpha_x q_3 + \beta_x \Sigma_{q3} - \gamma q_2 & \alpha_y q_3 + \beta_y \Sigma_{q3} + \gamma q_1 & \alpha_z q_3 + \beta_z \Sigma_{q3} + \gamma q_0 \end{bmatrix} \quad (2.19b)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}^n}{\partial \mathbf{q}_n^b} = 2\Phi \Delta t \quad \frac{\partial \mathbf{v}^n}{\partial \mathbf{b}_f} = -\Theta \Delta t \quad \frac{\partial \mathbf{v}^n}{\partial \mathbf{f}^b} = \Theta \Delta t \quad (2.19c)$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}^n}{\partial \mathbf{q}_n^b} = 2\Phi \frac{\Delta t^2}{2} \quad \frac{\partial \mathbf{r}^n}{\partial \mathbf{b}_f} = -\Theta \frac{\Delta t^2}{2} \quad \frac{\partial \mathbf{r}^n}{\partial \mathbf{f}^b} = \Theta \frac{\Delta t^2}{2} \quad (2.19d)$$

$$\frac{\partial e_{pseudo}}{\partial \mathbf{q}_n^b} = \left[-\frac{q_0}{\|\mathbf{q}_n^b\|} \quad -\frac{q_1}{\|\mathbf{q}_n^b\|} \quad -\frac{q_2}{\|\mathbf{q}_n^b\|} \quad -\frac{q_3}{\|\mathbf{q}_n^b\|} \right] \quad (2.19e)$$

$$\alpha_i = -\frac{\text{sen}(d/2)}{2d} \delta_i \Delta t \quad (2.20a)$$

$$\beta_i = \frac{[-\frac{d}{2} \cos(d/2) + \text{sen}(d/2)]}{d^3} \delta_i \Delta t \quad (2.20b)$$

$$\gamma = \frac{\text{sen}(d/2)}{d} \Delta t \quad (2.20c)$$

$$\Sigma_{q0} = (\delta_x q_1 + \delta_y q_2 + \delta_z q_3) \quad (2.20d)$$

$$\Sigma_{q1} = (-\delta_x q_0 + \delta_y q_3 - \delta_z q_2) \quad (2.20e)$$

$$\Sigma_{q2} = (-\delta_x q_3 - \delta_y q_0 + \delta_z q_1) \quad (2.20f)$$

$$\Sigma_{q3} = (\delta_x q_2 - \delta_y q_1 - \delta_z q_0) \quad (2.20g)$$

$$(2.20h)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} (q_0 f_x - q_3 f_y + q_2 f_z) & (q_1 f_x + q_2 f_y + q_3 f_z) & (-q_2 f_x + q_1 f_y + q_0 f_z) & (-q_3 f_x - q_0 f_y + q_1 f_z) \\ (q_3 f_x + q_0 f_y - q_1 f_z) & (q_2 f_x - q_1 f_y - q_0 f_z) & (q_1 f_x + q_2 f_y + q_3 f_z) & (q_0 f_x - q_3 f_y + q_2 f_z) \\ (q_2 f_x - q_1 f_y + q_0 f_z) & (q_3 f_x + q_0 f_y - q_1 f_z) & (-q_0 f_x + q_3 f_y - q_2 f_z) & (q_1 f_x + q_2 f_y + q_3 f_z) \end{bmatrix} \quad (2.20i)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} (q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2) & (2q_1 q_2 - 2q_0 q_3) & (2q_1 q_3 + 2q_0 q_2) \\ (2q_1 q_2 + 2q_0 q_3) & (q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2) & (2q_2 q_3 - 2q_0 q_1) \\ (2q_1 q_3 - 2q_0 q_2) & (2q_2 q_3 + 2q_0 q_1) & (q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) \end{bmatrix} \quad (2.20j)$$

Inicialização: $\hat{\mathbf{x}}_{(0)}, \mathbf{P}_{(0)}$ **Parâmetros ajustáveis:** $\mathbf{Q}_{(k)}, \mathbf{R}_{(k)}$ **Laço Principal**Se há dados não processados , **então**Se dados provenientes da UMI , **então****Etapa de Predição :**

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{(k)} = \mathbf{F}_u \eta_u \mathbf{F}_u^T + \mathbf{Q}_{(k)}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} \leftarrow \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}, \mathbf{u}_{(k)})$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \leftarrow \mathbf{F}_x \hat{\mathbf{P}}_{(k-1)} \mathbf{F}_x^T + \tilde{\mathbf{Q}}_{(k)}$$

Etapa de Correção (atitude) :

$$\tilde{\mathbf{R}}_{(k)} = \mathbf{G}_u \eta_u \mathbf{G}_u^T + \mathbf{G}_m \eta_m \mathbf{G}_m^T + \mathbf{R}_{(k)}$$

$$\tilde{\mathbf{S}}_{(k)} = \mathbf{F}_u \eta_u \mathbf{G}_u$$

$$\mathbf{K}_{(k)} = \left(\hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_x^T + \tilde{\mathbf{S}}_{(k)} \right) \left(\mathbf{H}_x \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_x^T + \mathbf{H}_x \tilde{\mathbf{S}}_{(k)} + \tilde{\mathbf{S}}_{(k)}^T \mathbf{H}_x^T + \tilde{\mathbf{R}}_{(k)} \right)^{-1}$$

$$\mathbf{y}_{(k)}^{[1:4]} = \mathbf{g}(\mathbf{u}_{(k)}, \mathbf{m}_{(k)})$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k)} \leftarrow \hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} + \mathbf{K}_{(k)} \left(\mathbf{y}_{(k)} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)}) \right)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{(k)} \leftarrow \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{H}_x \right) \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)}$$

Se dados provenientes do GPS , **então****Etapa de Correção (posição e velocidade) :**

$$\mathbf{K}_{(k)} = \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_x^T \left(\mathbf{H}_x \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_x^T + \tilde{\mathbf{R}}_{(k)} \right)^{-1}$$

$$\mathbf{y}_{(k)}^{[5:10]} = \mathbf{y}_{gps}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k)} \leftarrow \hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} + \mathbf{K}_{(k)} \left(\mathbf{y}_{(k)} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)}) \right)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{(k)} \leftarrow \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{H}_x \right) \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)}$$

Etapa de Correção (pseudo-medição) :

$$\mathbf{K}_{(k)} = \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_x^T \left(\mathbf{H}_x \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_x^T + \tilde{\mathbf{R}}_{(k)} \right)^{-1}$$

$$\mathbf{y}_{(k)}^{[11]} = 1 - \left\| \mathbf{q}_n^b \right\|$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k)} \leftarrow \hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} + \mathbf{K}_{(k)} \left(\mathbf{y}_{(k)} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)}) \right)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{(k)} \leftarrow \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{H}_x \right) \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)}$$

Capítulo 3

Desenvolvimento

Sometimes I lie awake at night, and ask, 'Where have I gone wrong?' Then a voice says to me, 'This is going to take more than one night.'

Charles M. Schulz

3.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo descrever o projeto de *hardware* e *software* do módulo sensorial GPS/UMI, bem como sua utilização no sistema de localização proposto. A Figura 3.1 ilustra a funcionalidade principal do módulo sensorial por meio de um diagrama de blocos, ressaltando dois fatores importantes na especificação do *hardware*: a alimentação adequada dos sensores e a conversão dos padrões de comunicação serial presentes nos sensores para o padrão RS-232, mais adequado para as plataformas robóticas presentes no laboratório, através do uso de transeptores.

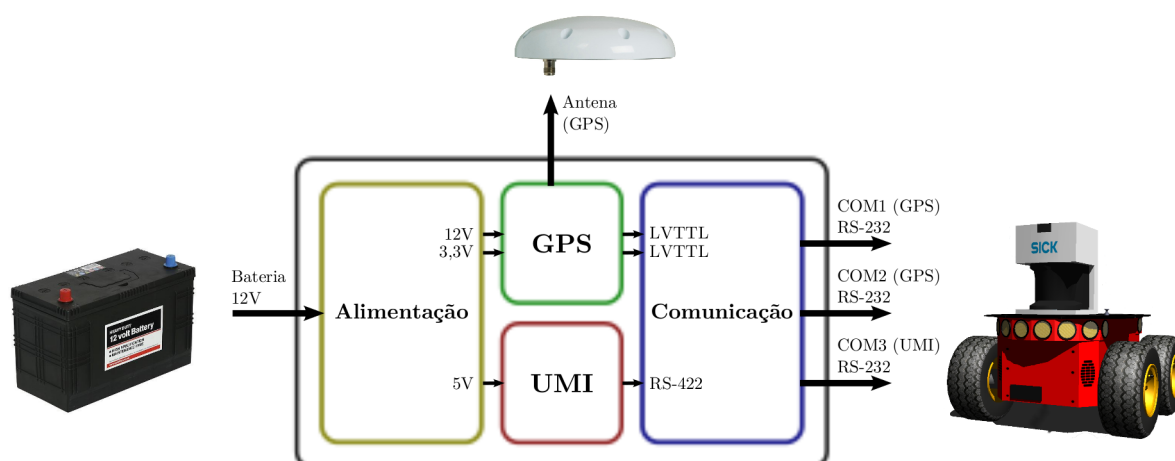


Figura 3.1: Diagrama de blocos do módulo sensorial GPS/UMI

A Seção 3.2 apresenta detalhes relativos à escolha de componentes para tais fins, ao projeto de circuito impresso da placa de interfaceamento dos sensores, o projeto mecânico do módulo sensorial e da fixação da antena do GPS, e características importantes dos sensores escolhidos. A Seção 3.3 apresenta a estrutura do *software* utilizado para aquisição de dados dos sensores via

porta serial, para separação dos dados de acordo com o formato de pacotes de dados utilizado por cada sensor, e sua integração com o *software* de localização. A Seção 3.4 descreve com mais detalhes como são utilizados os dados dos sensores no sistema de localização proposto, e a forma como foram implementados os filtros utilizados neste trabalho.

3.2 Descrição do Hardware

Durante um projeto de *hardware*, a escolha dos componentes em geral gira em torno de um bloco de componentes essenciais para que as funcionalidades previstas para o projeto sejam cumpridas. Neste trabalho, por exemplo, este bloco é formado pelos sensores escolhidos: o receptor GPS NovAtel OEMV-1 e a unidade de medição inercial MEMSense NanoIMU.

Após determinado este bloco básico, são escolhidos componentes auxiliares que permitem o funcionamento dos componentes essenciais dentro de suas especificações. Parte-se então para a definição das conexões entre componentes e circuitos necessários para isto, através do diagrama esquemático do circuito. Em seguida, é possível realizar o circuito fisicamente por meio de um projeto de placa de circuito impresso, montagem em placa perfurada, montagem em *protoboard* ou qualquer outra forma que for conveniente para o projetista. Finalmente, é interessante que seja elaborado um conjunto de testes para avaliação do *hardware* quanto ao cumprimento dos requisitos de projeto, e eventual correção de determinados parâmetros em outra iteração de desenvolvimento.

Esta seção visa delinear o desenvolvimento do módulo sensorial GPS/UMI, listando as principais características dos sensores utilizados, justificando a escolha de componentes auxiliares e demais decisões de projeto, e apresentando eventuais dificuldades observadas durante o projeto.

3.2.1 GPS NovAtel OEMV-1

A família OEMV da NovAtel [66,67] consiste em placas de circuito impresso contendo receptores GNSS de frequência simples, dupla ou tripla, com níveis variados de integração entre diferentes modalidades de GPS, tais como GPS L1 C/A, L2C, L2 P(Y), L5 (código e portadora), GLONASS L1 e L2 (código e portadora), e banda-L (CDGPS e OmniSTAR) em um máximo de 72 canais, que permitem que o usuário envie comandos através de suas portas de comunicação para configuração de suas funções, obtenção de *log* ou aquisição de dados. A Figura 3.2 apresenta o GPS NovAtel OEMV-1 e a Tabela 3.1 indica suas principais características, enquanto a Figura 3.3 e a Tabela 3.2 apresentam os sinais de cada pino do conector da placa.

Os receptores da família OEMV suportam implementações SBAS e são capazes de posicionamento RTK, que leva o erro de estimação ao nível de centímetros através de sinais de correção do sinal GPS enviados por um receptor de localização conhecida, compensando assim efeitos atmosféricos, erros orbitais e outras fontes de erro de medição. Além disso, sua tecnologia de *Pulse Aperture Correlator* (PAC) permite que os efeitos de propagação multi-caminhos sejam mitigados mesmo com taxas de aquisição de dados na ordem de 20Hz. Todas estas tecnologias auxiliam na convergência das estimativas de posição dos filtros estocásticos que serão propostos, uma vez que estes se beneficiam da redução de erros de medição e altas taxas de aquisição de dados.

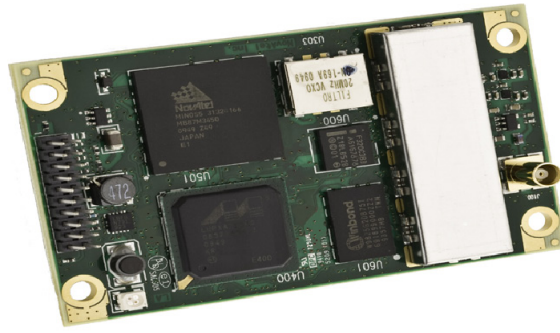


Figura 3.2: GPS NovAtel OEMV-1

Tabela 3.1: Características do GPS NovAtel OEMV-1

Característica	Descrição	Detalhes
Dimensões	Largura e Comprimento	46mm x 71mm
Canais de dados	Número e Tipo	14 canais L1, 2 canais SBAS
Interfaces de comunicação	Número e Tipo	1 porta CAN (sem transceiver), 1 porta USB 1.1, 3 portas LV-TTL
Taxa de aquisição de dados	Típica e Máxima	20Hz (Posição, Velocidade e Tempo) 50 Hz (Dados Brutos)
Tempo até primeira estimativa válida	Típico	<i>Cold start</i> : 60s <i>Hot start</i> : 35s
GPS Diferencial	Tipos	GBAS/SBAS/OmniSTAR/CDGPS
Correções DGPS	Mensagens Suportadas	RTCA/RTCM/CMR
Obtenção de <i>Log</i>	Capacidade de registro de dados e eventos	2 entradas para ativação de <i>logs</i> baseados em eventos externos
Tecnologias disponíveis em firmware	Tecnologias de Localização	AdVance RTK 20cm (RT-20) Pulse Aperture Correlator Pseudo Range/Delta Phase (PDP) GL1DE

Além das tecnologias incorporadas a esta família de receptores é importante ressaltar que estes são capazes de fornecer para o usuário tanto estimativas de posição e velocidade no sistema de coordenadas ECEF, quanto as *pseudoranges* estimadas entre o receptor e os satélites do sistema GPS, de modo que uma abordagem fortemente acoplada para a localização torna-se possível. Mensagens no padrão NMEA também são suportadas por estes receptores.

Outra funcionalidade interessante é a disponibilidade de correções DGPS em vários formatos, que permite a utilização de informações de um receptor GPS externo para mitigação de efeitos atmosféricos e conseqüente melhoria da estimativa de posição fornecida. Esta característica possibilita a implementação de sistemas de localização em que uma estação base envia correções para múltiplos robôs, bem como sistemas distribuídos baseados em troca de mensagens entre robôs.

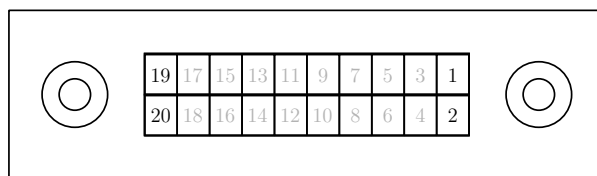


Figura 3.3: Conector do GPS NovAtel OEMV-1

Tabela 3.2: Pinos do GPS NovAtel OEMV-1

Sinal	Comportamento	Descrição	Pino
LNA_PWR	Entrada CC	Alimentação para LNA da antena externa	1
V_{IN}	Entrada CC	Alimentação CC para a placa	2
USB D(-)	Bi-direcional	Entrada de dados USB (-)	3
USB D(+) COM3_RX	Multiplexado	Entrada de dados USB (+) (Padrão) Dados recebidos para entrada COM3	4
RESETIN	<i>Strobe</i>	Reinicia placa	5
VARF CAN1_RX	Multiplexado	Saída de frequência variável (Padrão) Barramento de recepção CAN1	6
Event2 CAN1_TX	Multiplexado	Sinalização de evento para <i>log</i> (Padrão) Barramento de transmissão CAN1	7
CAN2_RX	Bi-direcional	Barramento de recepção CAN2	8
Event1 COM3_TX	Multiplexado	Sinalização de evento para <i>log</i> (Padrão) Dados transmitidos para saída COM3	9
GND	Ground	Aterramento digital da placa	10
COM1_TX	Saída	Dados transmitidos para saída COM1	11
COM1_RX	Entrada	Dados recebidos para entrada COM1	12
GND	Ground	Aterramento digital da placa	13
COM2_TX	Saída	Dados transmitidos para saída COM2	14
COM2_RX	Entrada	Dados recebidos para entrada COM2	15
GND	Ground	Aterramento digital da placa	16
PV	<i>Strobe</i>	Saída em 3,3V indica posição válida	17
GND	Ground	Aterramento digital da placa	18
PPS	<i>Strobe</i>	Saída de sincronização do relógio	19
CAN2_RX	Bi-direcional	Barramento de transmissão CAN2	20

Assim como outros produtos do tipo OEM, esta família de receptores GPS é voltada para integradores de sistemas. Estes produtos necessitam que sejam adicionados circuitos de alimentação e interface, bem como um gabinete que forneça isolamento apropriado, para que funcionem como receptores GNSS. Esta característica é ideal este trabalho, já que permite a customização de um módulo integrado GPS/UMI. A placa NovAtel OEMV-1, utilizada neste projeto, contém um receptor GPS L1 de frequência simples e baixo consumo com banda-L integrada.

Tabela 3.3: *Strobes* do GPS NovAtel OEMV-1

<i>Strobes</i>	Comportamento	Característica	Descrição
Event 1 (Marcador 1)	Multiplexado	Entrada Borda Negativa Lógica Negativa	Marcador de entrada para o qual um pulso maior que 150 ns ativa a geração de alguns <i>logs</i>
Event 2 (Marcador 2)	Multiplexado	Entrada Borda Negativa Lógica Negativa	Marcador de entrada para o qual um pulso maior que 150 ns ativa a geração de alguns <i>logs</i>
PV (Posição Válida)	Dedicado	Saída Lógica Positiva	Indica disponibilidade de solução de posição GPS válida
VARF (Frequência Variável)	Multiplexado	Saída Lógica Negativa	Saída programável de frequência variável, na faixa 0-20MHz
RESETIN	Dedicado	Entrada Lógica Negativa	Aplicação de entrada LVTTTL de sistema externo com duração maior que $20\mu s$ reinicia sistema GPS
PPS	Dedicado	Entrada Lógica Negativa	Saída de sincronização de relógio, sinal pulsado cuja borda de subida é síncrona ao tempo GPS calculado pelo receptor

O receptor GPS NovAtel OEMV-1 contém uma série de sinais utilizados para sinalização de eventos, sincronização e comunicação, denominados strobes. A Tabela 3.3 descreve tais sinais.

3.2.2 MEMSense NanoIMU

O sensor MEMSense NanoIMU [68] é uma unidade de medição inercial triaxial analógica, fornecendo saídas digitais de aceleração, velocidade angular e campo magnético, compensadas em relação a temperatura e sensibilidade entre eixos (*cross-axis sensitivity*) e com alta rejeição a vibrações. As medidas são fornecidas de forma serial através do protocolo RS-422 ou via I²C. Atualmente esta UMI não permite a modificação de suas características em tempo de execução através de uma API, atuando apenas como transmissor serial de medidas inerciais.

A UMI utilizada neste projeto, a MEMSense NanoIMU NA02-0300F050R, transmite suas medidas via RS-422 e acompanha um módulo de aquisição de dados USB, que possibilita a utilização imediata do sensor para testes. A Figura 3.4 apresenta a UMI MEMSense NanoIMU



Figura 3.4: MEMSense NanoIMU NA02-0300F050R.

Tabela 3.4: Características da MEMSense NanoIMU NA02-0300F050R

Característica	Descrição	Detalhes
Dimensões	Largura/Comprimento/Altura	47mm x 23mm x 14mm
Protocolo de Comunicação	RS-422 ou I ² C	RS-422
Taxa de aquisição de dados	Pacotes de Dados	50Hz
Acelerômetro	Faixa Dinâmica	±2 g
Girômetro	Faixa Dinâmica	±300 °/s
Magnetômetro	Faixa Dinâmica	±1.9 G

NA02-0300F050R, e a Tabela 3.4 indica suas principais características.

A utilização da UMI apresentada demanda conhecimento do protocolo de dados utilizado, em que é descrito o conteúdo o formato do pacote de dados enviado pelo sensor, conforme apresentado na Figura 3.5 e na Tabela 3.5. Após o recebimento destes pacotes de dados, é necessário realizar a conversão dos valores brutos recebidos para valores na faixa dinâmica do sensores, através da multiplicação pela sensibilidade dinâmica correspondente, conforme a equação 3.1.

$$\text{Medida} = \text{Valor Bruto} \times \text{Faixa Dinâmica} \times (4.57764 \times 10^{-5}) \quad (3.1)$$

3.2.3 Circuito de Alimentação

O circuito de alimentação do módulo sensorial deve fornecer diferentes níveis de tensão para os sensores e componentes auxiliares. O receptor GPS NovAtel OEMV-1, por exemplo, requer uma fonte de alimentação precisamente regulada em +3,3 VDC +5%/-3%, capaz de prover até 5W de potência, e alimentação não regulada entre +5.5 e +16 VDC especificamente para sua antena ativa. Apesar deste contar com proteção contra inversão de polaridade na alimentação e eventos de sobretensão de curta duração, é recomendado pelo fabricante que sejam usados fusíveis em todas linhas de alimentação como precaução. A UMI MEMSense NanoIMU, por sua vez, requer uma fonte de alimentação não regulada entre +5.4 e +9 VDC. Ambos sensores contém reguladores de tensão internos para lidar com as tensões de alimentação não reguladas exigidas.

Inicialmente foi estipulado que a alimentação do módulo seria feita por meio de uma bateria chumbo-ácida regulada por válvula com tensão nominal de 12V, devido à sua disponibilidade no mercado em vários tamanhos e capacidades de fornecimento de carga, de modo que estes

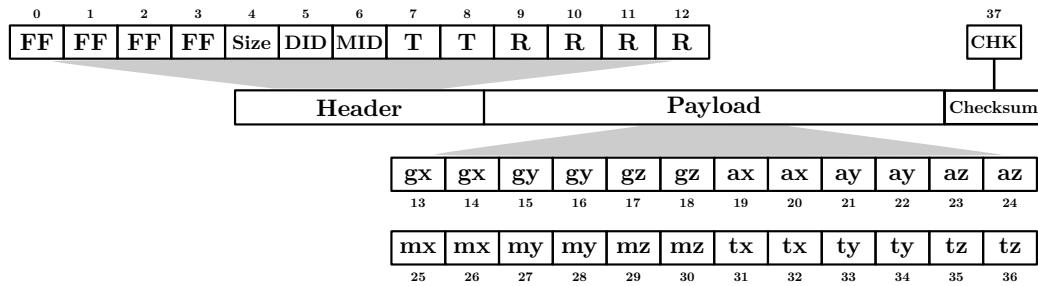


Figura 3.5: Pacote de dados da MEMSense NanoIMU

Tabela 3.5: Conteúdo do pacote de dados da MEMSense NanoIMU

Byte	Conteúdo	Byte	Conteúdo
0	Byte de Sincronização (FF)	21	Acelerômetro Y (MSB)
1	Byte de Sincronização (FF)	22	Acelerômetro Y (LSB)
2	Byte de Sincronização (FF)	23	Acelerômetro Z (MSB)
3	Byte de Sincronização (FF)	24	Acelerômetro Z (LSB)
4	Tamanho da mensagem	25	Magnetômetro X (MSB)
5	ID do Dispositivo	26	Magnetômetro X (LSB)
6	ID da Mensagem	27	Magnetômetro Y (MSB)
7	Timestamp da Amostra (MSB)	28	Magnetômetro Y (LSB)
8	Timestamp da Amostra (LSB)	29	Magnetômetro Z (MSB)
9-12	Reservado	30	Magnetômetro Z (LSB)
13	Girômetro X (MSB)	31	Temperatura Girômetro X (MSB)
14	Girômetro X (LSB)	32	Temperatura Girômetro X (LSB)
15	Girômetro Y (MSB)	33	Temperatura Girômetro Y (MSB)
16	Girômetro Y (LSB)	34	Temperatura Girômetro Y (LSB)
17	Girômetro Z (MSB)	35	Temperatura Girômetro Z (MSB)
18	Girômetro Z (LSB)	36	Temperatura Girômetro Z (LSB)
19	Acelerômetro X (MSB)	37	Checksum
20	Acelerômetro X (LSB)		

parâmetros poderiam ser ajustados ao final do projeto do circuito. Além disso, alguns dos robôs utilizados no laboratório já são dotados de baterias desta modalidade, o que torna possível a ligação do módulo sensorial diretamente na alimentação do robô.

Como todas as tensões requeridas no projeto são inferiores à escolhida para a bateria, é possível utilizar reguladores lineares para prover as tensões de alimentação requeridas. Apesar de serem ineficientes e dissiparem calor excessivo quando a diferença entre a queda de tensão no regulador e a corrente consumida são altas, reguladores lineares ainda são vantajosos em relação aos conversores DC/DC chaveados em termos de custo e simplicidade, fornecendo uma alimentação constante e com *ripple* reduzido independente de flutuações na alimentação da bateria. Para isso, necessitam apenas de dois capacitores de desacoplamento, cujos valores são sugeridos nos

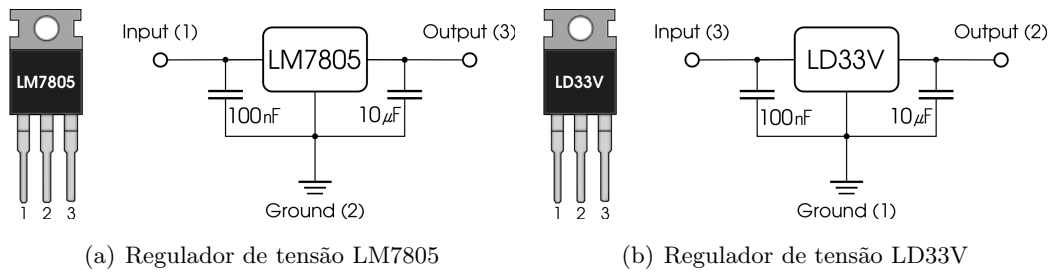


Figura 3.6: Reguladores de tensão lineares

Tabela 3.6: Características dos reguladores de tensão LM7805 e LD33V

Características	LM7805	LD33V
Máxima Tensão de Entrada (V_{in})	35 V	15 V
Máxima Tensão de <i>Dropout</i> (V_d)	2 V	1.2 V
Máxima Corrente de Saída (I_{out})	1 A	800 mA
Faixa de Tensão de Saída (V_{out})	4.75-5.25V	3.235-3.365V

respectivos *datasheets* mas podem ser mais elevados. Desde que se respeite os valores mínimos para estabilidade do regulador de tensão, que é muitas vezes um circuito realimentado, sua tensão de saída será mantida dentro de um intervalo em torno do valor nominal de tensão.

Nesta categoria, os reguladores da família 78xx [69] se apresentam como a alternativa mais comum, fornecendo tensões de alimentação com variação do valor nominal na ordem de $\pm 5\%$, correntes de saída de até 1A e tensão de *dropout* de 2V. Quando é necessária uma regulação mais precisa da tensão de alimentação, uma boa alternativa são os reguladores de tensão com baixa tensão de *dropout* da classe LD1117 [70], que podem fornecer tensões com variação no valor nominal na ordem de $\pm 2\%$, correntes de saída de até 800mA e tensão de *dropout* de 1V. Ambas famílias de reguladores de tensão citadas contém proteção contra sobrecarga térmica e curto-circuito.

Dadas as características dos sensores escolhidos neste projeto, foram escolhidos os reguladores lineares LM7805 e LD33V (LD1117V33) da STMicroelectronics. A Tabela 3.6 e a Figura 3.6 resumem algumas das informações presentes nos *datasheets* destes componentes. Determinou-se então o circuito de alimentação apropriado para o módulo sensorial GPS/UMI, conforme visto na Figura 3.7. Além dos componentes já mencionados, adicionou-se ao circuito uma chave liga-desliga, um conector para alimentação CC pela bateria, e um LED para indicar que o circuito está ligado. Para saber mais sobre reguladores de tensão lineares e chaveados, a nota técnica *Linear and Switching Voltage Regulator Fundamentals* [71] da National Semiconductors apresenta detalhes sobre parâmetros de interesse para projeto, assim como sobre seus circuitos internos.

3.2.4 Circuito de Comunicação

O circuito de comunicação do módulo sensorial deve converter diferentes padrões de comunicação serial presentes nos sensores para o padrão RS-232, utilizado amplamente nas portas seriais

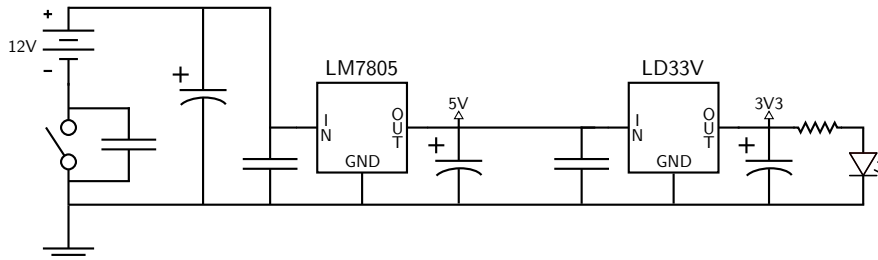


Figura 3.7: Esquemático da seção de alimentação do módulo sensorial GPS/UMI

de computadores ainda hoje. Para tanto, os circuitos integrados transceptores da Maxim são bastante utilizados. Neste projeto foram utilizados os CIs MAX485 (RS-422/TTL) [72] e MAX232 (TTL/RS-232) [73] para fazer a conversão do padrão RS-422 utilizado na UMI MEMSense NanoIMU e o CI MAX3232 (LVTTL/RS-232) [74] para interface com o receptor GPS NovAtel OEMV-1. No caso do receptor GPS, existem pinos para diversas formas de comunicação, inclusive CAN e USB, que foram expostos no projeto da placa de interfaceamento para possibilitar posterior utilização.

A Tabela 3.7 e a Figura 3.8 resumem algumas das informações presentes nos datasheets destes componentes. Observando suas especificações de alimentação nota-se que não é necessário adicionar componentes ao circuito de alimentação, mesmo que o padrão RS-232 seja baseado em níveis lógicos com valores na faixa de $\pm 15V$. Isto é devido à presença de capacitores que atuam como *charge pumps* ou bombas de carga, sendo carregados para então descarregarem baixas correntes a altas tensões. Estes capacitores têm valores especificados para cada transceptor RS-232 em seus *datasheets*, que devem ser seguidos para correto funcionamento do circuito.

Nota-se que enquanto o MAX232 simples requer capacitores com valores mais elevados (por volta de $1\mu F$, usualmente polarizados) e funciona apenas para a lógica TTL, o MAX3232 tem a mesma funcionalidade com capacitores de capacitância menor (por volta de $100nF$, usualmente cerâmicos) e funciona tanto para a lógica TTL quanto para LVTTL, baseada em tensões de 3,3V. Neste sentido, seria possível utilizar apenas CIs MAX3232 para conversão das lógicas TTL/LVTTL do circuito, mas isso encareceria o projeto uma vez que o MAX232 é muito mais amplamente utilizado e portanto mais barato e disponível no mercado.

Outro componente importante é o resistor de terminação de 120Ω no circuito do transceptor RS-485, que ao ser adicionado próximo à entrada do CI MAX485 impede que haja efeitos de reflexão nas linhas de transmissão diferencial A/B durante o chaveamento de níveis lógicos, conforme sugerido pelo *datasheet* da UMI MEMSense NanoIMU. Vale ressaltar que a utilização do MAX485, voltado para aplicações *half duplex*, se deve ao fato da comunicação com a NanoIMU se dar apenas no sentido de recepção de dados, de acordo com o fabricante.

Um fator crítico no circuito de comunicação é a conexão apropriada dos terminais de transmissão e recepção, tanto nas ligações realizadas internamente (entre os sensores e os circuitos integrados) quanto nas ligações nos conectores DB-9 usualmente utilizados em cabos seriais. Para troca de informações os pinos TX de cada emissor devem se conectar aos pinos RX de cada receptor, sendo que o padrão adotado ligação no DB-9 depende do tipo de cabo serial utilizado.

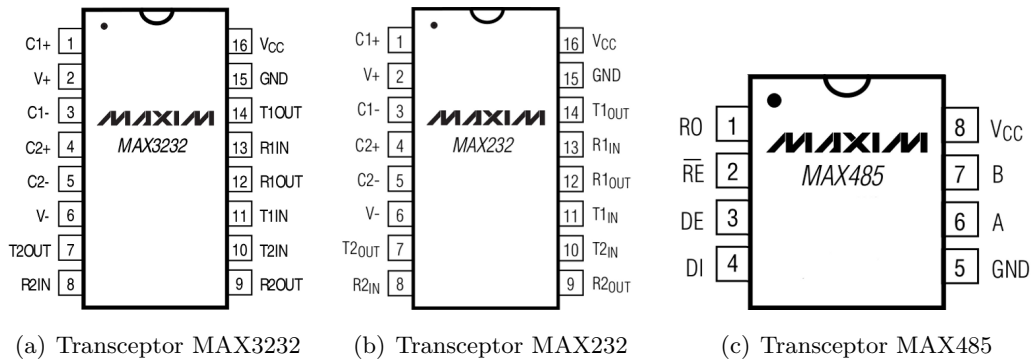


Figura 3.8: Transceptores RS-232 e RS-485

Tabela 3.7: Características dos transceptores MAX3232, MAX232 e MAX485

Características	MAX3232	MAX232	MAX485
Padrões de Comunicação	RS-232/TTL/LVTTL	RS-232/TTL	RS-485/TTL
Componentes Externos	5 Capacitores 100nF	5 Capacitores 1 μ F	1 Resistor 120
Máxima Taxa de Transmissão	120 kbps	120 kbps	2,5 Mbps
Modo de Comunicação	Full duplex	Full duplex	Half duplex

Para cabos do tipo *null modem*, em que os pinos TX/RX têm suas conexões cruzadas e os demais pinos são ligados com seus correspondentes, as ligações são feitas conforme o padrão da Figura 3.9. Já quando deseja-se utilizar um cabo serial direto, assumindo que na outra ponta do cabo há uma porta serial ligada de acordo com o padrão, basta trocar as conexões dos pinos TX/RX no conector do módulo. Apesar de ser um detalhe pequeno do projeto, pode fazer um projetista inexperiente perder bastante tempo imaginando que há algum problema de *hardware*. Um teste simples consiste em ligar os pinos TX/RX em curto-circuito e verificar se aparecem dados coerentes em um terminal serial, conforme detalhado no Anexo V.

O circuito de comunicação para o módulo sensorial GPS/UMI é apresentado Figura 3.10. Para saber mais sobre os diferentes padrões de comunicação serial discutidos nesta seção, as notas técnicas *Introdução ao padrão físico RS-485 para comunicação serial* [75] (A.S. Martins e G.A. Borges) e *Choosing the Right RS-232 Transceiver* [76] da Maxim são boas referências.

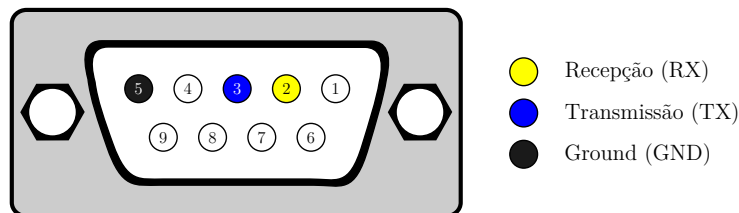


Figura 3.9: Conector DB-9 fêmea (face da conexão)

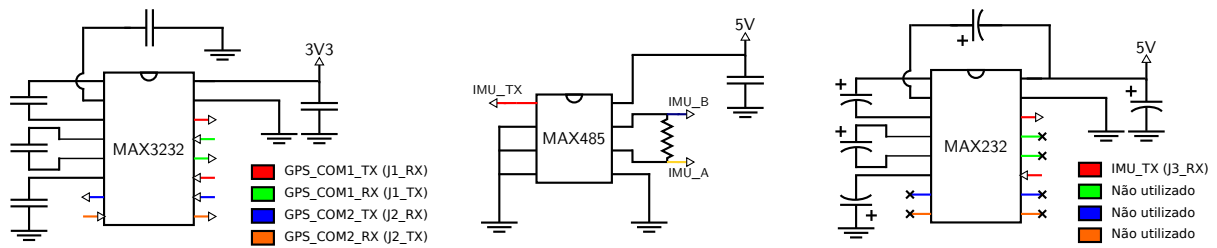


Figura 3.10: Esquemático da seção de comunicação do módulo sensorial GPS/UMI

3.2.5 Placa de Interfaceamento

A placa de interfaceamento do módulo sensorial GPS/UMI têm como objetivo ser a realização física dos circuitos de alimentação e comunicação, bem como possibilitar a fixação apropriada dos sensores, a conexão de componentes externos, e facilitar a realização de testes do *hardware*. Para tanto, foi feito o projeto de uma placa de circuito impresso no *software* para desenho e projeto eletrônico assistido por computador *Altium Designer Winter 10*[®]. Durante o desenvolvimento deste trabalho houve duas revisões do projeto, conforme visto na Figura 3.11, importantes para correção de falhas no projeto e incorporação de melhorias propostas. Nesta seção é descrita apenas a revisão mais recente, com breve comentário ao final sobre os erros cometidos em outras revisões. Os arquivos do projeto presentes no CD estão listados no Anexo II.

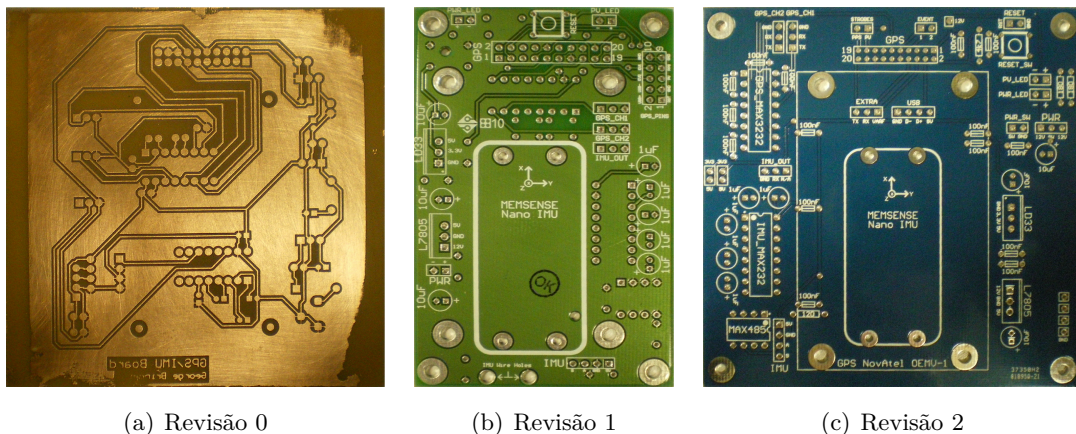


Figura 3.11: Revisões da Placa de Interfaceamento do Módulo GPS/UMI

O primeiro passo na utilização de um *software* EDA como o *Altium Designer* é a definição de um diagrama esquemático, que é a representação abstrata do circuito com seus componentes e conexões. Neste nível foram integrados os circuitos de alimentação e comunicação, e adicionados conexões para interface externa tais como botões liga/desliga e de reset, conectores DB-9 para porta serial, conector para alimentação do circuito e sinalizadores LED de alimentação da placa e *status* do GPS. Também foram incluídos capacitores de filtragem que devem ser distribuídos na placa para evitar que ruído adicionado pelas trilhas afetem a alimentação dos componentes. O esquemático da placa de interfaceamento é apresentado no Anexo I.

Antes de passar para o próximo passo, é preciso verificar se todos componentes presentes no esquemático estão associados aos *footprints* (desenho do componente na placa) adequados. É comum ter que fazer o desenho de componentes incomuns para inclusão na placa de circuito

Tabela 3.8: Lista de componentes da placa de interfaceamento do módulo GPS/UMI

Componente	Tipo	Quantidade
GPS NovAtel OEMV-1	Sensor	1
UMI MEMSense NanoIMU	Sensor	1
LM7805	Regulador de Tensão	1
LD33V	Regulador de Tensão	1
MAX232	Transceptor	1
MAX3232	Transceptor	1
MAX485	Transceptor	1
Capacitor 100nF	Capacitor Cerâmico	13
Capacitor $1\mu F$	Capacitor Eletrolítico	5
Capacitor $10\mu F$	Capacitor Eletrolítico	3
Resistor 120	Resistor	1
Resistor 180	Resistor	2
Resistor 4,7 k	Resistor	1
LED Vermelho	LED	1
LED Amarelo	LED	1
Header 2mm	Barra de Pinos	1 x 40
Header 2,54mm	Barra de Pinos	1 x 40
Soquete DIP16	Soquete Torneado	2
Soquete DIP8	Soquete Torneado	1
Botão Liga/Desliga	Chave Gangorra	1
Botão Reset	<i>Push Button</i>	1
Conector Alimentação DC	Conector	1
Conector DB-9	Conector	1

impresso, ou ainda buscar bibliotecas de *footprints* de fabricantes específicos.

A etapa seguinte no projeto é o desenho da placa, que consiste na definição de sua geometria, no posicionamento dos componentes e furos de fixação, e roteamento das trilhas de conexão entre componentes. É comum haver ferramentas nos *softwares* EDA que fazem o roteamento e posicionamento automático de componentes na placa baseado em um conjunto de regras definido pelo projetista. Tais ferramentas possibilitam a solução deste problema em placas com alta densidade de componentes, em que a definição manual destes parâmetros seria inviável. Para pequenos circuitos, porém, a definição manual é preferível para se evitar roteamentos equivocados de trilhas essenciais e gerenciar aspectos não previstos nas regras disponíveis para o projetista.

Neste projeto utilizou-se este tipo de ferramenta apenas para fornecer uma solução inicial para o roteamento, que foi ajustado de modo a evitar a proximidade de trilhas com sinais em alta frequência a componentes sensíveis tais como a UMI (que é aparafusada à placa), diminuir o uso de vias e ângulos agudos nas trilhas, e aumentar a largura de trilhas de alimentação. Adicionou-se também pontos de teste para aferição das tensões de alimentação, o que é importante para verificar que não há perdas significativas ou curtos ao longo da placa. A Tabela 3.8 lista todos

componentes presentes na placa de interfaceamento do módulo GPS/UMI, incluindo conectores externos. O desenho da placa de interfaceamento é apresentado no Anexo I.

3.2.6 Projeto Mecânico

O projeto mecânico do módulo sensorial GPS/UMI envolve o planejamento do gabinete que contém a placa de interface, em particular dos furos de fixação e posicionamento dos conectores externos, e da estrutura de fixação da antena do GPS. Nesta etapa é importante observar o espaço que os conectores externos ocupam, e refletir sobre o processo de fabricação do gabinete para que este seja viável. Em particular, considerações quanto às ferramentas disponíveis e a fixação do gabinete para execução dos furos necessários são pertinentes.

A Figura 3.12 mostra o projeto completo do módulo sensorial GPS/UMI realizado no *software SolidWorks Professional 2010*[®] (exceto a estrutura de fixação da antena). Os desenhos mecânicos das partes individuais, inclusive da estrutura de fixação da antena, são apresentados no Anexo I. Os arquivos do projeto presentes no CD estão listados no Anexo II. Uma descrição detalhada do processo de montagem do módulo é apresentada no Anexo V.



Figura 3.12: Projeto do módulo sensorial GPS/UMI no SolidWorks

3.3 Descrição do Software

O *software* desenvolvido para este trabalho de graduação teve como objetivo realizar a coleta de dados do módulo sensorial GPS/UMI. Estes dados deveriam ser gravados para posterior análise, em uma primeira etapa de avaliação e ajuste *offline* dos algoritmos propostos. Esta etapa é importante para verificar como se comportam os dados dos sensores escolhidos, definir se é suficiente utilizar métodos de calibração estática ou se é necessário fazer a estimação *online* dos parâmetros de calibração (polarização e fator de escala), e sintonia do modelo utilizado no sistema de localização.

Com este fim, codificou-se um programa para decodificar as mensagens recebidas através das portas seriais disponíveis no módulo, de acordo com os protocolos estabelecidos pelos fabricantes

dos sensores. Foram utilizadas duas bibliotecas de programação em C desenvolvidas no Laboratório de Automação e Robótica (LARA): `gSerialLib`, para interface com portas seriais, e `gDataLogger` para gravação de *log* de dados. Além destas, a biblioteca C `pthread` foi usada para programação concorrente [77] na primeira versão do *software*, e `POSIX Timers` para a implementação de rotinas periódicas na segunda versão do *software*. Decidiu-se utilizar a programação concorrente para que fosse possível desacoplar as etapas de aquisição, decodificação e uso dos dados, de modo a tornar mais eficiente a utilização dos recursos computacionais disponíveis, e facilitar a migração para um sistema em tempo-real caso fosse necessário.

Em sua primeira versão, o *software* consistia de duas *threads* por sensor. A primeira *thread* gerencia o recebimento de dados do sensor, verificando a presença de bytes no buffer de saída da porta serial associada e armazenando-os em uma estrutura tipo FIFO que é compartilhada com a *thread* secundária. Esta é responsável pela decodificação das mensagens recebidas, através de uma máquina de estados projetada de acordo com os protocolos de cada sensor, e posterior *log* ou repasse dos dados para a *thread* principal do sistema, que pode então utilizar os dados decodificados para execução dos filtros escolhidos para localização.

Quando se trabalha com programação concorrente é preciso ter cautela quanto ao compartilhamento de recursos entre *threads*, uma vez que este paradigma pressupõe que diferentes fluxos de programa se alternam ou são executados em paralelo sem pontos de sincronização a priori. A utilização de recursos como *mutexes* e semáforos é primordial para que não haja problemas com escrita e leitura simultânea de dados compartilhados, por exemplo, apesar de requererem cuidado para evitar-se problemas de intertravamento de *threads* (*deadlock* e *livelock*).

Na segunda versão do *software* decidiu-se utilizar uma abordagem mais adequada para controle digital, baseada na execução de uma rotina periódica com período fixo. Nesta versão, a cada dez iterações da rotina periódica coleta-se dados do GPS uma vez e dados da UMI nas iterações restantes. Isto é feito uma vez que dados do GPS estão disponíveis com menor frequência que dados da UMI, e devido ao seu maior tamanho de pacote.

3.4 Descrição do Sistema de Localização

Para a avaliação dos dados do módulo sensorial GPS/UMI, foi escolhido utilizar a implementação do filtro CEKF realizada no *MATLAB*[®] no contexto de trabalhos anteriores do LARA [9]. Sua utilização é imediata, desde que o *log* de dados obtido esteja de acordo com o formato escolhido. Para isso, foi desenvolvido um script de *MATLAB* para conformação dos *logs* obtidos com o *software* de coleta de dados, denominado `demo_fmt_antonio.m`. Outras facilidades para a realização de experimentos foram desenvolvidas, como a escrita de *shell scripts* para recuperação remota dos dados armazenados no robô (`get_data`) e atualização de código de coleta de dados (`update`). Todo o código, incluindo aquele correspondente ao sistema de localização em *MATLAB*, está disponível no CD conforme descrito no Anexo II.

Capítulo 4

Resultados Experimentais

*If your result needs a statistician then you
should design a better experiment
Ernest Rutherford*

4.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo descrever alguns experimentos que foram realizados para verificação do funcionamento do módulo sensorial GPS/UMI, e fazer uma análise dos resultados obtidos tendo em vista o objetivo final, que é o desenvolvimento de um sistema de localização por GPS/UMI para robôs móveis em ambientes externos. Embora não tenha sido possível coletar dados de ambos sensores simultaneamente até a redação deste relatório, os resultados obtidos mostram que os dados coletados foram consistentes com os experimentos propostos. Foi possível observar também a qualidade dos dados fornecidos pelos sensores, de modo que é possível fazer uma análise preliminar da viabilidade de seu uso em um sistema de localização.

A Seção 4.2 apresenta os dados obtidos em dois experimentos realizados com o receptor GPS, sendo que um destes foi feito com o módulo sensorial parado e o outro em movimento a bordo de um veículo automotor. A Seção 4.3 apresenta os dados obtidos em três experimentos realizados com a unidade de medição inercial, sendo que o primeiro foi feito com o módulo embarcado em um veículo automotor, o segundo foi feito com o módulo sensorial parado e o último apresenta rotações controladas nos três eixos da UMI. A Seção 4.4 lista algumas das dificuldades encontradas e, sempre que possível, sugestões para que seus efeitos sejam atenuados ou mitigados.

4.2 Coletas de dados do GPS

Esta seção contém os resultados de dois experimentos realizados com o receptor GPS. No primeiro experimento, realizado no dia 6 de dezembro de 2011, procurou-se observar a variabilidade das medições quando o GPS está parado e apresenta solução válida, e a influência do ambiente ao seu redor nesta variabilidade. No segundo experimento, realizado no dia 13 de dezembro de 2011, foi realizado um percurso de carro no campus da Universidade de Brasília, para observar-se

a capacidade do receptor GPS de rastrear e recuperar sua posição após perda momentânea de visibilidade dos satélites. Para ambos experimentos, são apresentados gráficos dos dados obtidos e a trajetória das estimativas de posição fornecidas pelo GPS plotada no *Google Earth*TM.

4.2.1 Dec-06-2011(22h00): GPS com módulo sensorial parado

No primeiro experimento, o módulo sensorial manteve-se parado em um banco entre o prédio de laboratórios da Engenharia Elétrica (SG-11) e o prédio de laboratórios da Engenharia Civil (SG-12) da Universidade de Brasília, em um local com boa visibilidade do céu. O objetivo deste experimento era avaliar o desempenho do receptor GPS na situação em que sabe-se que este encontra-se parado, para verificar como as medições se distribuem e analisar possíveis influências do ambiente ao redor. As Figuras 4.1 e 4.3 apresentam os dados de posição e velocidade no sistema ECEF, enquanto as Figuras 4.2 e 4.4 apresentam o desvio padrão destas medições¹.

Apesar de interessantes de se observar, os gráficos com as medições no Sistema E não são muito úteis por serem de difícil correspondência com a realidade. A Figura 4.35 foi gerada então no software *Google Earth* para auxiliar na observação das características desejadas, de modo que as medidas de posição do GPS estão representadas pela linha em verde. O apontador vermelho representa a posição aproximada em que se encontrava o módulo sensorial durante a realização do experimento. As retas amarelas foram traçadas no próprio programa e representam o eixo de menor e maior variação das medições, ambos determinados manualmente. De acordo com as medições do *software*, as faixas de variação correspondentes a estes eixos têm comprimento de 2.38m e 10.7m, respectivamente. Este grande nível de erro no eixo de maior variação pode ser explicado pela presença de uma parede paralela e algumas árvores, que aumentam a magnitude do erro devido à propagação do sinal GPS por múltiplos caminhos.

4.2.2 Dec-13-2011(17h48): Volta de carro no campus

No segundo experimento, o módulo sensorial foi embarcado em um veículo para a realização de um circuito no campus universitário. O objetivo deste experimento era avaliar a ocorrência de perdas de sinal e a capacidade do receptor de recuperar sua estimativa de posição em seguida e manter o rastreamento da trajetória assumida. Vale ressaltar que durante o experimento o dia estava nublado, com períodos de chuva antes e depois de sua realização. As Figuras 4.5 e 4.7 apresentam os dados de posição e velocidade no sistema ECEF, enquanto as Figuras 4.6 e 4.8 apresentam o desvio padrão destas medições conforme informado pelo receptor GPS.

Pelos mesmos motivos da seção anterior, foram plotadas as medidas de posição fornecidas pelo receptor GPS no *Google Earth*, conforme visto na Figura 4.36. As medições de posição fornecidas pelo receptor GPS são representadas no mapa em verde, enquanto a linha vermelha representa a trajetória aproximada assumida pelo veículo durante o experimento, definida manualmente na interface do programa. Apesar do clima, nota-se que as medições de posição do GPS mantiveram-se consistentes durante a quase totalidade do experimento. A exceção é o trecho final, em que houve

¹Em alguns casos o desvio padrão retornado pelo receptor era menor que 10^{-100} , o que impossibilitava a obtenção de gráficos no MATLAB. Isto foi corrigido pelo script `crct.m`, disponível no CD.

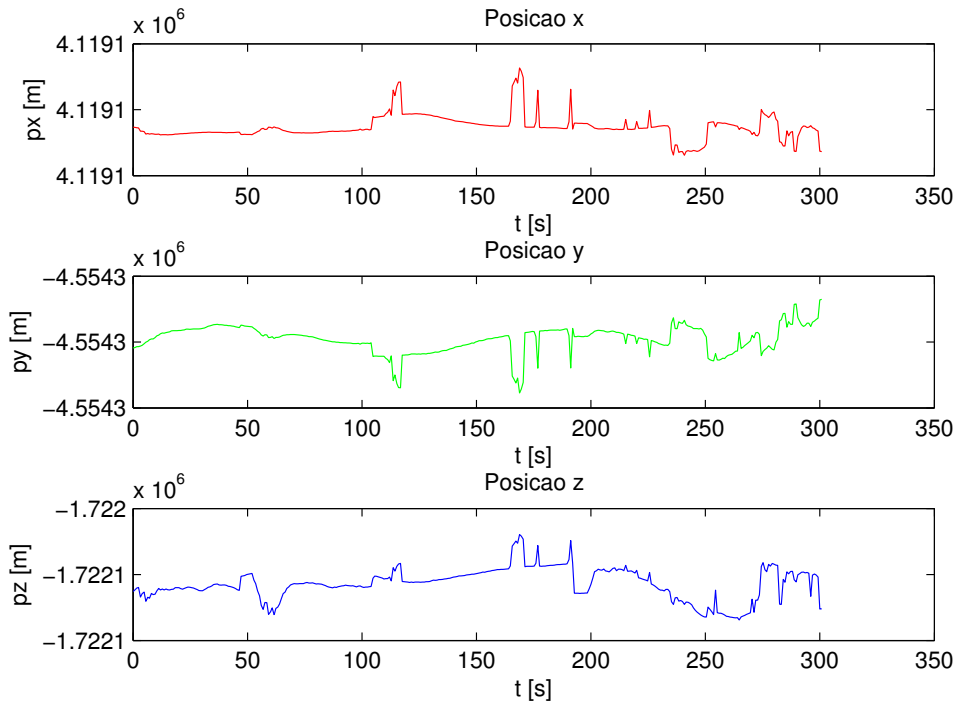


Figura 4.1: Dec-06-2011(22h00): Dados de posição (ECEF)

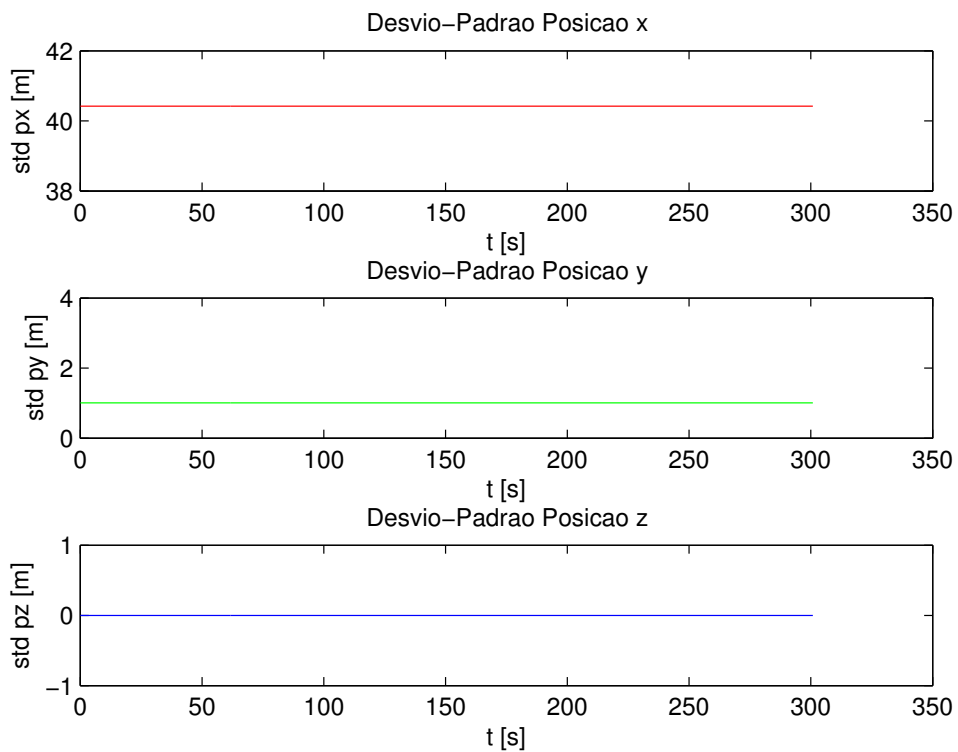


Figura 4.2: Dec-06-2011(22h00): Desvio padrão da posição (ECEF)

perda de visibilidade do céu devido a nuvens. Infelizmente não foi possível avaliar a capacidade de recuperação da estimativa de posição pelo GPS, pois pouco depois da perda de visibilidade iniciou-se uma chuva forte que impossibilitou a continuação do experimento.

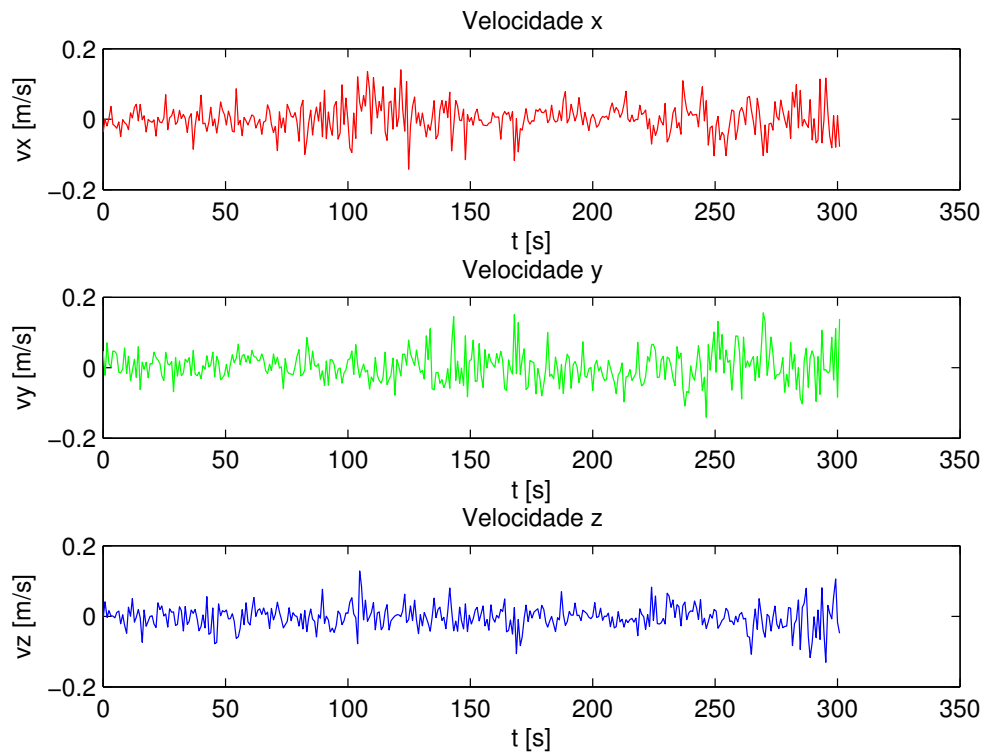


Figura 4.3: Dec-06-2011(22h00): Dados de velocidade (ECEF)

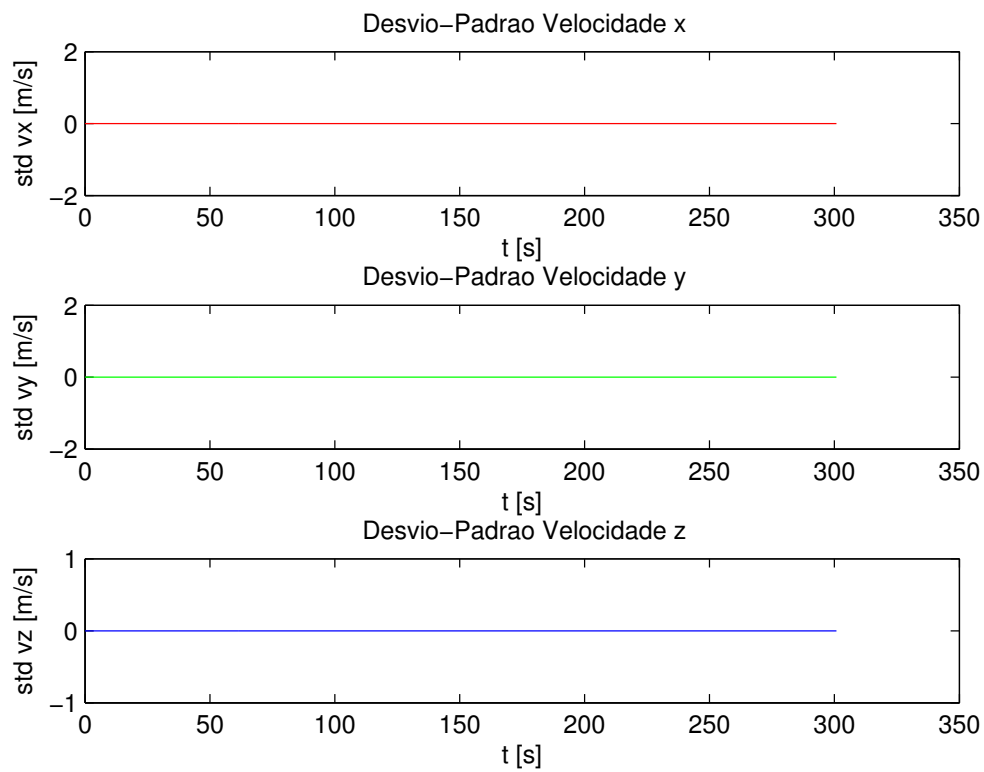


Figura 4.4: Dec-06-2011(22h00): Desvio padrão da velocidade (ECEF)

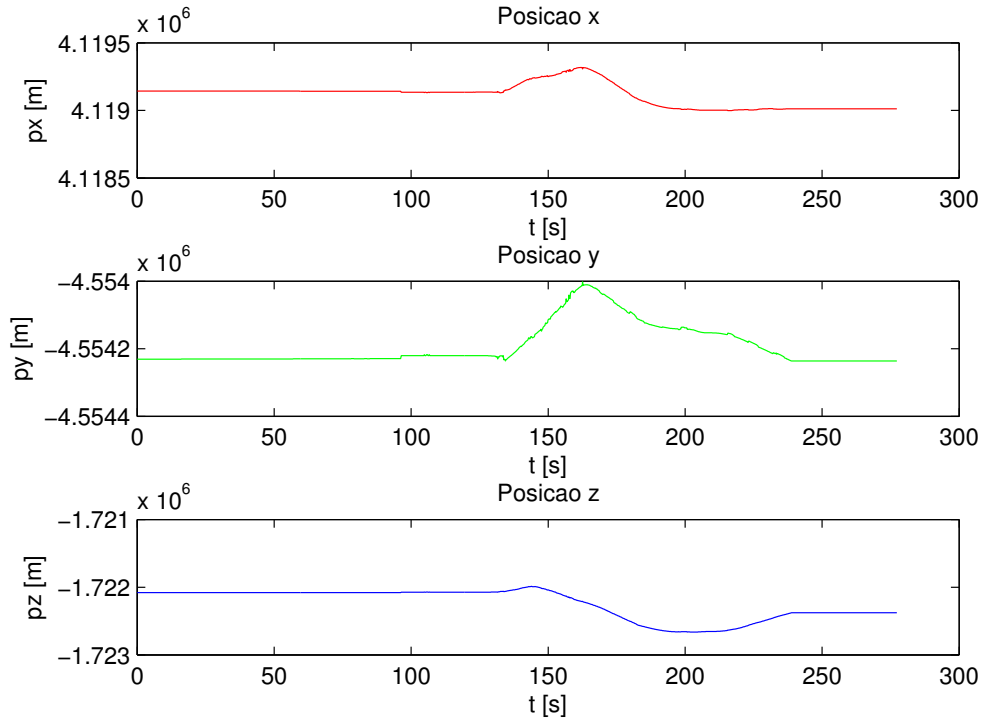


Figura 4.5: Dec-13-2011(17h48): Dados de posição (ECEF)

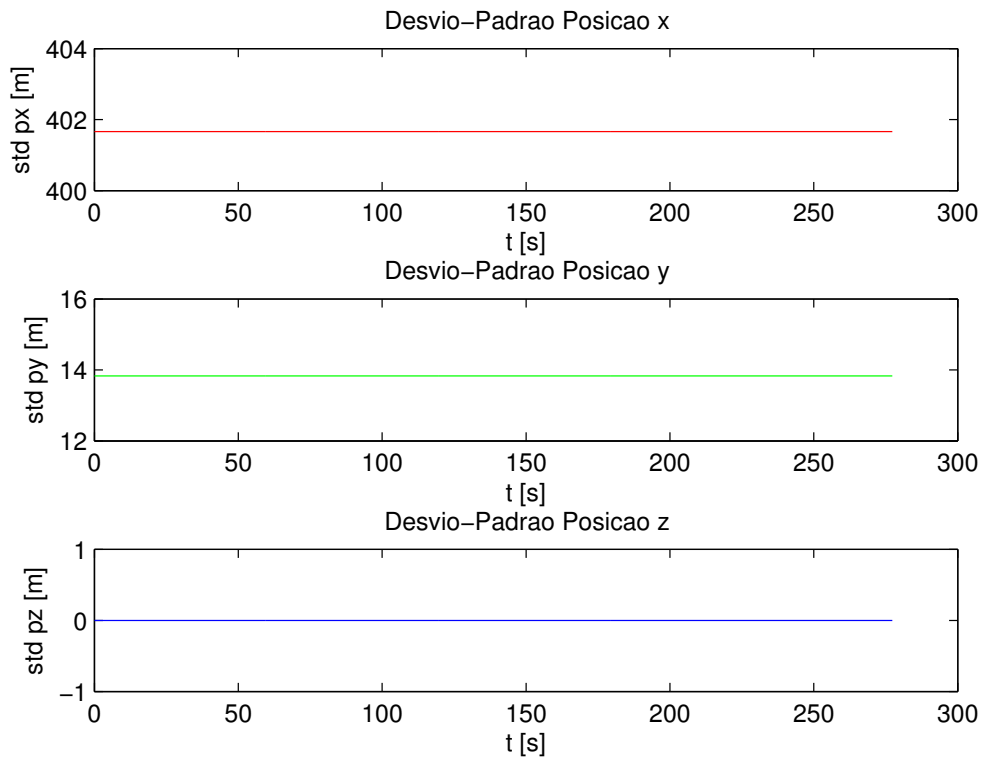


Figura 4.6: Dec-13-2011(17h48): Desvio padrão da posição (ECEF)

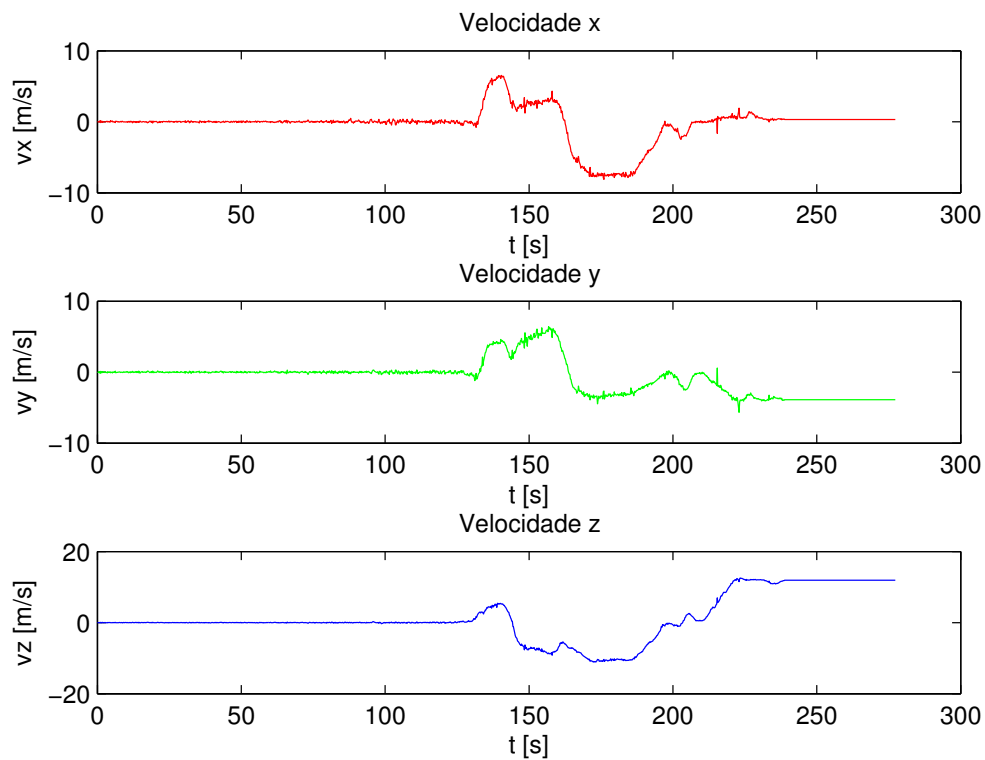


Figura 4.7: Dec-13-2011(17h48): Dados de velocidade (ECEF)

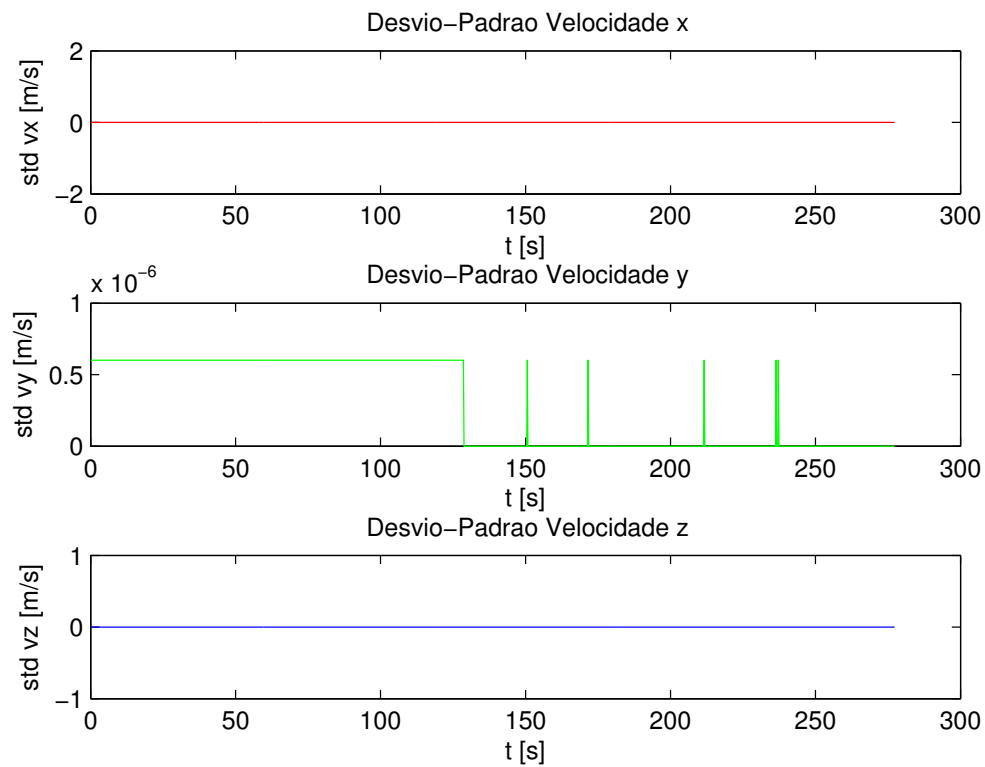


Figura 4.8: Dec-13-2011(17h48): Desvio padrão da velocidade (ECEF)

4.3 Coletas de dados da UMI

Esta seção contém os resultados de três experimentos realizados com a unidade de medição inercial. No primeiro experimento, realizado no dia 13 de dezembro de 2011, procurou-se observar o desempenho da UMI enquanto embarcada em um veículo em movimento, percorrendo um trajeto facilmente reconhecível em seus dados – uma sequência de zigue-zagues seguida de uma volta completa em um estacionamento próximo ao prédio de laboratórios da Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (SG-11). O segundo experimento, realizado no dia 15 de dezembro de 2011, foi proposto com o objetivo de fazer a caracterização estática da UMI, buscando observar se há presença de polarizações ou fatores de escala inesperados, bem como o grau de variabilidade das medições. No terceiro experimento, realizado no dia 15 de dezembro de 2011, buscou-se observar a qualidade dos girômetros da UMI para predição de atitude por meio da integração de suas medidas, através da execução de rotações controladas em torno dos três eixos da UMI. Para todos experimentos, são apresentados gráficos dos dados obtidos e gráficos auxiliares para análise.

4.3.1 Dec-13-2011(18h26): Zigue-zague de carro no estacionamento

No primeiro experimento o módulo sensorial foi embarcado em um veículo em movimento, que assumiu a trajetória ilustrada na Figura 4.37 em velocidade relativamente baixa (cerca de 10 km/h). Decidiu-se realizar o trajeto em velocidade baixa para tornar o experimento compatível com a realidade dos robôs móveis disponíveis no LARA. Os dados obtidos no experimento são apresentados nas Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12. Nestes gráficos, é possível observar uma quantidade apreciável de ruído nos dados coletados, além de alguma polarização, o que torna clara a necessidade de se realizar um procedimento de calibração e filtragem dos dados. Apesar de filtros estocásticos lidarem bem com dados ruidosos, pode ser interessante realizar uma pré-filtragem para retirar-se componentes de alta frequência que surgem devido a vibração. Um fator que pode resultar neste ruído de alta frequência é o ruído na medição da temperatura nos girômetros, já que esta é utilizada pelo *firmware* de UMI para compensação dos efeitos da temperatura nas medições.

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam o resultado obtido após a aplicação de um filtro de mediana com janela de tamanho 5. A Figura 4.16 apresenta o resultado da compensação da polarização do girômetro nos dados filtrados, estimada tomando-se a mediana de todos dados amostrais. Esta estimativa justifica-se neste caso uma vez que a trajetória é formada principalmente de trechos em que o veículo se locomove em linha reta, de modo que as medições do girômetro tendem a se concentrar nas medidas de repouso. A mediana é utilizada por ser considerada uma estimativa robusta da média de um conjunto de dados.

Comparando-se os dados obtidos neste experimento com a trajetória planejada, é possível notar que ambos são compatíveis. As medições dos girômetros nos eixos X e Y permanecem praticamente constantes, enquanto a maior parte da variação angular é observada no eixo Z, o que é consistente com o movimento de um veículo. Além disso, as variações angulares medidas no eixo Z têm o mesmo sentido das curvas executadas pelo veículo. Embora de forma menos clara, as medições do magnetômetro também contribuem para a verificação da consistência dos dados, por apresentarem o mesmo padrão oscilatório da trajetória de forma significativa apenas nos eixos

X e Y, de acordo com o esperado. A integração dos dados dos girômetros, apresentada na Figura 4.17, reforça os pontos ressaltados nessa discussão.

4.3.2 Dec-15-2011(02h52): UMI com módulo sensorial parado

No segundo experimento, fez-se a coleta dos dados da UMI com o módulo sensorial parado sobre uma mesa dentro do LARA. O objetivo deste experimento era verificar as características estáticas do sensor em ambiente com temperatura razoavelmente controlada, sem que a UMI estivesse sujeita às vibrações observadas quando fixada a um corpo que se locomove em terreno acidentado. Os resultados deste experimento são apresentados nas Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21. Verifica-se novamente a presença de ruído de alta frequência nos dados da UMI e uma pequena polarização nas medidas do girômetro².

Como no experimento anterior, decidiu-se verificar o resultado após procedimentos simples de filtragem e compensação da polarização. As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 apresentam o resultado obtido após a aplicação de um filtro de mediana com janela de tamanho 5. A Figura 4.25 apresenta o resultado da compensação da polarização do girômetro nos dados filtrados, estimada tomando-se a mediana de todos dados amostrais. Os dados apresentados mostram que estes procedimentos não são ideais, mas resultam em alguma melhoria quando comparados aos dados brutos fornecidos pela UMI. Como o experimento foi realizado dentro do laboratório, outro fator interessante presente nos dados é a influência da interferência eletromagnética nas medições do magnetômetro.

4.3.3 Dec-15-2011(02h54): Rotações de 180° em torno dos eixos

No terceiro experimento, fez-se a coleta dos dados da UMI rotacionando-se o módulo sensorial de forma controlada em torno dos eixos X, Y e Z respectivamente. O objetivo deste experimento era verificar a adequação dos dados fornecidos pela UMI para a etapa de predição do filtro proposto para localização, bem como a presença de algum tipo de sensibilidade entre eixos ou fator de escala nas medições. Os resultados deste experimento são apresentados nas Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29. As Figuras 4.30, 4.31 e 4.32 apresentam o resultado obtido após a aplicação de um filtro de mediana com janela de tamanho 5. A Figura 4.25 apresenta o resultado da compensação da polarização do girômetro nos dados filtrados, estimada tomando-se a mediana de todos dados amostrais. Os dados apresentaram comportamento consistente com o esperado, isto é, instantes bem ressaltados de rotação em cada um dos eixos.

Além da apresentação dos dados brutos e compensados através dos procedimentos detalhados nas subseções anteriores, apresenta-se o gráfico obtido a partir da integração dos dados do girômetro através da regra do trapézio na Figura 4.34. Este gráfico mostra que, excetuando-se um pequeno fator de escala, a integração dos dados do girômetro é capaz de fornecer uma estimativa razoável da atitude do robô mesmo sem a utilização da correção de atitude através da aplicação das medidas do magnetômetro e acelerômetro no algoritmo TRIAD.

²Na literatura comenta-se sobre a variação da polarização de girômetros a cada vez que eles são alimentados (*run-to-run bias*). Apesar da compensação de temperatura ser feita nesta UMI, porém, o autor observou certa dependência deste parâmetro com a temperatura.

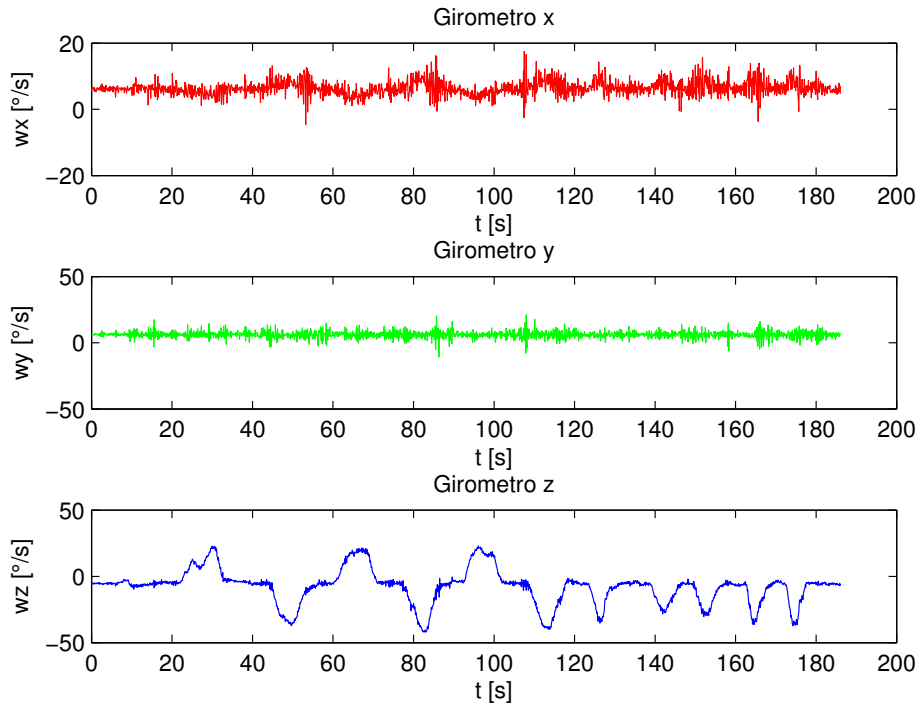


Figura 4.9: Dec-13-2011(18h26): Dados do girômetro

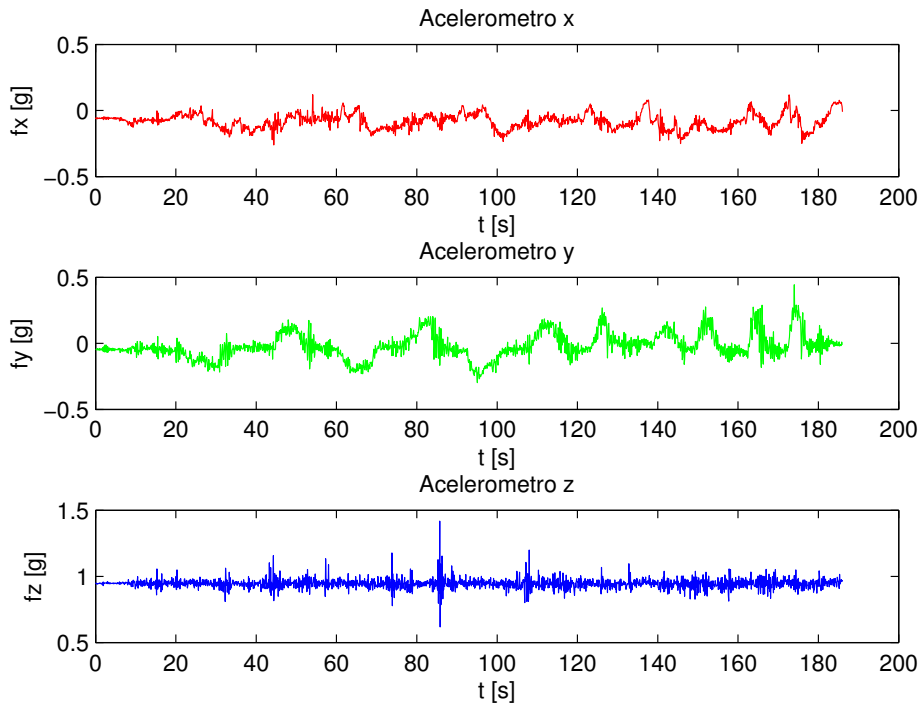


Figura 4.10: Dec-13-2011(18h26): Dados do acelerômetro

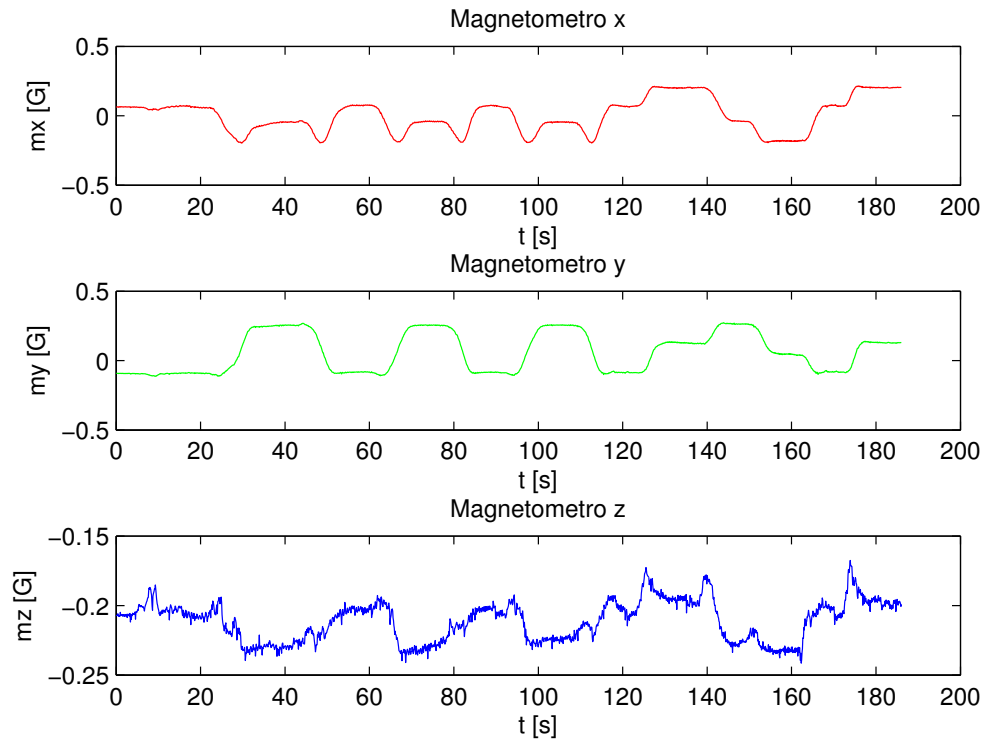


Figura 4.11: Dec-13-2011(18h26): Dados do magnetômetro

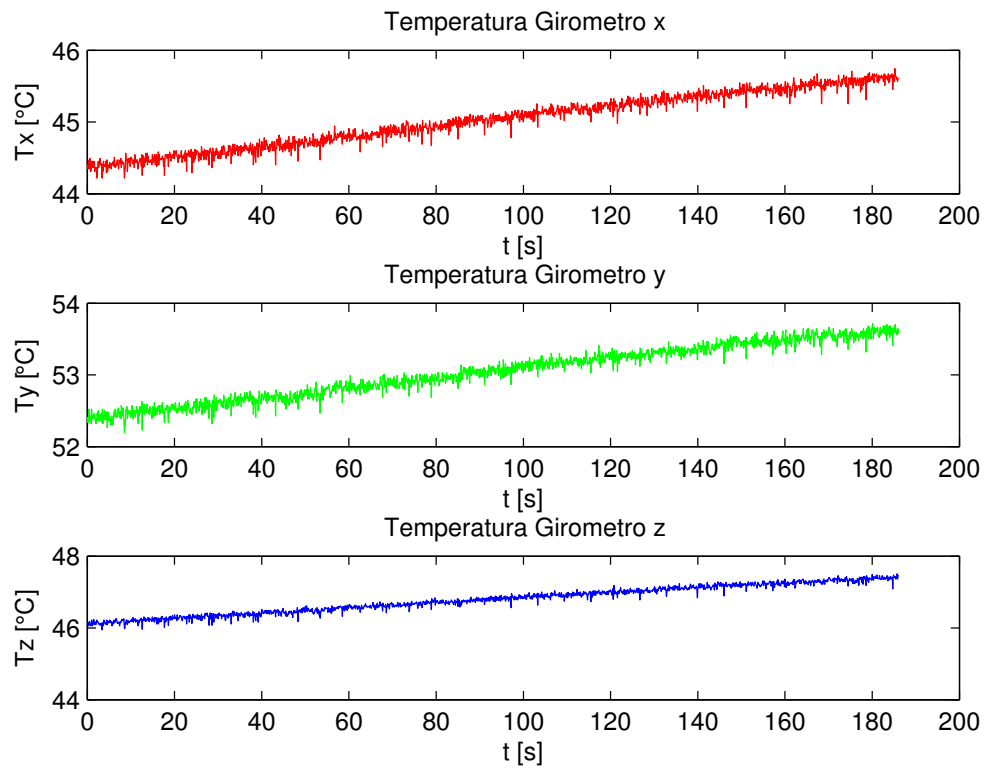


Figura 4.12: Dec-13-2011(18h26): Temperatura do girômetro

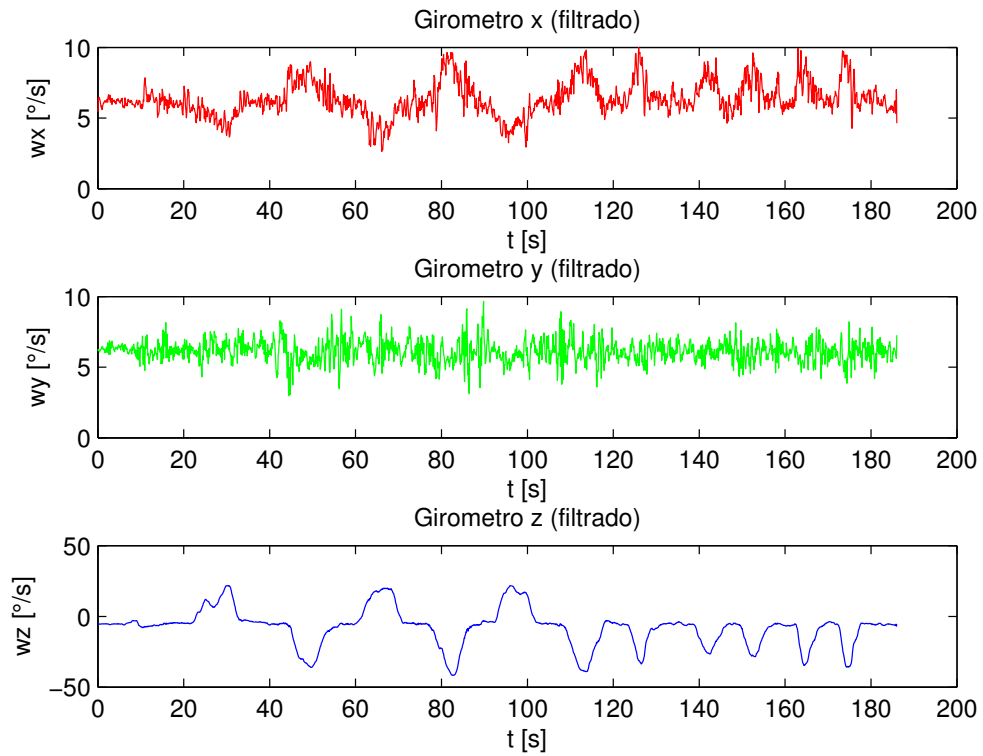


Figura 4.13: Dec-13-2011(18h26): Dados do girômetro (filtrados)

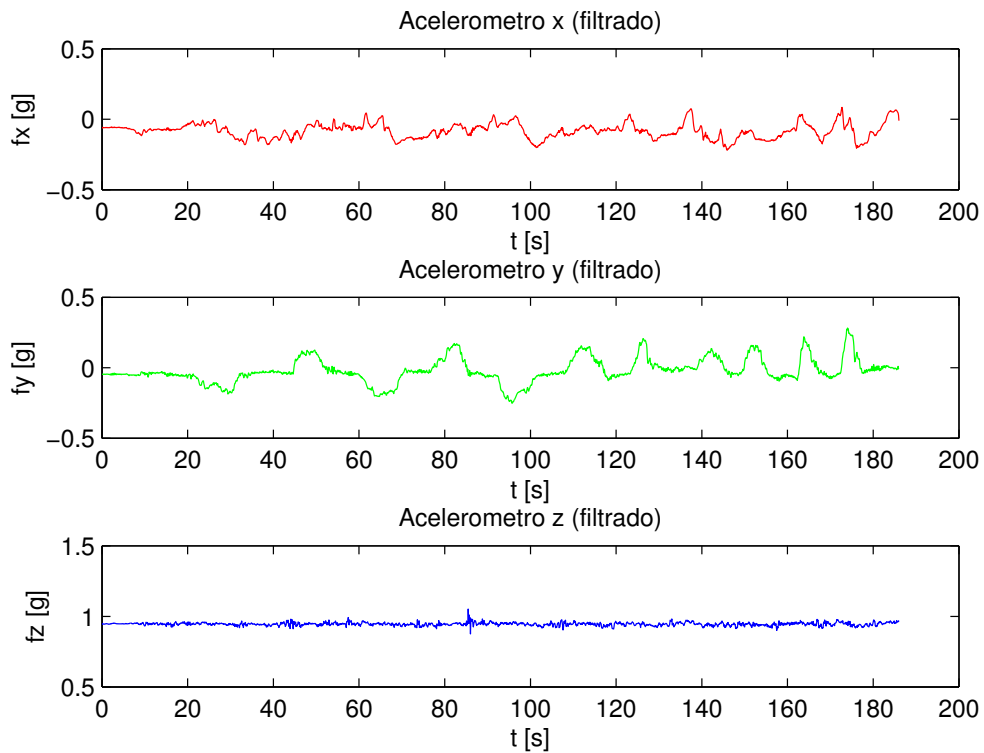


Figura 4.14: Dec-13-2011(18h26): Dados do acelerômetro (filtrados)

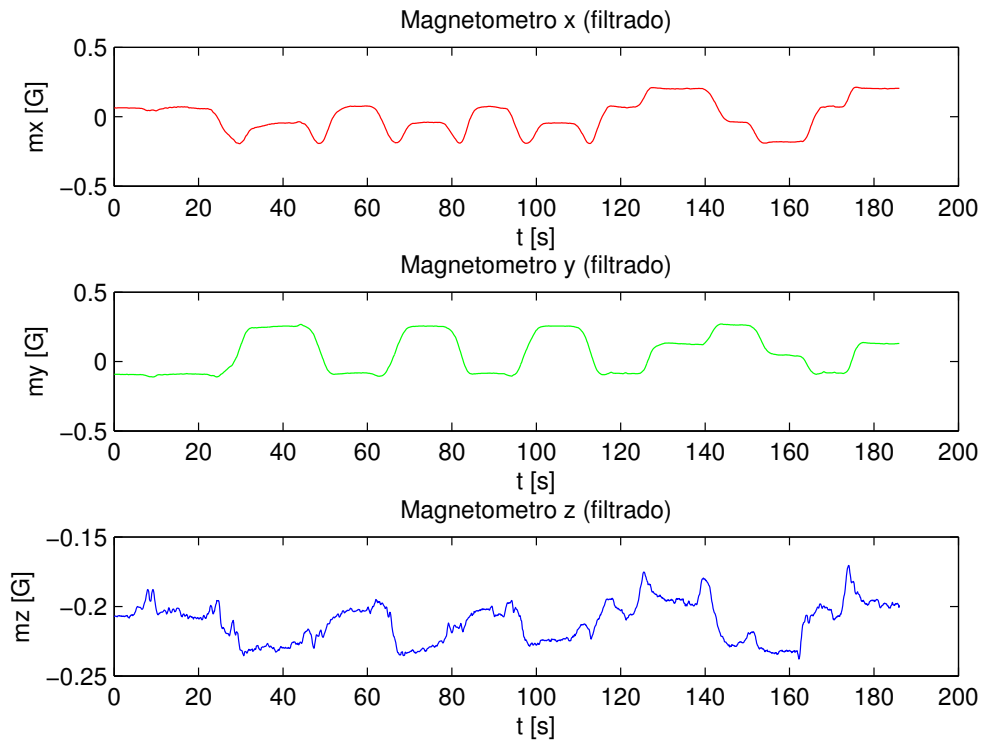


Figura 4.15: Dec-13-2011(18h26): Dados do magnetômetro (filtrados)

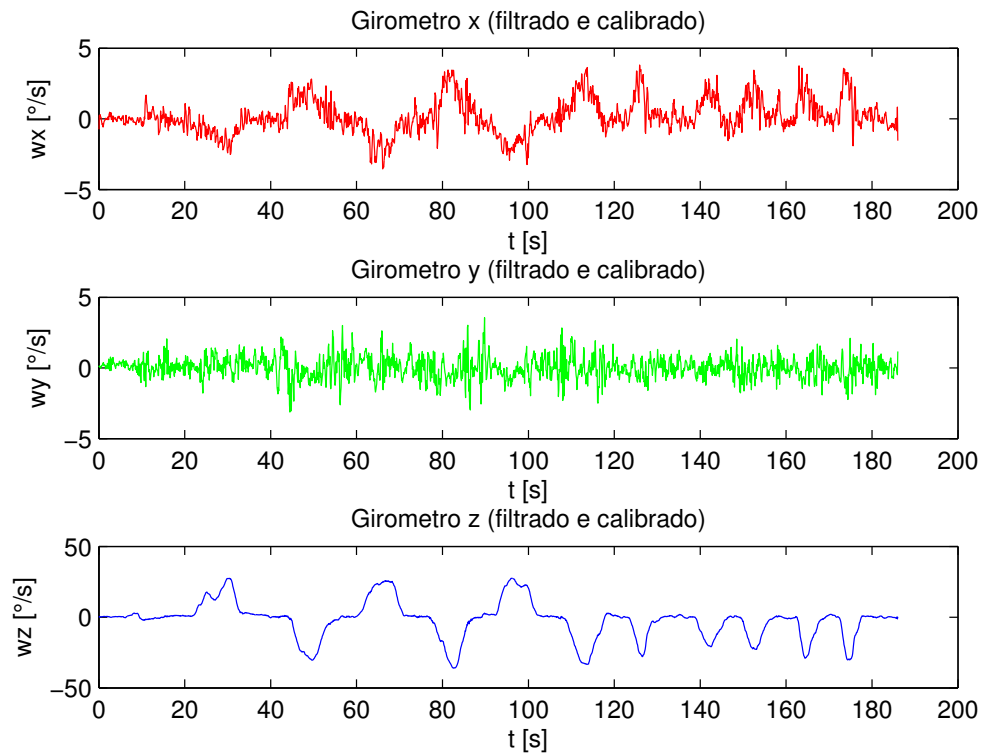


Figura 4.16: Dec-13-2011(18h26): Dados do girômetro (filtrados e calibrados)

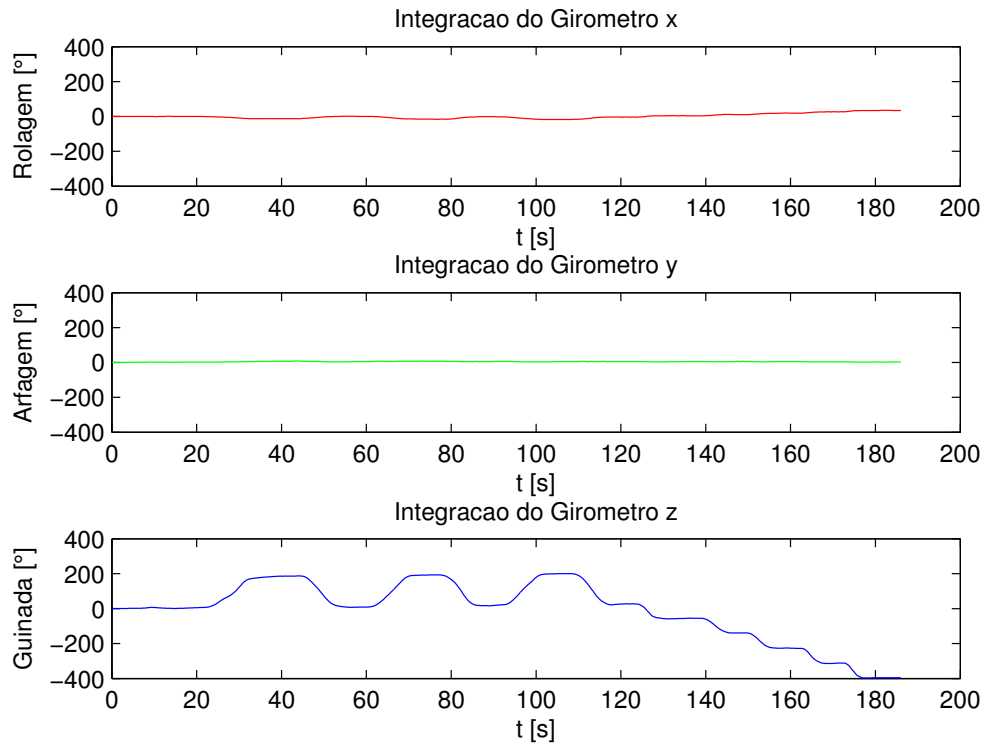


Figura 4.17: Dec-13-2011(18h26): Integração dos dados do girômetro

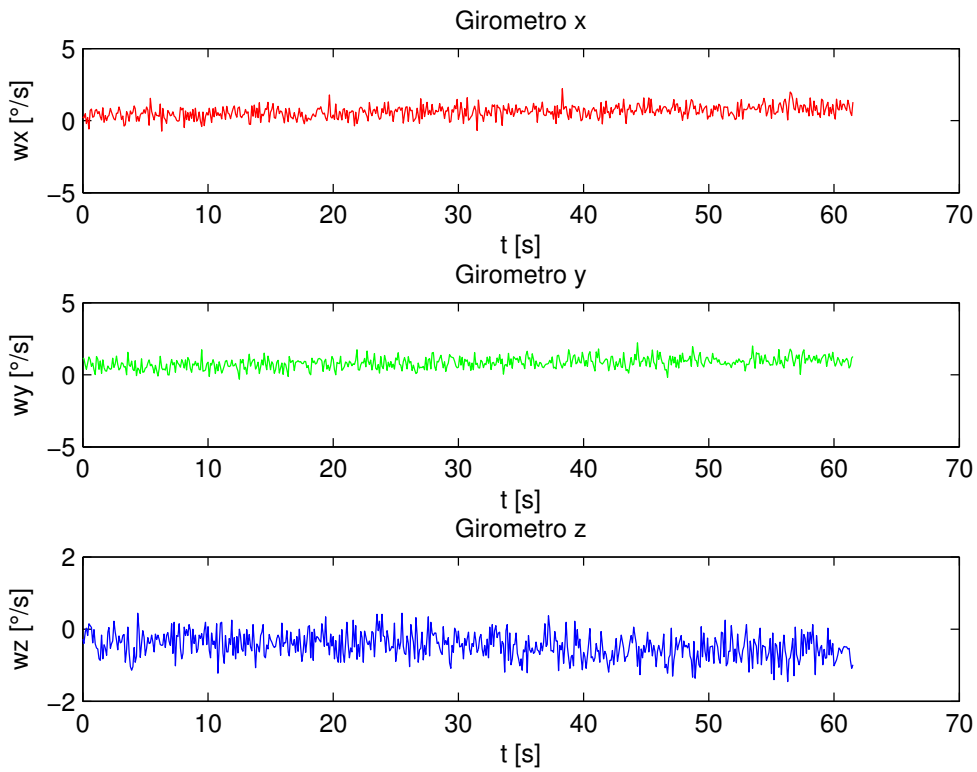


Figura 4.18: Dec-15-2011(02h52): Dados do girômetro

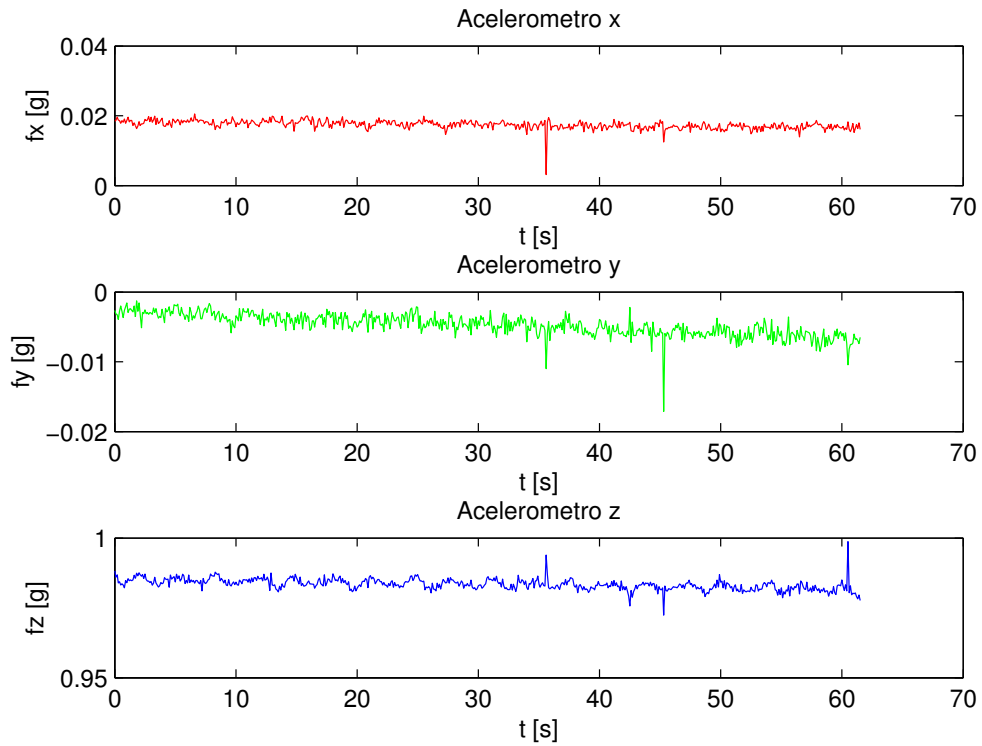


Figura 4.19: Dec-15-2011(02h52): Dados do acelerômetro

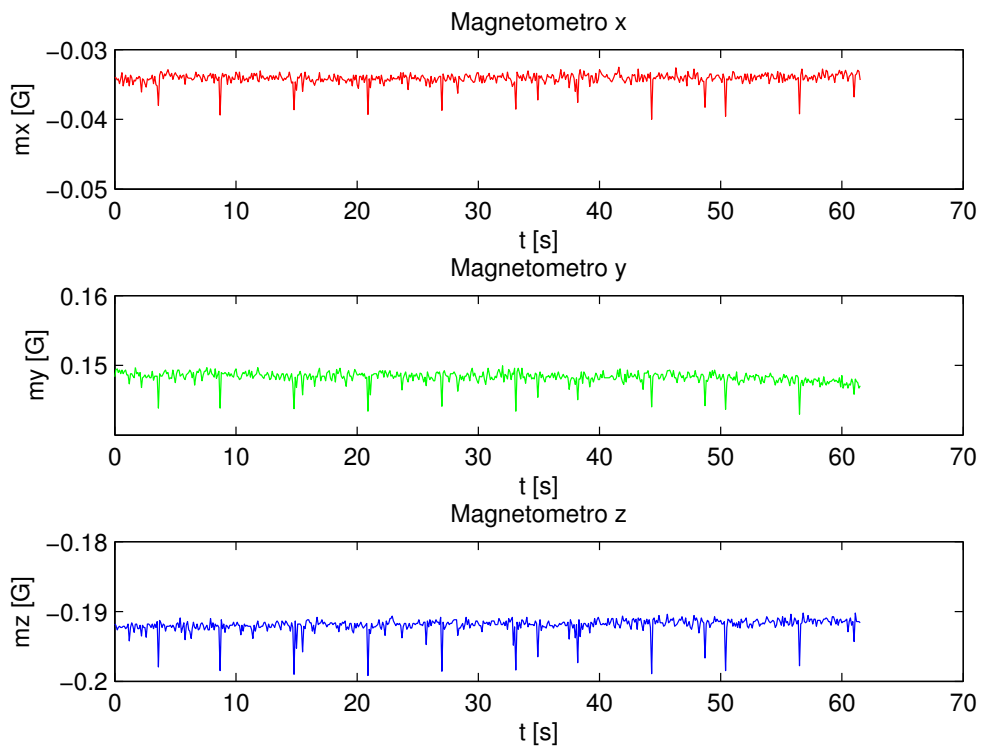


Figura 4.20: Dec-15-2011(02h52): Dados do magnetômetro

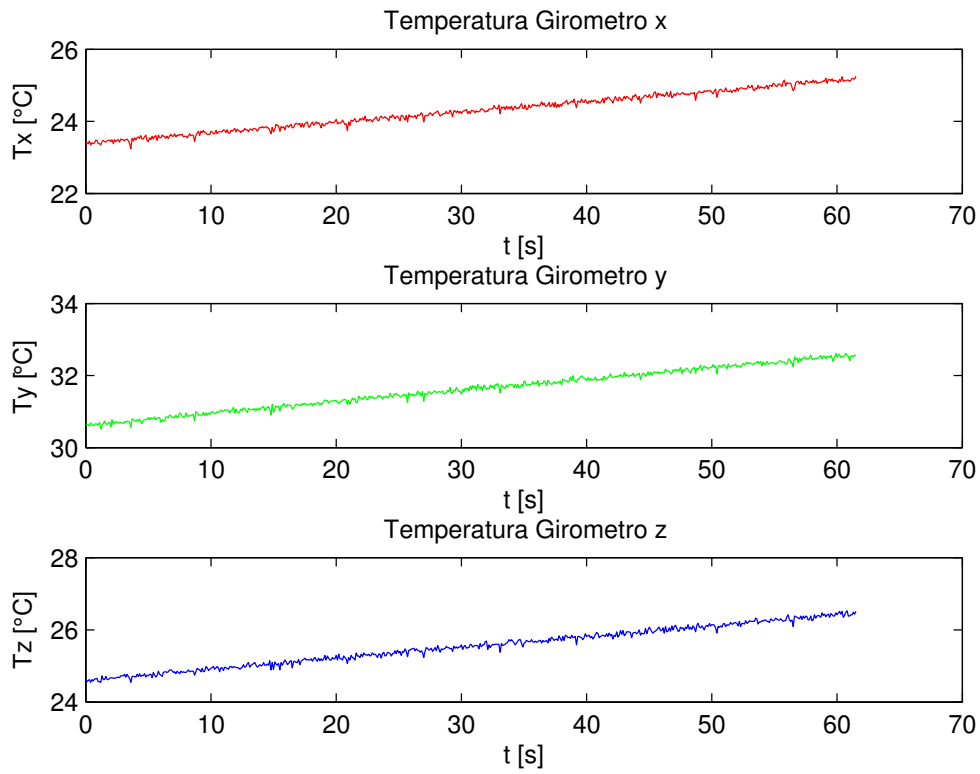


Figura 4.21: Dec-15-2011(02h52): Temperatura do girômetro

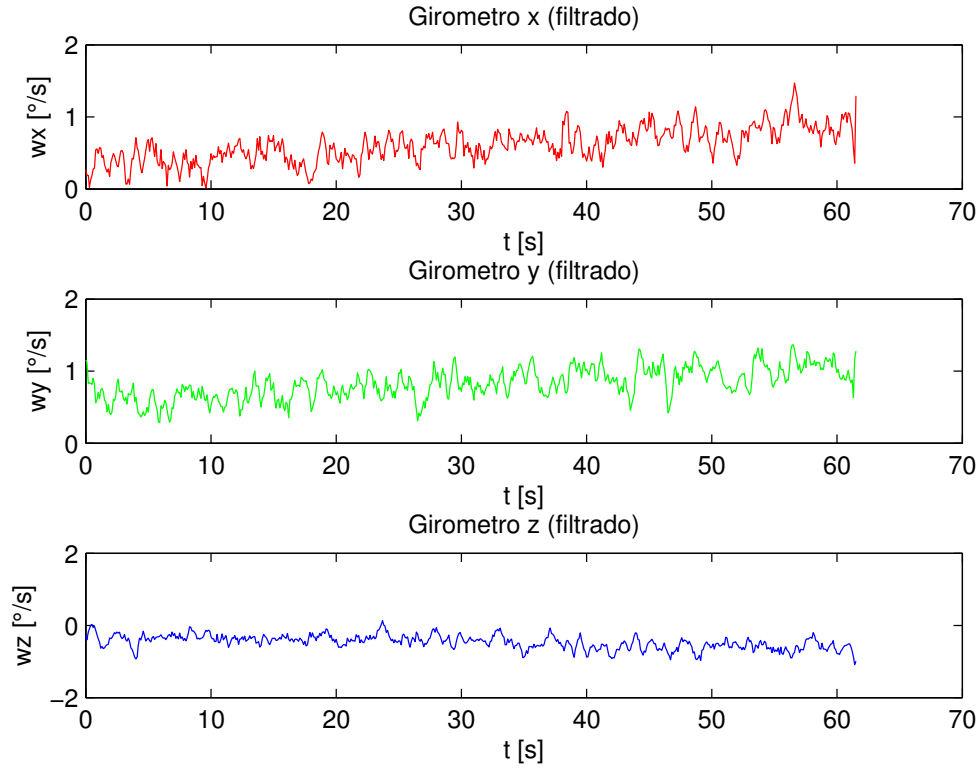


Figura 4.22: Dec-15-2011(02h52): Dados do girômetro (filtrados)

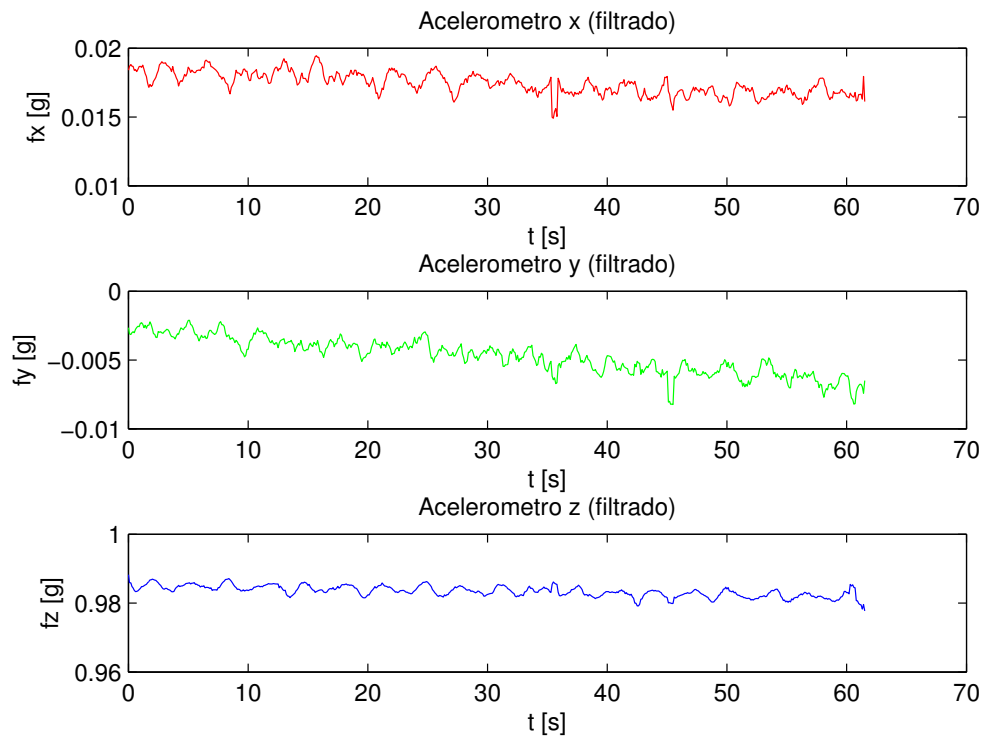


Figura 4.23: Dec-15-2011(02h52): Dados do acelerômetro (filtrados)

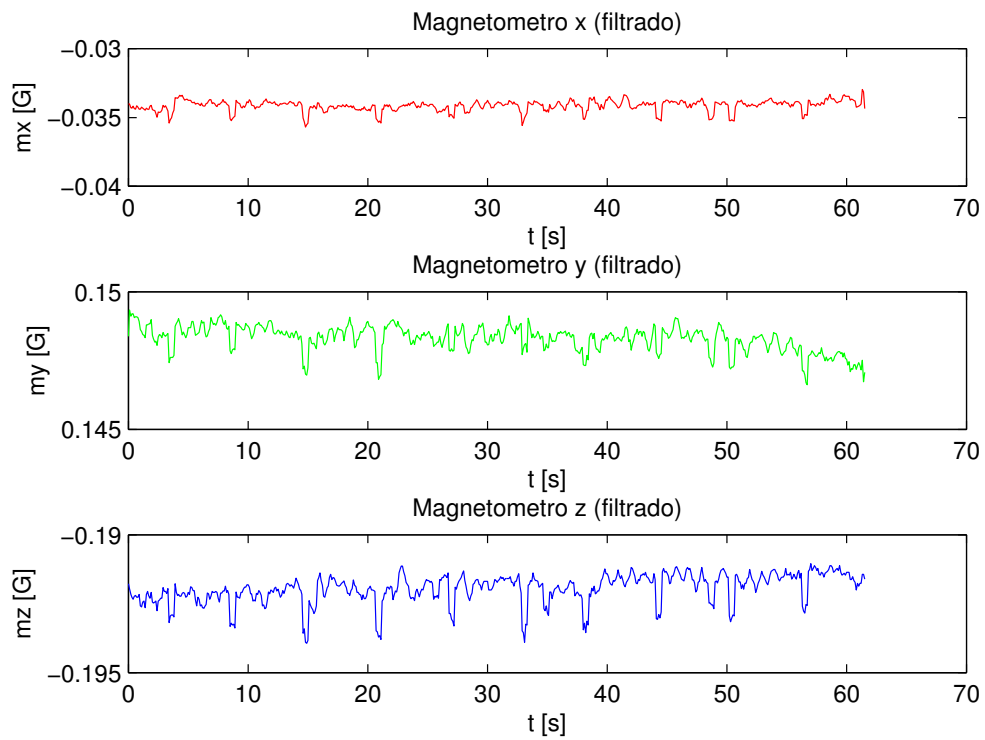


Figura 4.24: Dec-15-2011(02h52): Dados do magnetômetro (filtrados)

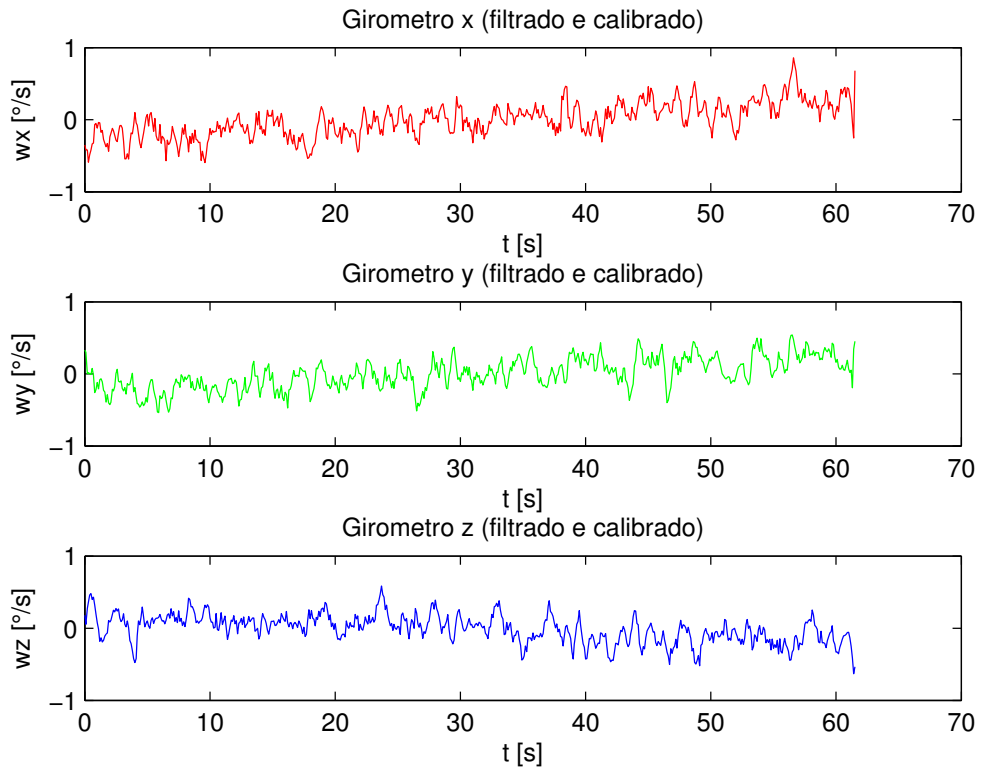


Figura 4.25: Dec-15-2011(02h52): Dados do girômetro (filtrados e calibrados)

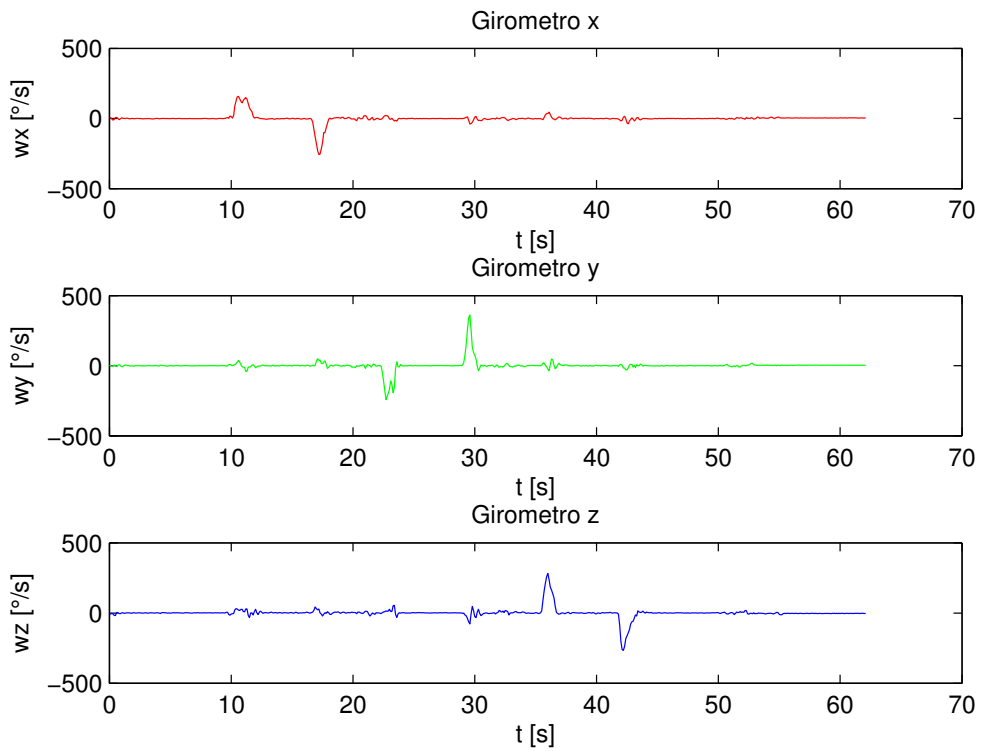


Figura 4.26: Dec-15-2011(02h54): Dados do girômetro

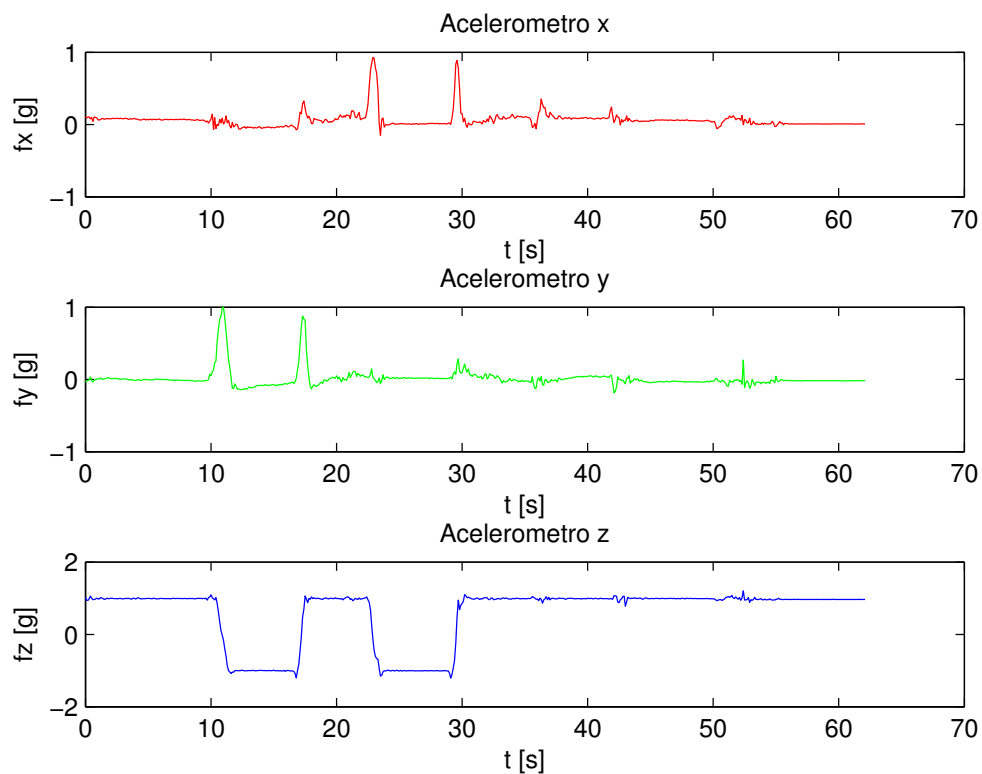


Figura 4.27: Dec-15-2011(02h54): Dados do acelerômetro

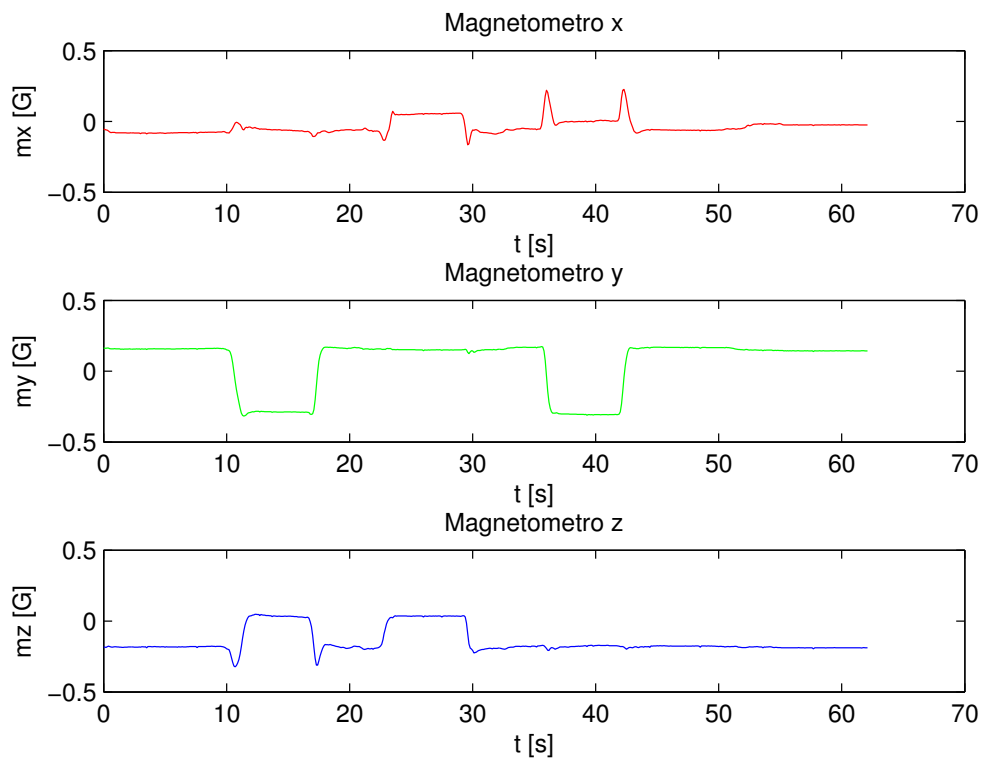


Figura 4.28: Dec-15-2011(02h54): Dados do magnetômetro

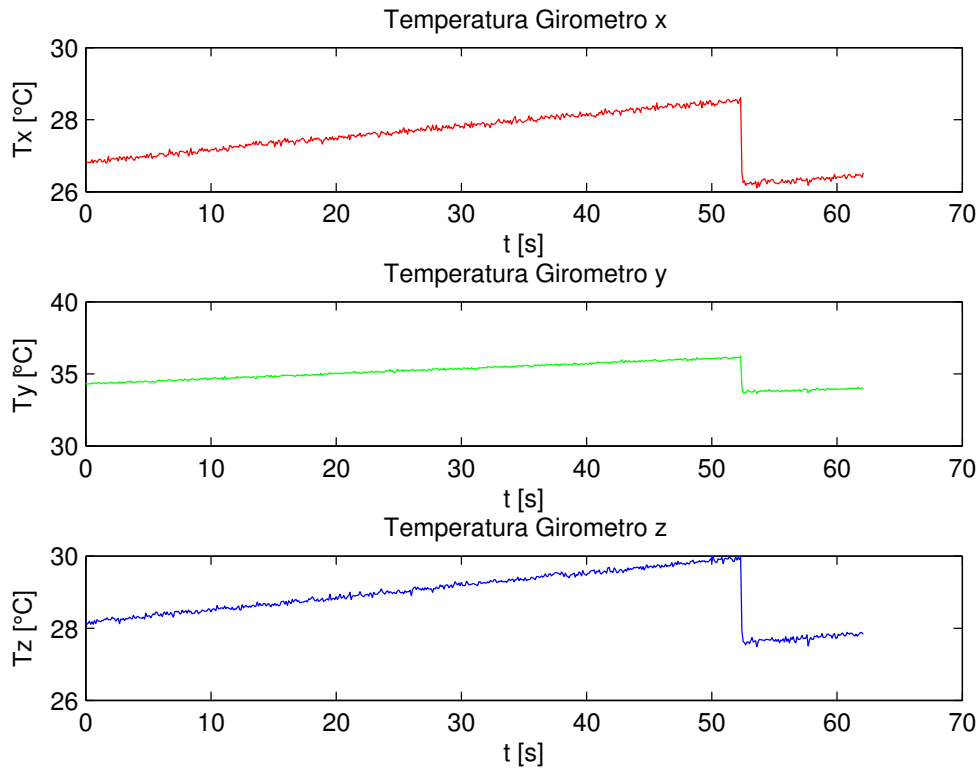


Figura 4.29: Dec-15-2011(02h54): Temperatura do girômetro

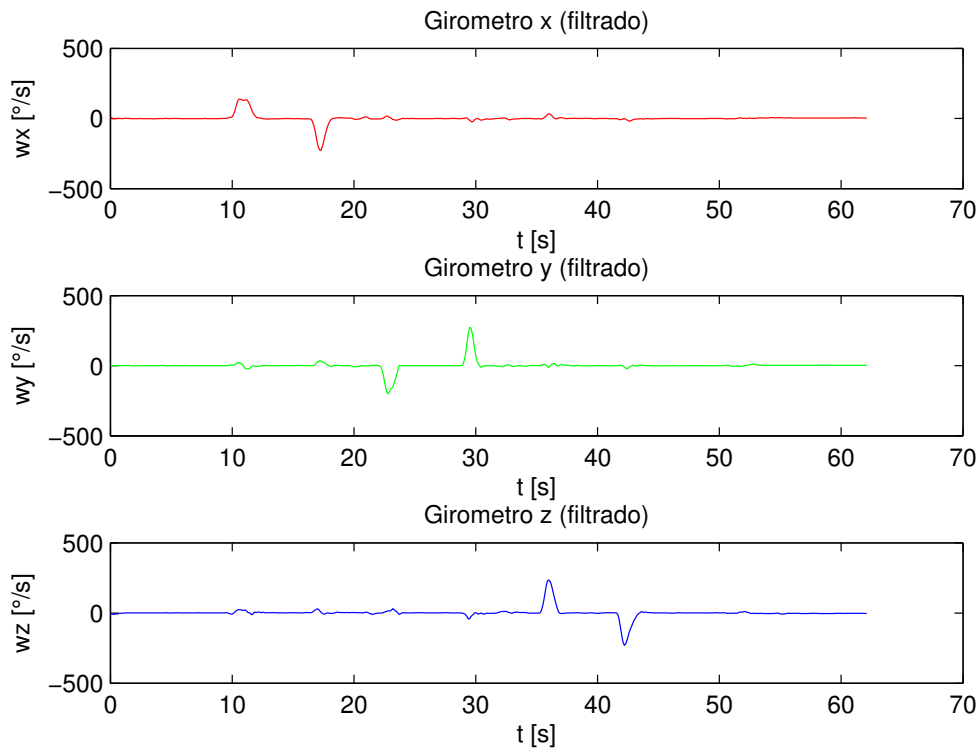


Figura 4.30: Dec-15-2011(02h54): Dados do girômetro (filtrados)

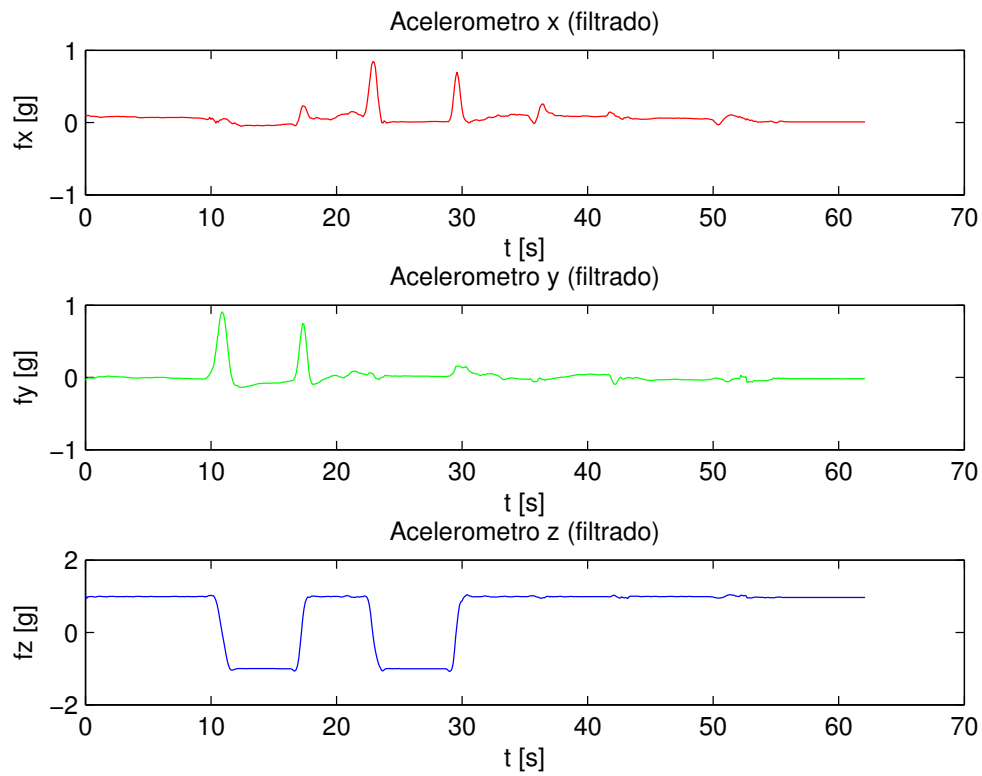


Figura 4.31: Dec-15-2011(02h54): Dados do acelerômetro (filtrados)

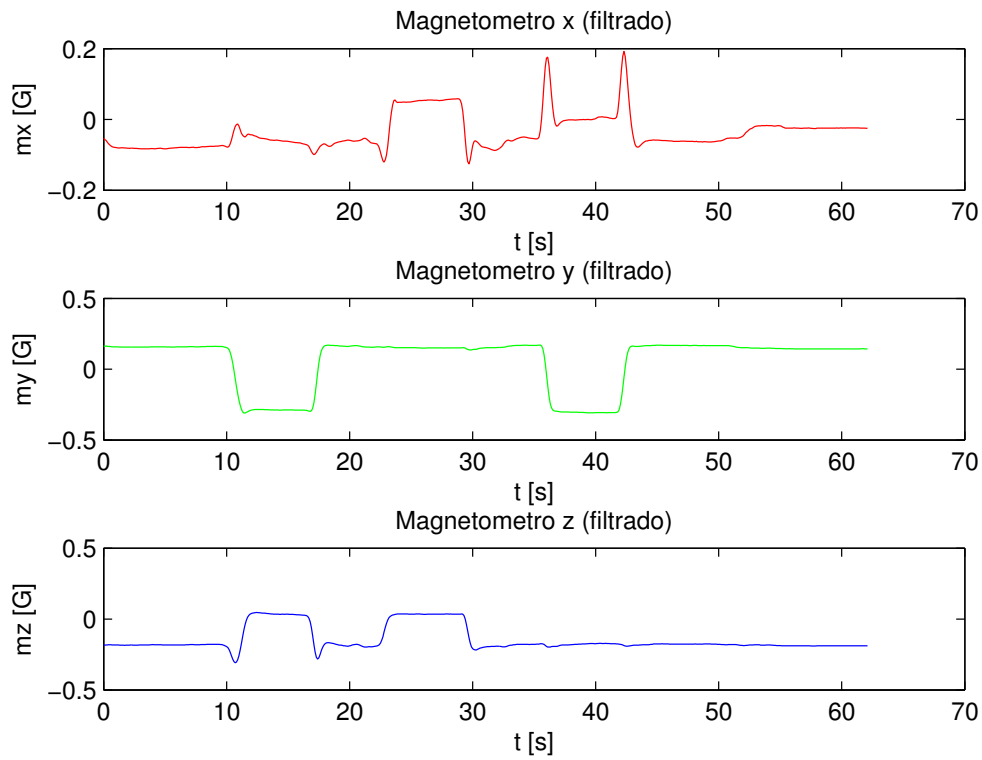


Figura 4.32: Dec-15-2011(02h54): Dados do magnetômetro (filtrados)

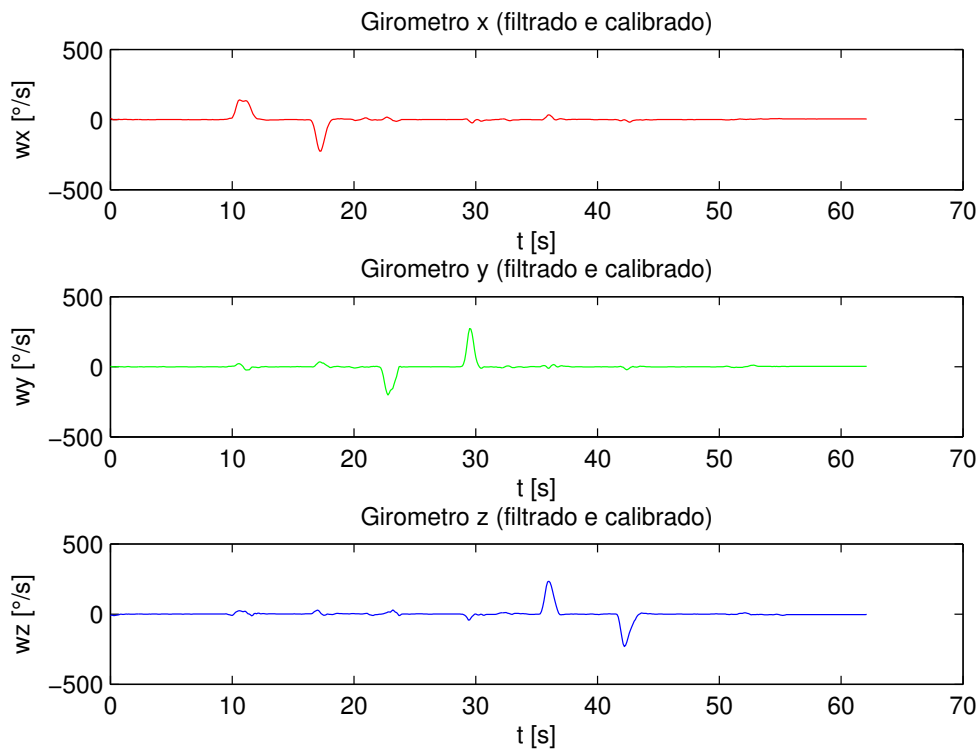


Figura 4.33: Dec-15-2011(02h54): Dados do girômetro (filtrados e calibrados)

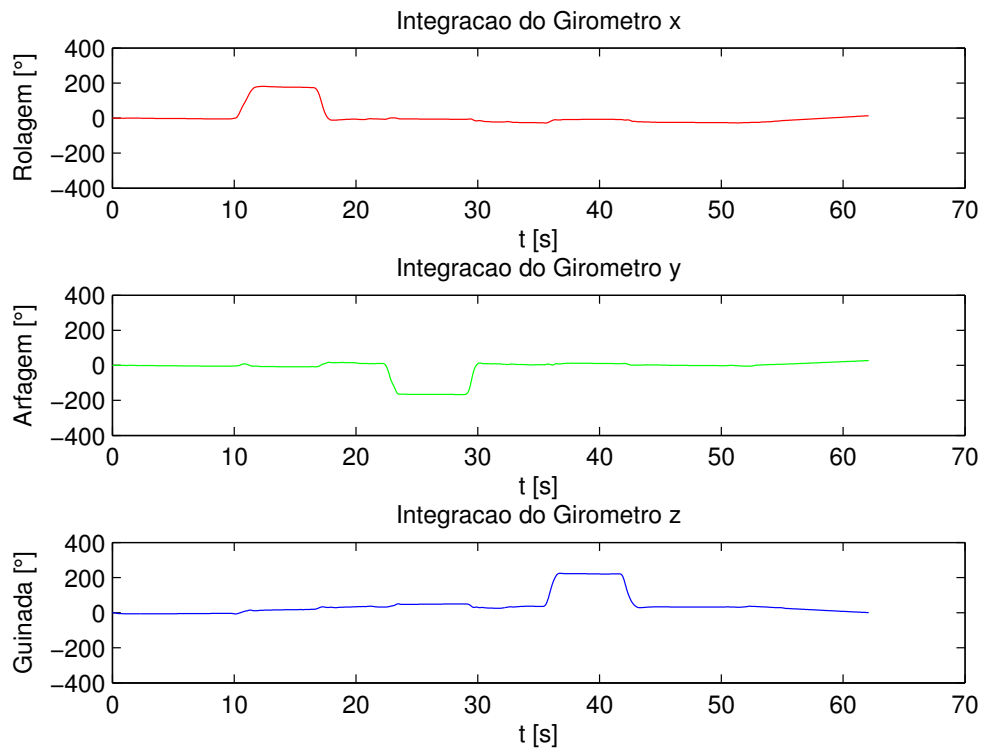


Figura 4.34: Dec-15-2011(02h54): Integração dos dados do girômetro

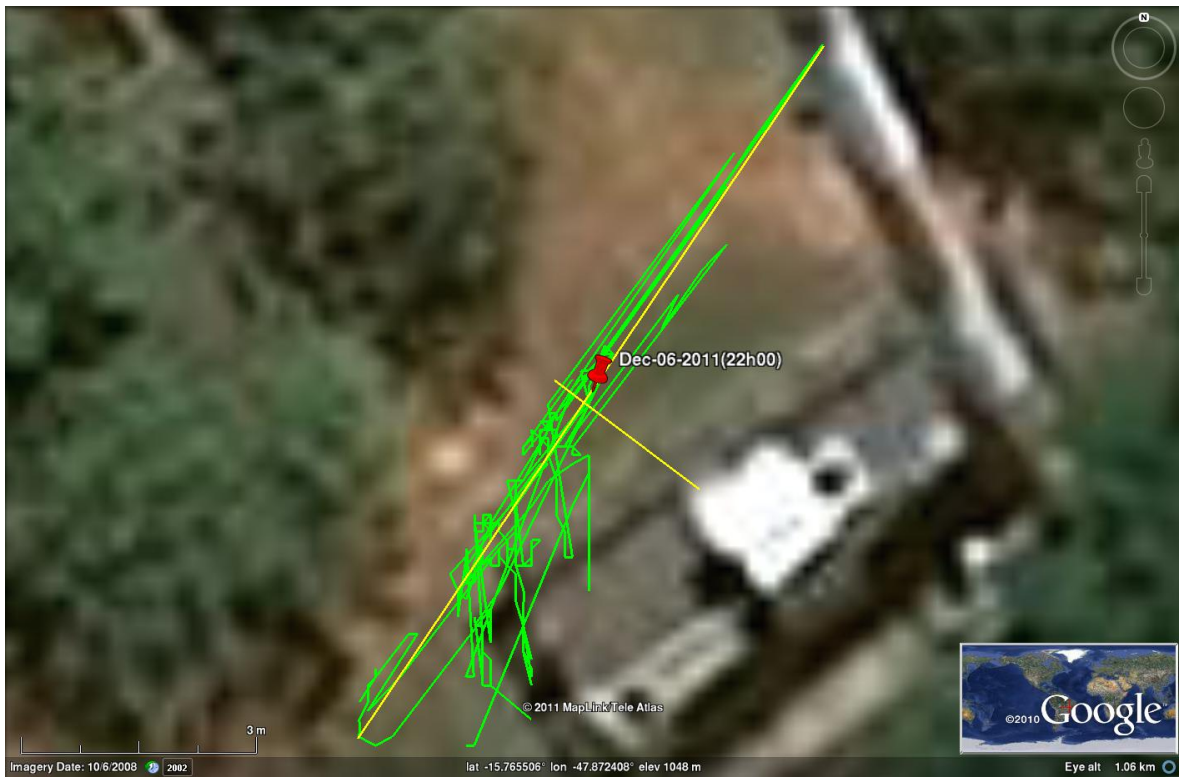


Figura 4.35: Dec-06-2011(22h00): Dados de posição do GPS exportados para o *Google Earth*



Figura 4.36: Dec-13-2011(17h48): Dados de posição do GPS exportados para o *Google Earth*

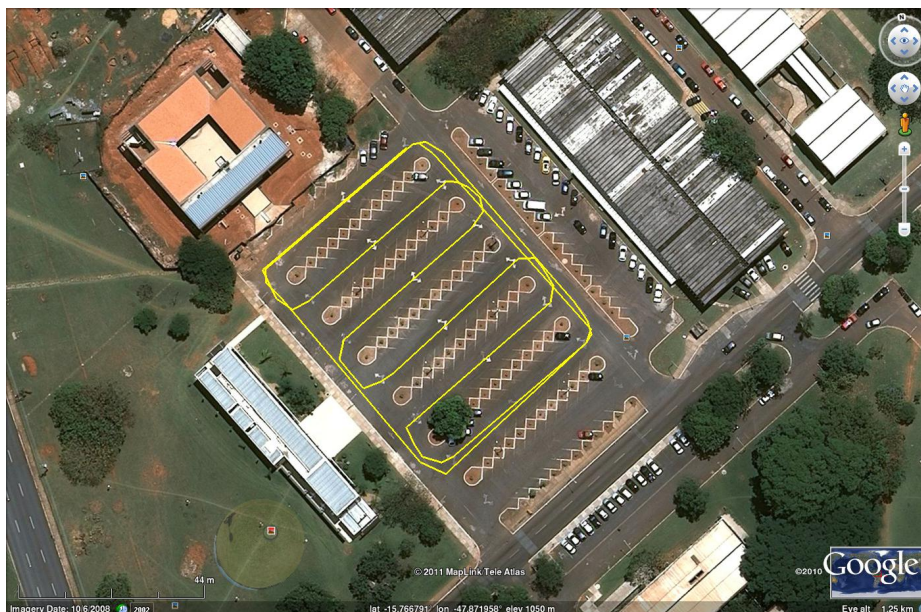


Figura 4.37: Dec-13-2011(18h26): Trajetória do experimento desenhada no *Google Earth*

4.4 Dificuldades encontradas

Dentre as dificuldades encontradas na realização de experimentos para avaliação do sistema de localização proposto, podemos ressaltar:

- **Fragilidade da plataforma robótica escolhida** Após poucos experimentos realizados com o robô em ambientes externos, houve dois longos períodos de hiato devido à quebra de mecanismos de acoplamento de seus motores. De acordo com o fabricante do robô Pioneer 3-AT, a plataforma é inadequada para operação em ambientes com terrenos rugosos ou com alto coeficiente de atrito, sendo sugerida a operação em areia ou terra (apesar da sigla do modelo sugerir a operação em qualquer tipo de terreno). Acrescentando-se a isso a carga adicionada ao robô pelas estruturas que foram integradas desde sua aquisição, observa-se a inviabilidade de sua utilização a longo prazo para os fins deste projeto.
- **Problemas na montagem** Por se tratar de um primeiro protótipo, surgiram várias falhas inesperadas que atrasaram o projeto, como a utilização de um cabo coaxial quebrado para a antena do GPS e o aparecimento de curto-circuitos e contatos falhos devido a minha inexperiência na montagem de circuitos e gabinetes. Apesar destes problemas estarem resolvidos, é possível que reapareçam com o desgaste devido ao seu uso.
- **Dificuldade de teste do sistema** Por se tratar de um sistema voltado para ambientes externos baseado em GPS, a única situação em que é possível realizar testes completos do sistema é fora do laboratório. Não foi viável organizar os procedimentos experimentais para que fosse possível observar imediatamente seus resultados, de modo que a realização de testes foi dificultada. A inclusão de um robô móvel apenas acrescenta dificuldades a este processo. Isto se refletiu na lentidão para correção de erros de programação concorrente, o que finalmente impossibilitou a aquisição de dados sincronizados de ambos sensores.

Capítulo 5

Conclusões

*It's more fun to arrive to
a conclusion than to justify it
Malcolm Forbes*

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de localização para robôs móveis em ambientes externos baseado no projeto de um módulo sensor composto por receptor GPS e unidade de medição inercial contendo acelerômetro, girômetro e magnetômetro triaxiais. Apresentou-se uma revisão bibliográfica acerca do tema, bem como uma breve descrição da modelagem matemática utilizada para fusão sensorial entre GPS e UMI. Em seguida, foi feita a apresentação do processo de desenvolvimento envolvido no projeto e confecção do primeiro protótipo do módulo sensorial GPS/UMI, que foi detalhado nos anexos para facilitar sua reprodução.

O módulo sensorial desenvolvido pode ser utilizado como uma plataforma genérica de localização em ambiente externo para robôs móveis, permitindo também a utilização de GPS diferencial e a avaliação de algoritmos distribuídos para localização multi-robôs, através da troca de medidas entre robôs por meio de uma rede sem-fio. Espera-se que seu projeto possa ser utilizado em outros projetos envolvendo robôs móveis em ambientes externos.

Os resultados obtidos apresentam as condições dos dados fornecidos pelos sensores, que possibilitam a análise de sua qualidade para uso em um sistema de localização *online* implementado em robôs móveis. Os dados coletados mostram que seu uso é viável, embora seja necessário incorporar determinados ajustes no sistema de localização tais como a compensação da polarização dos sensores e a filtragem de ruído de alta frequência.

Como trabalhos futuros, propõe-se a avaliação *offline* dos dados obtidos através dos algoritmos de localização codificados em MATLAB em trabalhos anteriores, a implementação *online* dos algoritmos de localização baseados no filtro de Kalman estendido correlato, e o estudo e implementação de algoritmos distribuídos de localização para múltiplos robôs. Antes disso, porém, é inicialmente necessário resolver as dificuldades para coleta de dados simultâneos dos sensores – uma abordagem que pode facilitar a resolução deste problema é a abolição do uso de conversores USB-Serial com o módulo sensorial e a programação em tempo-real do código de coleta de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FIÉVET, C. *Les robots: Que sais-je?* Paris, France: Presses universitaires de France, 2002.
- [2] BEKEY, G. A. *Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control*. Cambridge, USA: MIT Press, 2005. (Intelligent robotics and autonomous agents).
- [3] SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Cambridge, USA: MIT Press, 2004. (Intelligent robotics and autonomous agents).
- [4] THRUN, S.; BURGARD, W.; FOX, D. *Probabilistic Robotics*. Cambridge, USA: MIT Press, 2005. (Intelligent robotics and autonomous agents).
- [5] THRUN, S. et al. Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge. *Journal of Field Robotics*, v. 23, n. 1, p. 661–692, June 2006.
- [6] URMSON, C. et al. Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge. *Journal of Field Robotics Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge, Part I*, v. 25, n. 1, p. 425–466, June 2008.
- [7] BÓ, A. P. L. *Desenvolvimento de um sistema de localização 3D para aplicação em robôs aéreos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- [8] BÓ, A. P. L.; BORGES, G. A. Low-cost 3D localization system for applications on aerial robots. In: MIYAGI, P. E.; HORIKAWA, O.; MOTTA, J. M. (Ed.). *ABCm symposium series in mechatronics*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2008. v. 3, p. 355–362.
- [9] BORGES, G. A.; BÓ, A. P. L.; ISHIHARA, J. Y. An IMU/Magnetometer/GPS-based localization system using correlated Kalman filtering. In: *XVII Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2008)*. Juiz de Fora: XVII Congresso Brasileiro de Automática, 2008. v. 3, p. 1–6.
- [10] JEFFREY, C. *An Introduction to GNSS: GPS, GLONASS, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems*. 1st. ed. Calgary, Canada: NovAtel Inc, 2010.
- [11] GREWAL, M.; WEILL, L.; ANDREWS, A. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. New York, USA: Wiley Inter-Science, 2001.
- [12] TITTERTON, D. H.; WESTON, J. L. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2nd. ed. Stevenage, United Kingdom: Institution of Electrical Engineers American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. (IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 5).

- [13] Analog Devices. *New iMEMS[®] Angular-Rate-Sensing Gyroscope*. Norwood, USA. Product Description. Analog Dialogue 37-03 (2003).
- [14] BENTLEY, J. P. *Principles of Measurement Systems*. 4th. ed. Harlow, UK: Pearson Prentice Hall, 2005. Paperback.
- [15] GROVES, P. D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Boston, USA: Artech House, 2008. (GNSS Technology and Applications Series).
- [16] CARVALHO, F. M. R. de. *Estimadores Estocásticos para Fusão de Sensores Inerciais e GPS*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2010.
- [17] AGHILI, F.; SALERNO, A. Attitude Determination and Localization of Mobile Robots Using Two RTK GPSs and IMU. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*. St. Louis, USA: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009. p. 2045–2052.
- [18] NOVACEK, P. The Attitude Estimation using IMU/GPS and Adaptive Filtering. In: *Sixth Pegasus-AIAA Student Conference*. Sevilla, Spain: Pegasus-AIAA Student Conference, 2010.
- [19] PANZIERI, S.; PASCUCCI, F.; ULIVI, G. An outdoor navigation system using GPS and inertial platform. In: *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'01)*. Como, Italy: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2001. v. 2, p. 1346–1351.
- [20] JIONG, Y. et al. GPS/SINS/BARO Integrated Navigation System for UAV. In: *2010 International Forum on Information Technology and Applications (IFITA 2010)*. Kunming, China: International Forum on Information Technology and Applications, 2010. v. 3, p. 19–25.
- [21] OH, S.-M. Multisensor Fusion for Autonomous UAV Navigation Based on the Unscented Kalman Filter with Sequential Measurement Updates. In: *2010 IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI 2010)*. Salt Lake City, USA: IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2010. p. 217–222.
- [22] EDWARDS, W. L.; CLARK, B. J.; BEVLY, D. M. Implementation Details of a Deeply Integrated GPS/INS Software Receiver. In: *IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS 2010)*. Indian Wells/Palm Springs, USA: IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium, 2010. p. 1137–1146.
- [23] EDWAN, E. et al. GPS/INS Integration for GF-IMU of Twelve Mono-axial Accelerometers Configurations. In: *6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC 2009)*. Hannover, Germany: 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 2009. p. 183–188.
- [24] HEMERLY, E. M. Implementation of a GPS/INS/Odometer navigation system. In: MIYAGI, P. E.; HORIKAWA, O.; MOTTA, J. M. (Ed.). *ABCm symposium series in mechatronics*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2008. v. 3, p. 519–524.

- [25] MAKLOUF, O. et al. Cascade Kalman Filter Application in GPS/INS Integrated Navigation for Car like Robot. In: *National Radio Science Conference (NRSC 2009)*. Cairo, Egypt: National Radio Science Conference, 2009. p. 1–15.
- [26] NORTH, E. et al. Enhanced Mobile Robot Outdoor Localization Using INS/GPS Integration. In: *International Conference on Computer Engineering Systems (ICCES 2009)*. Cairo, Egypt: International Conference on Computer Engineering Systems, 2009. p. 127–132.
- [27] CHAE, H. et al. Autonomous Navigation of Mobile Robot based on DGPS/INS Sensor Fusion by EKF in Semi-outdoor Structured Environment. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*. Taipei, Taiwan: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010. p. 1222–1227.
- [28] LAU, T. K.; LIU, Y.-H.; LIN, K.-W. A Robust State Estimation Method Against GNSS Outage for Unmanned Miniature Helicopters. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010)*. Anchorage, USA: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010. p. 1116–1122.
- [29] CARON, F. et al. GPS/IMU Data Fusion using Multisensor Kalman Filtering: Introduction of Contextual Aspects. *Information Fusion*, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands, v. 7, p. 221–230, June 2006.
- [30] SHEN, Y.; ZHU, Z.; MAO, E. Double-Fuzzy Kalman Filter Based on GPS/IMU/MV Sensor Fusion for Tractor Autonomous Guidance. In: *IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL 2007)*. Jinan, Shandong, China: IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2007. p. 61–65.
- [31] MACHARET, D. G. *Localização e mapeamento em terrenos irregulares utilizando robôs móveis*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- [32] MACHARET, D. G. et al. Mobile robot localization in outdoor environments using complementary filtering. In: NEGRI, V. J. D. et al. (Ed.). *ABCm symposium series in mechatronics*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2010. v. 4, p. 758–767.
- [33] FOX, D. et al. A Probabilistic Approach to Collaborative Multi-Robot Localization. *Autonomous Robots*, Kluwer Academic Publishers, Hingham, USA, v. 8, p. 325–344, June 2000.
- [34] HOWARD, A.; MATARIC, M.; SUKHATME, G. Putting the 'T' in 'Team': an Ego-Centric Approach to Cooperative Localization. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2003)*. Taipei, Taiwan: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. v. 1, p. 868–874.
- [35] XINGXI, S. et al. Cooperative Multi-Robot Localization Based on Distributed UKF. In: *3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICC-SIT 2010)*. Chengdu, China: 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 2010. v. 6, p. 590–593.

- [36] BO, Y.; YOUHONG, Z.; YAN, C. A Fault-Tolerant Integrated Navigation Method for Land Vehicle. In: *2nd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC 2010)*. Shenyang, Liaoning, China: 2nd International Conference on Advanced Computer Control, 2010. v. 4, p. 432–435.
- [37] EMTER, T. et al. Multi-Sensor Fusion for Localization of a Mobile Robot in Outdoor Environments. In: *41st International Symposium on Robotics and 6th German Conference on Robotics (ISR-ROBOTIK 2010)*. Munich, Germany: 41st International Symposium on Robotics and 6th German Conference on Robotics, 2010. p. 1–6.
- [38] KHIDER, M. et al. Bayesian Multisensor Navigation Incorporating Pseudoranges and Multipath Model. In: *IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS 2010)*. Indian Wells/Palm Springs, USA: IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium, 2010. p. 816–825.
- [39] LEVINSON, J.; THRUN, S. Robust Vehicle Localization in Urban Environments Using Probabilistic Maps. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010)*. Anchorage, USA: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010. p. 4372–4378.
- [40] FRONTONI, E. et al. Robot localization in urban environments using omnidirectional vision sensors and partial heterogeneous apriori knowledge. In: *IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA'10)*. Qingdao, Shandong, China: IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications, 2010. p. 428–433.
- [41] LEE, D. et al. Sensor Fusion Localization System for Outdoor Mobile Robot. In: *ICROS & SICE International Joint Conference (ICCAS-SICE 2009)*. Fukuoka, Japan: ICROS & SICE International Joint Conference, 2009. p. 1384–1387.
- [42] HYUN, D. et al. A Dead Reckoning Sensor System and a Tracking Algorithm for mobile robots. In: *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM 2009)*. Malaga, Spain: IEEE International Conference on Mechatronics, 2009. p. 1–6.
- [43] CASSINIS, R.; TAMPALINI, F.; FEDRIGOTTI, R. Active markers for outdoor and indoor robot localization. In: *Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS 2005)*. London, UK: Towards Autonomous Robotic Systems, 2005. p. 27–34.
- [44] BAILEY, T. *Mobile robot localisation and mapping in extensive outdoor environments*. Tese (Doutorado) — University of Sidney, Sidney, Australia, 2002.
- [45] NEGENBORN, R. *Robot localization and kalman filters: on finding your position in a noisy world*. Dissertação (Mestrado) — Utrecht University, Utrecht, The Netherlands, 2003.
- [46] SUZUKI, T. et al. 6-DOF Localization for a Mobile Robot using Outdoor 3D Voxel Maps. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*. Taipei, Taiwan: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010. p. 5737–5743.

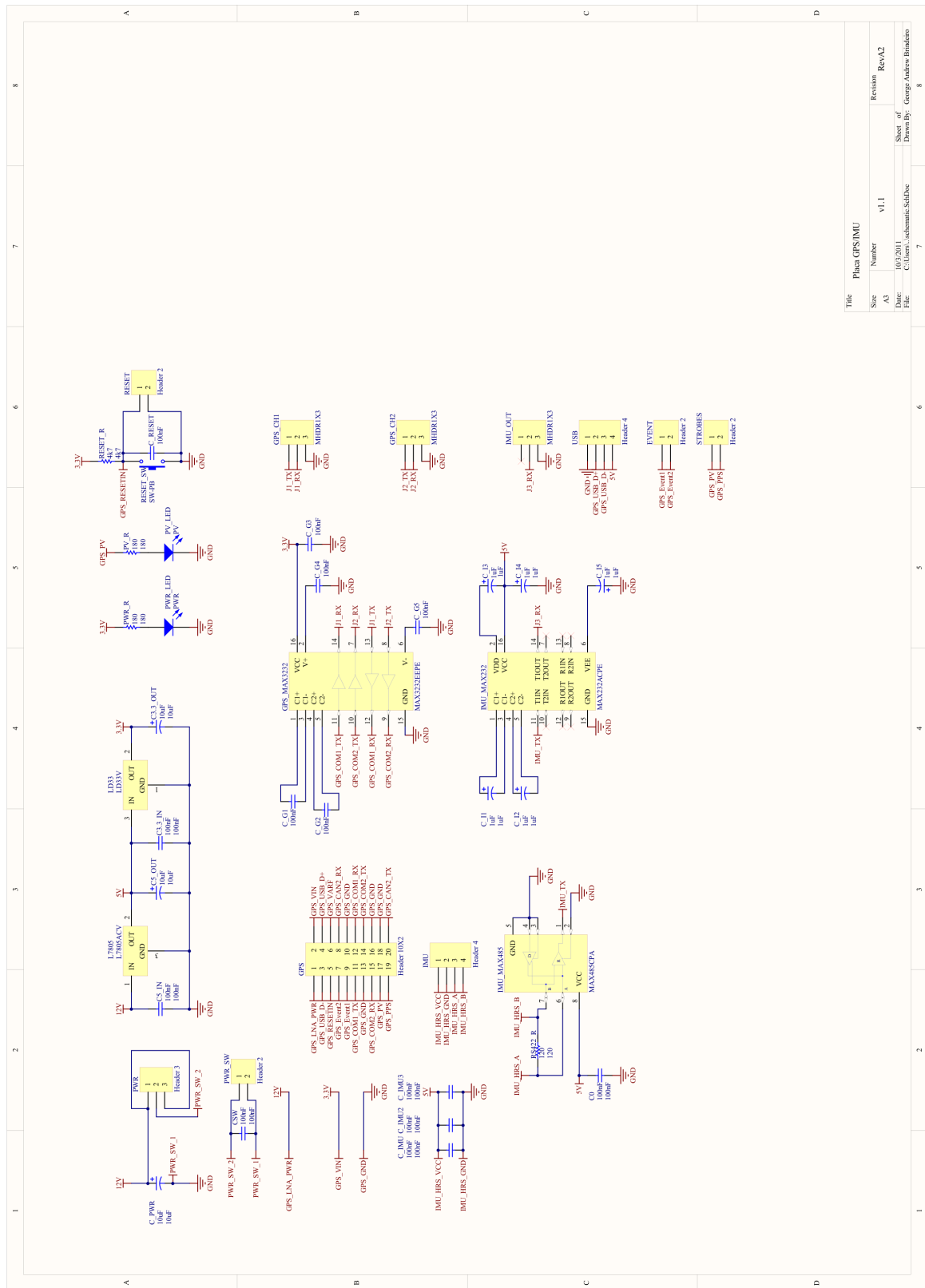
- [47] XIE, J. et al. A Real-Time Robust Global Localization for Autonomous Mobile Robots in Large Environments. In: *11th International Conference on Control Automation Robotics Vision (ICARCV 2010)*. Singapore: 11th International Conference on Control Automation Robotics Vision, 2010. p. 1397–1402.
- [48] KÜMMERLE, R. et al. Monte Carlo Localization in Outdoor Terrains using Multi-Level Surface Maps. *Journal of Field Robotics*, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, UK, v. 25, p. 346–359, June 2008.
- [49] ZHOU, C. et al. A Low-Power Shoe-Embedded Radar for Aiding Pedestrian Inertial Navigation. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 58, n. 10, p. 2521–2528, oct. 2010.
- [50] TANENHAUS, M. et al. Accurate Real Time Inertial Navigation Device by Application and Processing of Arrays of MEMS Inertial Sensors. In: *IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS 2010)*. Indian Wells/Palm Springs, USA: IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium, 2010. p. 20–26.
- [51] SANTANA, P. H. Q. e A. *Filtragem Estocástica para Sistemas Híbridos e suas Aplicações em Robótica Aérea*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- [52] TAYLOR, C. N. et al. Comparison of Two Image and Inertial Sensor Fusion Techniques for Navigation in Unmapped Environments. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 47, n. 2, p. 946–958, april 2011.
- [53] KENDOUL, F.; NONAMI, K. A Visual Navigation System for Autonomous Flight of Micro Air Vehicles. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*. St. Louis, USA: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009. p. 3888–3893.
- [54] CHAO, H. et al. A Comparative Evaluation of Low-Cost IMUs for Unmanned Autonomous Systems. In: *IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI 2010)*. Salt Lake City, USA: IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2010. p. 211–216.
- [55] AGOSTINO, M. D.; MANZINO, A. M.; PIRAS, M. Performances Comparison of Different MEMS-based IMUs. In: *IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS 2010)*. Indian Wells/Palm Springs, USA: IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium, 2010. p. 187–201.
- [56] BATISTA, P. et al. Low-cost Attitude and Heading Reference System: Filter Design and Experimental Evaluation. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010)*. Anchorage, USA: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010. p. 2624–2629.
- [57] ABDEL-HAFEZ, M. F. The Autocovariance Least-Squares Technique for GPS Measurement Noise Estimation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 59, n. 2, p. 574–588, feb. 2010.

- [58] MARTINELLI, A.; PONT, F.; SIEGWART, R. Multi-Robot Localization Using Relative Observations. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2005)*. Barcelona, Spain: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005. p. 2797–2802.
- [59] MADHAVAN, R.; FREGENE, K.; PARKER, L. E. Distributed heterogeneous outdoor multi-robot localization. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002)*. Washington D.C., USA: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002. v. 1, p. 374–381.
- [60] JO, K.-H.; LEE, J. Multi-robot Cooperative Localization with Optimally Fused Information of Odometer and GPS. In: *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS'07)*. Seoul, Korea: International Conference on Control, Automation and Systems, 2007. p. 601–605.
- [61] JO, K.-H.; LEE, J.; KIM, J.-B. Cooperative Multi-Robot Localization using Differential Position Data. In: *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'07)*. Zurich, Switzerland: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2007. p. 1–6.
- [62] LEE, J.; JO, K.-H.; JANG, C.-S. Cooperative Localization for Multi-Robot Incorporating Proprioceptive/Exteroceptive Position Sensors. In: *The 6th International Conference on Field and Service Robotics (FSR'07)*. Chamonix, France: The 6th International Conference on Field and Service Robotics, 2007. p. 463–471.
- [63] JOO, S. et al. Performance Enhancement for Outdoor Cooperative Localization Considering of Error Correlation between GPS data. In: *2nd International Conference on Robot Communication and Coordination (ROBOCOMM'09)*. Odense, Denmark: 2nd International Conference on Robot Communication and Coordination, 2009. p. 1–6.
- [64] KUIPERS, J. B. *Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality*. Princeton, USA: Princeton University Press, 2002. Paperback.
- [65] SIMON, D. *Optimal state estimation: Kalman, H [infinity] and nonlinear approaches*. New York, USA: Wiley Inter-Science, 2006.
- [66] NovAtel Inc. *OEMV Family Installation and Operation User Manual*. Calgary, Canada. OM-2000009313, Rev. 13.
- [67] NovAtel Inc. *OEMV Family Firmware Reference Manual*. Calgary, Canada. OM-20000094, Rev. 8.
- [68] MEMSense, LLC. *NanoIMU Product Specification User's Guide*. Rapid City, USA. PSD-0822, Rev. D.
- [69] STMicroelectronics. *ST 7805 3-terminal 1A positive voltage regulator*. Geneva, Switzerland. Datasheet.

- [70] STMicroelectronics. *LD1117 series Low drop fixed and adjustable positive voltage regulators*. Geneva, Switzerland. Datasheet.
- [71] SIMPSON, C. *Linear and Switching Voltage Regulator Fundamentals*. Santa Clara, USA. Technical Note.
- [72] Maxim Integrated Products. *MAX481/MAX483/MAX485/MAX487-MAX491/MAX1487 3.0V to 5.5V, Low-Power, up to 1Mbps, True RS-232 Transceivers Using Four 0.1 μ F External Capacitors*. Sunnyvale, USA. Datasheet. 19-0122; Rev 7; 6/03.
- [73] Maxim Integrated Products. *MAX220-MAX249 +5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers*. Sunnyvale, USA. Datasheet. 19-4323; Rev 11; 2/03.
- [74] Maxim Integrated Products. *MAX3222/MAX3232/MAX3237/MAX3241 3.0V to 5.5V, Low-Power, up to 1Mbps, True RS-232 Transceivers Using Four 0.1 μ F External Capacitors*. Sunnyvale, USA. Datasheet. 19-0273; Rev 5; 3/99.
- [75] MARTINS, A. S.; BORGES, G. A. *Introdução ao padrão físico RS-485 para comunicação serial*. Laboratório de Controle e Visão Computacional (LCVC), Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. Technical Note.
- [76] Maxim Integrated Products. *Choosing the Right RS-232 Transceiver*. Sunnyvale, USA. Application Note AN-2020.
- [77] BUTENHOF, D. R. *Programming with POSIX Threads*. Boston, USA: Addison-Wesley, 1997. (Professional Computing Series).
- [78] JAZWINSKI, A. H. *Stochastic Processes and Filtering Theory*. New York, USA: Academic Press, 1970.
- [79] DIEBEL, J. *Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors*. Stanford University, Palo Alto, USA, 2006.

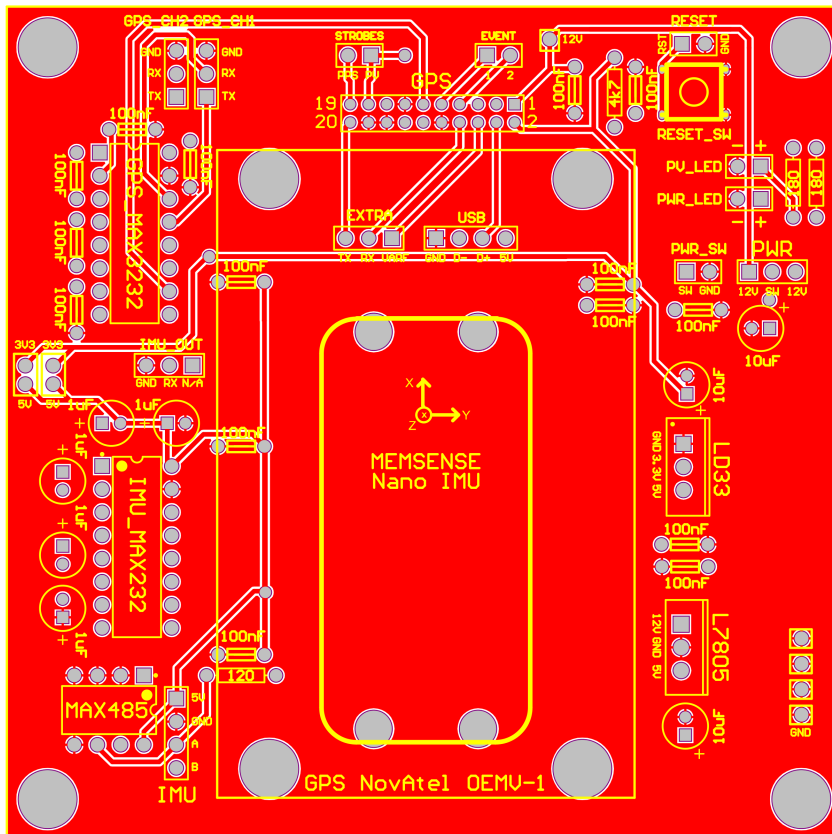
ANEXOS

I. DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS

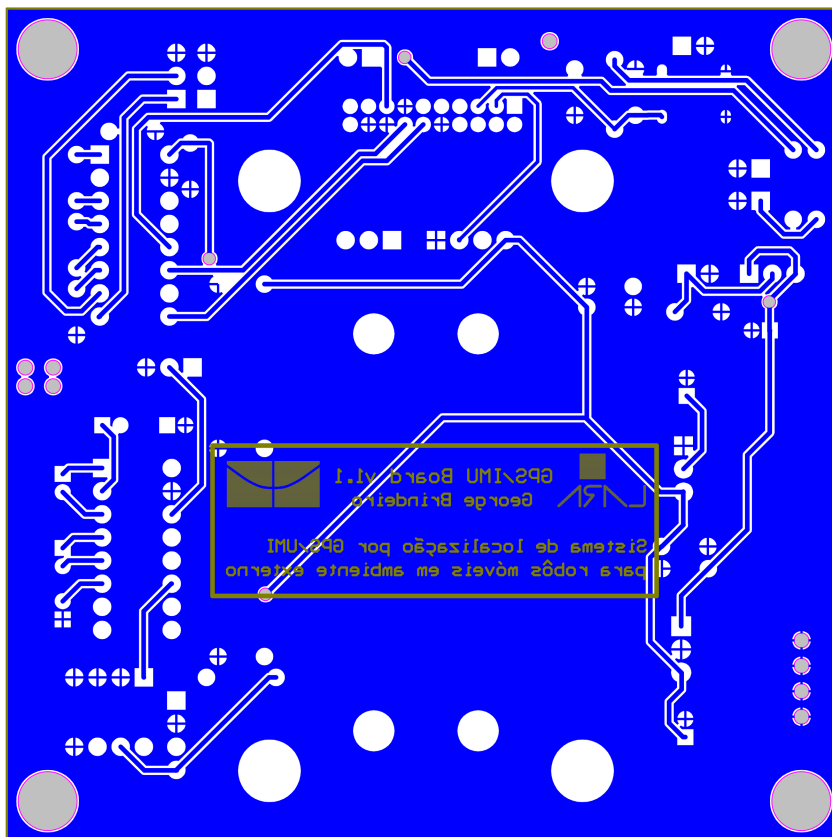


Title			
Size	Number	Revision	Rev/A2
A3	v1.1		
Date:	10/02/2011	Sheet of	8
File:	C:\Users\...schematic\SchDoc	Drawn By:	George Andrew Rimando

Figura I.1: Esquemático da placa de interface do módulo sensorial GPS/UMI



(a) Face superior



(b) Face inferior

Figura I.2: Placa de interface do módulo sensorial GPS/UMI

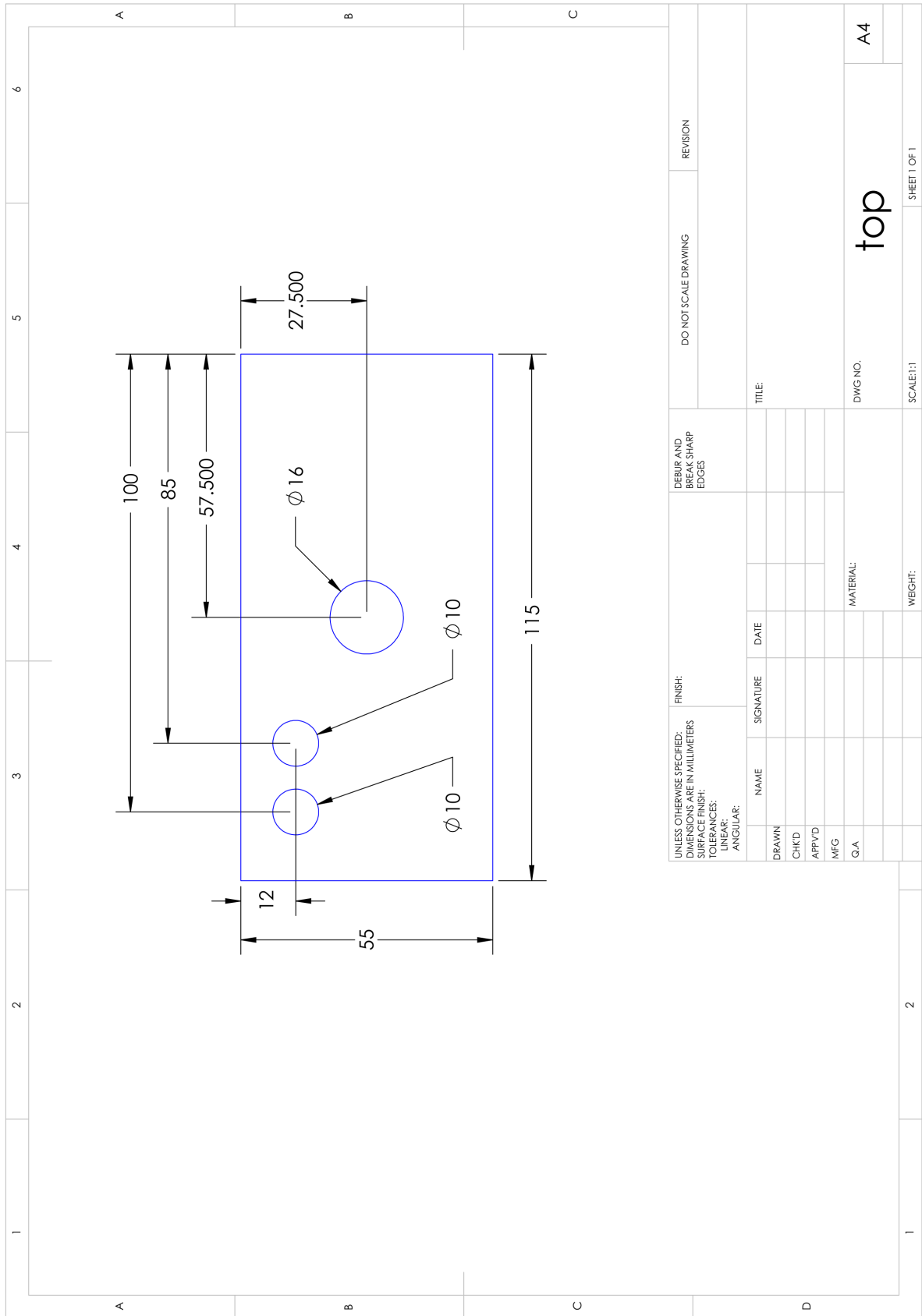


Figura I.3: Face superior do gabinete do módulo sensorial GPS/UMI

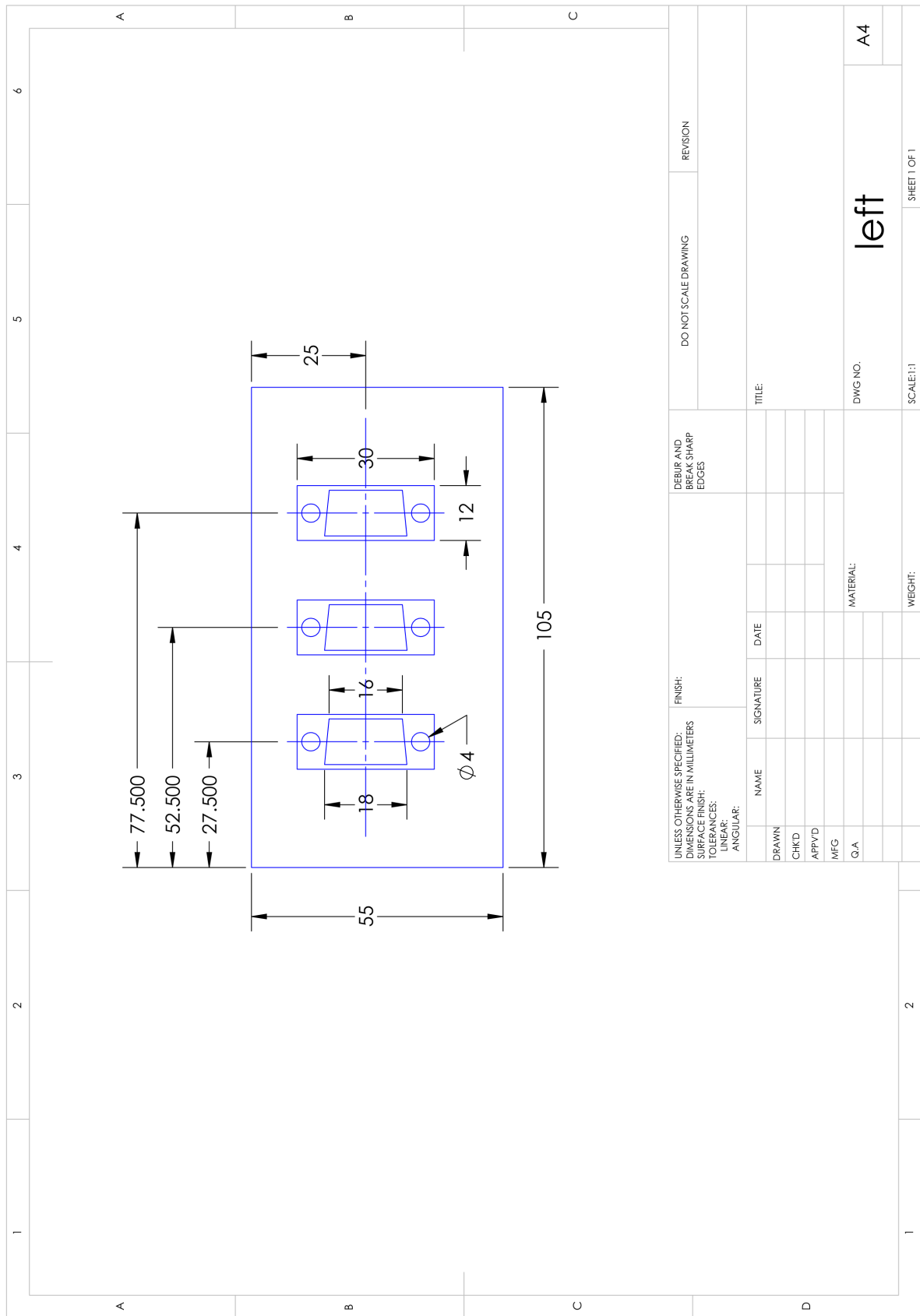


Figura I.4: Face lateral esquerda do gabinete do módulo sensorial GPS/UMI

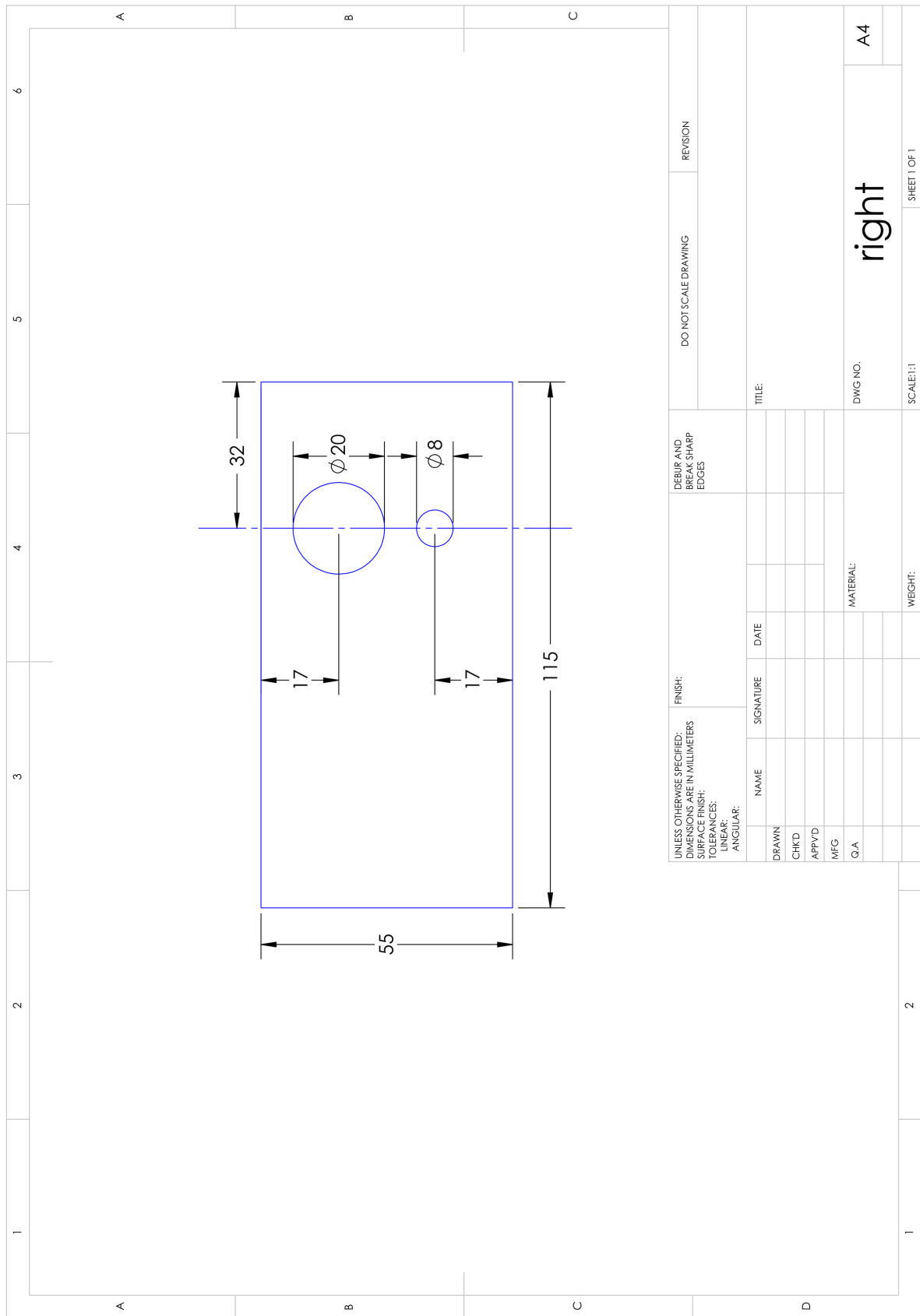


Figura I.5: Face lateral direita do gabinete do módulo sensorial GPS/UMI

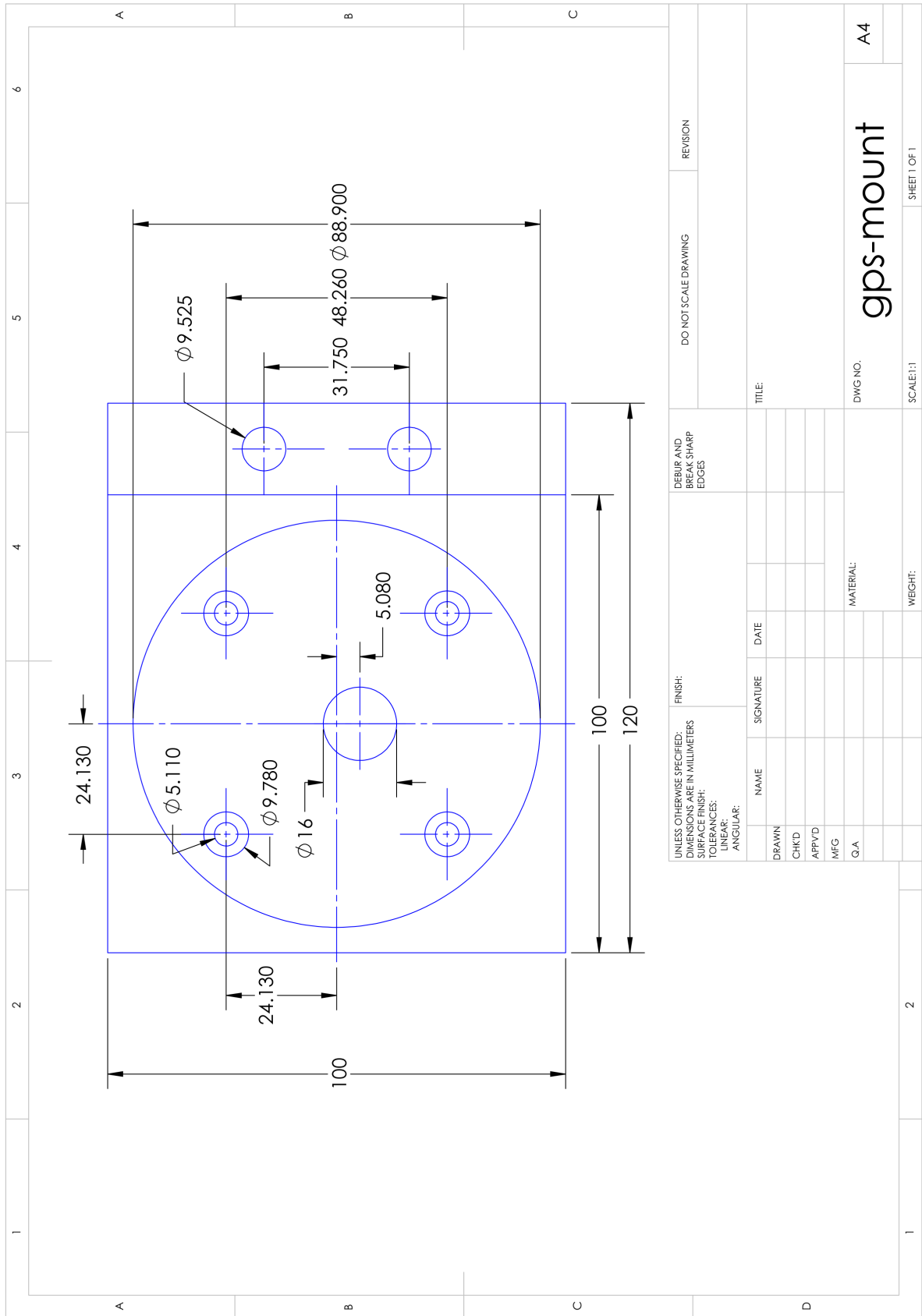


Figura I.6: Base de fixação da antena do GPS

II. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO DVD

No disco DVD entregue com o trabalho é disponibilizada uma cópia digital do relatório, bem como uma pasta com todos arquivos utilizados em sua elaboração. Os arquivos do trabalho contém um arquivo README em cada pasta principal, e são organizados conforme a lista abaixo:

- **Altium** contém os arquivos relativos ao projeto eletrônico no *Altium Designer Winter 10*.
- **Apresentações** contém algumas apresentações preparadas no contexto deste trabalho.
- **Backup** contém cópias de segurança da pasta **programming**.
- **Bibliografia** contém cópias digitais dos documentos referenciados neste trabalho, sempre que disponíveis, organizadas conforme a numeração das referências bibliográficas, bem como outros documentos não utilizados no relatório.
- **CAD** contém os arquivos relativos ao projeto mecânico no *SolidWorks Professional 2010*.
- **Dados** contém alguns conjuntos de dados colhidos com o módulo GPS/UMI, organizados por data e horário. Para sua leitura, utiliza-se o script **programming/matlab/demo.m**.
- **Datasheets** contém as referências técnicas dos componentes e sensores do módulo GPS/UMI.
- **Drivers** contém o driver para o conversor USB-Serial utilizado nos experimentos.
- **Figuras** contém as fotos, desenhos vetorizados e gráficos obtidos para o relatório.
- **Notas Técnicas** contém notas técnicas consultadas neste trabalho.
- **programming** contém o código-fonte do *software* desenvolvido neste trabalho.
- **Relatório** contém os arquivos-fonte em LaTeX do relatório, pronto para utilização no editor Kile (TeX Live 2009/Debian) no sistema operacional Ubuntu 10.04.
- **Software LARA** contém *software* desenvolvido em trabalhos anteriores do LARA.
- **Software MATLAB central** contém *software* obtido no portal MATLAB central, utilizado para a confecção do relatório.
- **Software Proprietário** contém *software* proprietário da NovAtel e MEMSense para leitura dos dados dos seus sensores no sistema operacional Windows.
- **Template Mecatrônica** contém os arquivos obtidos com a coordenação do curso para adequação do relatório ao padrão.

III. FILTROS DE KALMAN

Este anexo tem como objetivo descrever o algoritmo de fusão sensorial utilizado neste trabalho. Como ponto de partida apresenta-se o filtro de Kalman, que é o filtro ótimo para estimação de estados em sistemas lineares. Em seguida, discute-se sua aplicação em sistemas não-lineares através do filtro de Kalman estendido (FKE), que se baseia na linearização de primeira ordem das equações que descrevem o modelo do sistema. Por fim, generaliza-se o FKE para sistemas em que a hipótese de decorrelação entre ruído de processo e ruído de medição não é satisfeita, resultando no chamado filtro de Kalman estendido correlato (FKEC).

Não é objetivo deste anexo realizar o desenvolvimento completo das equações destes filtros, mas contextualizar sua utilização neste trabalho e apresentar suas equações conforme a notação adotada neste manuscrito. Para maiores detalhes sobre diferentes formas do filtro de Kalman, recomenda-se a leitura dos livros *Optimal State Estimation: Kalman, H_∞ , and Nonlinear Approaches* de Dan Simon [65] e *Stochastic Processes and Filtering Theory* de Andrew Jazwinski [78].

III.1 Filtro de Kalman

O filtro de Kalman é um estimador recursivo cujo objetivo é fornecer a estimativa de mínima variância para o estado de um sistema dinâmico linear estocástico, cuja evolução segue um modelo incerto, a partir de medições ruidosas. Um modelo em tempo discreto para este tipo de sistema é dado pela equação III.1a, denominada modelo de processo, e pela equação III.1b, denominada modelo de medição. É preciso ressaltar que esta formulação não se restringe a sistemas invariantes no tempo, o que é visto pela presença de índices temporais nas matrizes \mathbf{F} , \mathbf{G} , e \mathbf{H}_x .

Modelo linear

$$\mathbf{x}_{(k)} = \mathbf{F}_{(k-1)}\mathbf{x}_{(k-1)} + \mathbf{G}_{(k)}\mathbf{u}_{(k)} + \mathbf{w}_{((k))} \quad (\text{III.1a})$$

$$\mathbf{y}_{(k)} = \mathbf{H}_{x(k)}\mathbf{x}_{(k)} + \mathbf{v}_{(k)} \quad (\text{III.1b})$$

Os vetores \mathbf{x} , \mathbf{u} e \mathbf{y} são denominados vetor de estados, vetor de controle e vetor de medição. Os termos \mathbf{w} e \mathbf{v} são variáveis aleatórias decorrelacionadas representando ruído branco de média nula com matrizes de covariância \mathbf{Q} e \mathbf{R} e são denominados ruído de processo e ruído de medição. Nesta derivação supõe-se que estas variáveis aleatórias têm distribuição gaussiana, conforme as equações III.2a e III.2b, embora o filtro de Kalman também se aplique a outros tipos de ruído. A função delta de Kronecker $\delta_{(k-j)}$, definida na equação III.2f, é utilizada nas equações III.2c e III.2d para ressaltar que as realizações dos ruídos são independentes entre instantes de amostragem. Por fim, a equação III.2e ressalta que \mathbf{w} e \mathbf{v} são variáveis aleatórias decorrelacionadas.

Sendo um estimador recursivo, é preciso fornecer uma estimativa inicial $\mathbf{x}_{(0)} \sim \mathcal{N}(\hat{\mathbf{x}}_{(0)}, \hat{\mathbf{P}}_{(0)})$ para o filtro de Kalman. Esta estimativa é atualizada sempre que informações sobre a evolução do processo ou medições estão disponíveis, nas chamadas etapas de predição e correção. Na

etapa de predição obtém-se uma estimativa a priori do estado do sistema, utilizando-se o modelo de processo na ausência de uma observação atual. Em geral considera-se que estas etapas ocorrem de forma alternada, porém na ausência de medições é possível atualizar a estimativa de estado continuamente por predição, embora isto leve ao aumento da incerteza do sistema. Outro detalhe importante é que nem sempre todas as medidas do vetor de medição estão disponíveis simultaneamente, o que leva à necessidade de se redefinir a matriz $\mathbf{H}_{x(k)}$ de acordo.

Variáveis aleatórias

$$\mathbf{w}_{(k)} \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{Q}_{(k)}) \quad (\text{III.2a})$$

$$\mathbf{v}_{(k)} \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{R}_{(k)}) \quad (\text{III.2b})$$

$$E \left[\mathbf{w}_{(k)} \mathbf{w}_{(j)}^T \right] = \mathbf{Q}_{(k)} \delta_{(k-j)} \quad (\text{III.2c})$$

$$E \left[\mathbf{v}_{(k)} \mathbf{v}_{(j)}^T \right] = \mathbf{R}_{(k)} \delta_{(k-j)} \quad (\text{III.2d})$$

$$E \left[\mathbf{v}_{(k)} \mathbf{w}_{(j)}^T \right] = 0 \quad (\text{III.2e})$$

$$\delta_{(k-j)} = \begin{cases} 1 & \text{se } k = j \\ 0 & \text{se } k \neq j \end{cases} \quad (\text{III.2f})$$

Na etapa de correção, por outro lado, obtém-se a estimativa a posteriori do estado do sistema, em que a observação mais recente é utilizada para corrigir desvios decorrentes da incerteza do processo. As equações III.3 e III.4, correspondentes às etapas de predição e correção do filtro de Kalman, são apresentadas sem prova, mas o leitor é encorajado a verificá-las nas referências sugeridas para melhor entendimento de sua derivação e propriedades do filtro de Kalman.

Etapa de predição

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} = \mathbf{F}_{(k-1)} \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} + \mathbf{G}_{(k)} \mathbf{u}_{(k)} \quad (\text{III.3a})$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} = \mathbf{F}_{(k-1)} \hat{\mathbf{P}}_{(k-1)} \mathbf{F}_{(k-1)}^T + \mathbf{Q}_{(k)} \quad (\text{III.3b})$$

Etapa de correção

$$\mathbf{K}_{(k)} = \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_{x(k)}^T \left(\mathbf{H}_{x(k)} \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_{x(k)}^T + \mathbf{R}_{(k)} \right)^{-1} \quad (\text{III.4a})$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k)} = \hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} + \mathbf{K}_{(k)} \left(\mathbf{y}_{(k)} - \mathbf{H}_{x(k)} \hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} \right) \quad (\text{III.4b})$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{(k)} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{H}_{x(k)} \right) \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{H}_{x(k)} \right)^T + \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{R}_{(k)} \mathbf{K}_{(k)}^T \quad (\text{III.4c})$$

III.2 Filtro de Kalman Estendido

O filtro de Kalman tem sua formulação fundamentada na premissa de que as medições são funções lineares do estado do sistema, e que o próprio estado evolui conforme uma relação linear. Infelizmente no mundo real esta premissa não é satisfeita, porém é possível se lançar mão de determinados artifícios para adequação do sistema à premissa de linearidade. Uma das formas mais simples de se fazer isto é através da linearização de primeira ordem do modelo do sistema, através de uma série de Taylor truncada (também conhecida como polinômio de Taylor de primeira ordem). Esta formulação é conhecida na literatura como filtro de Kalman Estendido.

Modelo não-linear

$$\mathbf{x}_{(k)} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{(k-1)}, \mathbf{u}_{(k)}) + \mathbf{w}_{(k)} \quad (\text{III.5a})$$

$$\mathbf{y}_{(k)} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}) + \mathbf{v}_{(k)} \quad (\text{III.5b})$$

Linearização do Modelo

$$\mathbf{x}_{(k)} \approx \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}, \mathbf{u}_{(k)}) + \mathbf{F}_x (\mathbf{x}_{(k-1)} - \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}) + \mathbf{F}_u \mathbf{u}_{(k)} + \mathbf{w}_{(k)} \quad (\text{III.6a})$$

$$\mathbf{y}_{(k)} \approx \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{(k)}) + \mathbf{H}_x (\mathbf{x}_{(k-1)} - \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}) + \mathbf{v}_{(k)} \quad (\text{III.6b})$$

$$\mathbf{F}_x = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}_{(k-1)}, \mathbf{u}_{(k)})}{\partial \mathbf{x}_{(k-1)}} \quad (\text{III.6c})$$

$$\mathbf{F}_u = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}_{(k-1)}, \mathbf{u}_{(k)})}{\partial \mathbf{u}_{(k)}} \quad (\text{III.6d})$$

$$\mathbf{H}_x = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)})}{\partial \mathbf{x}_{(k)}} \quad (\text{III.6e})$$

Etapa de predição

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} = \mathbf{F}_x \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} + \mathbf{F}_u \mathbf{u}_{(k)} \quad (\text{III.7a})$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} = \mathbf{F}_x \hat{\mathbf{P}}_{(k-1)} \mathbf{F}_x^T + \mathbf{Q}_{(k)} \quad (\text{III.7b})$$

Etapa de correção

$$\mathbf{K}_{(k)} = \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_{x(k)}^T \left(\mathbf{H}_{x(k)} \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_{x(k)}^T + \mathbf{R}_{(k)} \right)^{-1} \quad (\text{III.8a})$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k)} = \hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} + \mathbf{K}_{(k)} \left(\mathbf{y}_{(k)} - \mathbf{H}_{x(k)} \hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} \right) \quad (\text{III.8b})$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{(k)} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{H}_{x(k)} \right) \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{H}_{x(k)} \right)^T + \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{R}_{(k)} \mathbf{K}_{(k)}^T \quad (\text{III.8c})$$

III.3 Filtro de Kalman Estendido Correlato

Outra premissa do filtro de Kalman em sua formulação tradicional é a decorrelação entre o ruído de processo e o ruído de medição. Quando esta condição não é satisfeita¹, é preciso reformular o filtro que a correlação entre as variáveis aleatórias seja contabilizada. Esta formulação, quando associada à linearização de primeira ordem do modelo do sistema apresentada na seção anterior, é conhecida na literatura como filtro de Kalman Estendido Correlato.

Apesar de sempre ser possível ajustar as matrizes de covariância do FKE para que as estimativas permaneçam no intervalo de confiança 3σ , a utilização do FKEC confere melhores propriedades estatísticas para as estimativas, resultando em um filtro menos conservador em que as matrizes de covariância estimadas dão uma melhor idéia da incerteza associada [9].

Modelo não-linear

$$\mathbf{x}_{(k)} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{(k-1)}, \mathbf{u}_{(k)}) + \tilde{\mathbf{w}}_{(k)} \quad (\text{III.9a})$$

$$\mathbf{y}_{(k)} = \mathbf{g}(\mathbf{u}_{(k)}, \mathbf{m}_{(k)}) = \mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}) + \tilde{\mathbf{v}}_{(k)} \quad (\text{III.9b})$$

$$(\text{III.9c})$$

Variáveis aleatórias

$$\tilde{\mathbf{w}}_{(k)} = \mathbf{F}_u \mathbf{u}_{(k)} + \mathbf{w}_{(k)} \quad (\text{III.10a})$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_{(k)} = \mathbf{v}_{(k)} - \mathbf{G}_u \eta_u - \mathbf{G}_m \eta_m \quad (\text{III.10b})$$

$$E[\tilde{\mathbf{w}}_{(k)}] = \mathbf{0} \quad (\text{III.10c})$$

$$E[\tilde{\mathbf{v}}_{(k)}] = \mathbf{0} \quad (\text{III.10d})$$

$$E\left[\begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{w}}_{(k)} \\ \tilde{\mathbf{v}}_{(k)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{w}}_{(k)}^T & \tilde{\mathbf{v}}_{(k)}^T \end{pmatrix}\right] = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{Q}}_{(k)} & \tilde{\mathbf{S}}_{(k)} \\ \tilde{\mathbf{S}}_{(k)}^T & \tilde{\mathbf{R}}_{(k)} \end{pmatrix} \quad (\text{III.10e})$$

Linearização do Modelo

$$\mathbf{x}_{(k)} \approx \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}, \mathbf{u}_{(k)}) + \mathbf{F}_x (\mathbf{x}_{(k-1)} - \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}) + \mathbf{F}_u \mathbf{u}_{(k)} + \mathbf{w}_{(k)} \quad (\text{III.11a})$$

$$\mathbf{y}_{(k)} \approx \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{(k)}) + \mathbf{H}_x (\mathbf{x}_{(k-1)} - \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}) + \mathbf{v}_{(k)} \quad (\text{III.11b})$$

¹Neste trabalho, o ruído de processo e de medição são considerados correlacionados pois a medida do acelerômetro é utilizada tanto na predição da velocidade do robô, quando na correção de sua atitude por meio do algoritmo TRIAD. Utiliza-se a notação $\mathbf{g}(\mathbf{u}_{(k)}, \mathbf{m}_{(k)})$ para ressaltar a dependência da medição convertida com o vetor de controle \mathbf{u} , que contém a medição do acelerômetro, e a medição do magnetômetro $\mathbf{m}_{(k)}$.

$$\mathbf{F}_x = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}_{(k-1)}, \mathbf{u}_{(k)})}{\partial \mathbf{x}_{(k-1)}} \quad (\text{III.11c})$$

$$\mathbf{F}_u = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}_{(k-1)}, \mathbf{u}_{(k)})}{\partial \mathbf{u}_{(k)}} \quad (\text{III.11d})$$

$$\mathbf{H}_x = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)})}{\partial \mathbf{x}_{(k)}} \quad (\text{III.11e})$$

$$\mathbf{G}_m = \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{u}_{(k)}, \mathbf{m}_{(k)})}{\partial \mathbf{m}_{(k)}} \quad (\text{III.11f})$$

$$\mathbf{G}_u = \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{u}_{(k)}, \mathbf{m}_{(k)})}{\partial \mathbf{u}_{(k)}} \quad (\text{III.11g})$$

Etapa de predição

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} = \mathbf{F}_x \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} + \mathbf{F}_u \mathbf{u}_{(k)} \quad (\text{III.12a})$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} = \mathbf{F}_x \hat{\mathbf{P}}_{(k-1)} \mathbf{F}_x^T + \tilde{\mathbf{Q}}_{(k)} \quad (\text{III.12b})$$

Etapa de correção

$$\mathbf{K}_{(k)} = \left(\hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_x^T + \tilde{\mathbf{S}}_{(k)} \right) \left(\mathbf{H}_x \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_x^T + \mathbf{H}_x \tilde{\mathbf{S}}_{(k)} + \tilde{\mathbf{S}}_{(k)}^T \mathbf{H}_x^T + \tilde{\mathbf{R}}_{(k)} \right)^{-1} \quad (\text{III.13a})$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k)} = \hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} + \mathbf{K}_{(k)} \left(\mathbf{y}_{(k)} - \mathbf{H}_{x(k)} \hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)} \right) \quad (\text{III.13b})$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{(k)} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{H}_{x(k)} \right) \hat{\mathbf{P}}_{(k|k-1)} \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{H}_{x(k)} \right)^T + \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{R}_{(k)} \mathbf{K}_{(k)}^T \quad (\text{III.13c})$$

IV. QUATÉRNIOS

Este anexo tem como objetivo descrever de forma simplificada a utilização de quatérnios para representação de atitude e sequências de rotações. Apresenta-se algumas propriedades básicas de quatérnios, bem como as equações de conversão entre as diferentes formas de representação: ângulos de Euler, matriz de rotação e quatérnios. Para maiores detalhes sobre diferentes formas de representação e suas derivações, recomenda-se a leitura do livro *Quaternions and Rotation Sequences* de Jack B. Kuipers [64] e do texto não publicado *Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors* de James Diebel [79], disponibilizado no CD.

IV.1 Definição de quatérnios

Quatérnios, conforme definidos por Sir William Rowan Hamilton em 1843, são uma extensão do conjunto dos números complexos em que a parte complexa contém três elementos imaginários. Equivalentemente, pode-se dizer que um quatérnio é um número hipercomplexo de rank 4. Apesar de sua origem ter partido pura e simplesmente da curiosidade de matemáticos interessados em generalizar o conceito de números complexos e estudar suas propriedades, descobriu-se ao longo dos anos que este conjunto apresenta propriedades que o torna atrativo para a representação de sequências de rotações em \mathbb{R}^3 . Algumas vantagens de quatérnios incluem:

- Não possuem **singularidades** como ângulos de Euler
- Representação mais **compacta** que matrizes de rotação
- Menor **custo computacional** na propagação de atitude

Uma representação compacta de um quatérnio é apresentada na equação IV.1. Embora seja semelhante à notação adequada para vetores-coluna, é preciso ressaltar nem todas propriedades de vetores valem para quatérnios. As relações básicas entre as unidades imaginárias **i**, **j** e **k** de quatérnios são apresentadas no conjunto de equações IV.2.

$$\mathbf{q} = q_0 + q_1\mathbf{i} + q_2\mathbf{j} + q_3\mathbf{k} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}, \quad (\text{IV.1})$$

$$\mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{ijk} = -1 \quad (\text{IV.2a})$$

$$\mathbf{ij} = \mathbf{k} = -\mathbf{ji} \quad (\text{IV.2b})$$

$$\mathbf{jk} = \mathbf{i} = -\mathbf{kj} \quad (\text{IV.2c})$$

$$\mathbf{ki} = \mathbf{j} = -\mathbf{ik} \quad (\text{IV.2d})$$

IV.2 Propriedades de quatérnios

Soma de quatérnios

$$\mathbf{q} + \mathbf{p} = \begin{bmatrix} q_0 + p_0 \\ q_1 + p_1 \\ q_2 + p_2 \\ q_3 + p_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

Multiplicação por escalar

$$k\mathbf{q} = \begin{bmatrix} kq_0 \\ kq_1 \\ kq_2 \\ kq_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.4})$$

Produto de quatérnios

$$\begin{aligned} \mathbf{q} \otimes \mathbf{p} &= p_0q_0 - \mathbf{q}_{1:3} \cdot \mathbf{p}_{1:3} + q_0\mathbf{p}_{1:3} + p_0\mathbf{q}_{1:3} + \mathbf{q}_{1:3} \times \mathbf{p}_{1:3} \\ &= \begin{bmatrix} q_1p_1 - q_2p_2 - q_3p_3 - q_4p_4 \\ q_1p_2 + q_2p_1 + q_3p_4 - q_4p_3 \\ q_1p_3 - q_2p_4 + q_3p_1 + q_4p_2 \\ q_1p_4 + q_2p_3 - q_3p_2 + q_4p_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{IV.5})$$

Conjugado

$$\mathbf{q}^* = \begin{bmatrix} q_0 \\ -q_1 \\ -q_2 \\ -q_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.6})$$

Norma

$$\|\mathbf{q}\| = \sqrt{\mathbf{q} \otimes \mathbf{q}^*} = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} \quad (\text{IV.7})$$

Inversão

$$\mathbf{q}^{-1} = \frac{\mathbf{q}^*}{\|\mathbf{q}\|} \quad (\text{IV.8})$$

Representação Matricial

$$Q(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & q_3 & -q_2 \\ q_2 & -q_3 & q_0 & q_1 \\ q_3 & q_2 & -q_1 & q_0 \end{bmatrix} = \bar{Q}(\mathbf{q})^T \quad (\text{IV.9})$$

IV.3 Representação de atitude com quatérnios

Quatérnios unitários, em que $\|\mathbf{q}\| = 1$, podem ser utilizados para representar a atitude de um corpo rígido. Isto é feito considerando-se que a determinação da atitude de um corpo é um problema análogo à obtenção de uma representação da rotação do sistema de coordenadas de referência para um sistema de coordenadas fixado ao corpo. No contexto deste trabalho, o sistema de coordenadas referência é denominado Sistema N e o sistema de coordenadas fixado ao corpo é denominado Sistema B , conforme explicado no capítulo 2.

IV.4 Sequências de rotações com quatérnios

A relação básica para a utilização de quatérnios para rotação de um vetor $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^3$ no sistema de coordenadas global, e seu correspondente $\mathbf{z}' \in \mathbb{R}^3$ em um referencial fixo ao corpo, é dada pela equação IV.10, em que os vetores compõem um quatérnio de parte real nula.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{z}' \end{bmatrix} = \mathbf{q} \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{q}^* \quad (\text{IV.10})$$

Sequências de rotações podem ser representadas utilizando quatérnios da mesma forma que é feito com representações baseadas em matrizes de rotação, isto é, através do produto de quatérnios representando as rotações consecutivas, conforme a equação IV.11.

$$\mathbf{q}_{(n)} = \mathbf{q}_{(0)} \otimes \mathbf{q}_{(1)}^{(0)} \otimes \mathbf{q}_{(2)}^{(1)} \otimes \cdots \otimes \mathbf{q}_{(n-1)}^{(n-2)} \otimes \mathbf{q}_{(n)}^{(n-1)} \quad (\text{IV.11})$$

IV.5 Propagação de atitude com quatérnios

A propagação de atitude com quatérnios [12] é dada pela equação IV.12. Esta relação pode ser representada de forma matricial conforme a equação IV.13, cuja solução numérica em tempo discreto é dada pela equação IV.14. A expansão dos termos apresentados nas referidas equações é apresentada no conjunto de equações IV.15.

$$\dot{\mathbf{q}}_n^b = -\frac{1}{2}\mathbf{q}_n^b \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{\omega}_{ib}^b \end{bmatrix} \quad (\text{IV.12})$$

$$\dot{\mathbf{q}}_n^b = -\frac{1}{2}\mathbf{W}\mathbf{q}_n^b \quad (\text{IV.13})$$

$$\mathbf{q}_{n(k)}^b = e^{-\mathbf{W}\Delta t}\mathbf{q}_{n(k-1)}^b \quad (\text{IV.14})$$

$$e^{-\mathbf{W}\Delta t} = \begin{bmatrix} \cos(d/2) & -\delta_x \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & -\delta_y \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & -\delta_z \frac{\text{sen}(d/2)}{d} \\ \delta_x \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & \cos(d/2) & \delta_z \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & -\delta_y \frac{\text{sen}(d/2)}{d} \\ \delta_y \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & -\delta_z \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & \cos(d/2) & \delta_x \frac{\text{sen}(d/2)}{d} \\ \delta_z \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & \delta_y \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & -\delta_x \frac{\text{sen}(d/2)}{d} & \cos(d/2) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.15a})$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ -\omega_x & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ -\omega_y & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_z & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.15b})$$

$$\delta_i = \omega_i \Delta t \quad (\text{IV.15c})$$

$$d = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2} \quad (\text{IV.15d})$$

IV.6 Conversão entre representações

Esta seção visa apresentar as equações para conversão entre representações baseadas em quatérnios e outras representações de interesse para este trabalho, especificamente matrizes de rotação e ângulos de Euler, sem que seja feita derivação matemática destas relações.

As matrizes de rotação referidas neste trabalho se restringem a matrizes de cossenos diretores, embora as equações de conversão sirvam para o caso geral. Ângulos de Euler são representados conforme a convenção de rotação Z-Y-X, com ângulos de rotação ψ , θ e ϕ respectivamente. Ambas representações estão explicitadas na equação IV.16.

$$\mathbf{C}_n^b = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \quad \mathbf{e}_n^b = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (\text{IV.16})$$

IV.6.1 Ângulos de Euler \Rightarrow Matriz de Rotação

$$\mathbf{C}_n^b(\mathbf{e}_n^b) = \begin{bmatrix} \cos(\theta)\cos(\psi) & -\cos(\phi)\sin(\psi) + \sin(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) & \sin(\phi)\sin(\psi) + \cos(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) \\ \cos(\theta)\sin(\psi) & \cos(\phi)\cos(\psi) + \sin(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) & -\sin(\phi)\cos(\psi) + \cos(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) \\ -\sin(\theta) & \sin(\phi)\cos(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.17})$$

IV.6.2 Ângulos de Euler \Rightarrow Quatérnio unitário

$$\mathbf{q}_n^b(\mathbf{e}_n^b) = \begin{bmatrix} \cos(\phi/2)\cos(\theta/2)\cos(\psi/2) - \sin(\phi/2)\sin(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \cos(\phi/2)\cos(\theta/2)\sin(\psi/2) + \sin(\phi/2)\sin(\theta/2)\cos(\psi/2) \\ \cos(\phi/2)\sin(\theta/2)\cos(\psi/2) - \sin(\phi/2)\cos(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \cos(\phi/2)\sin(\theta/2)\sin(\psi/2) + \sin(\phi/2)\cos(\theta/2)\cos(\psi/2) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.18})$$

IV.6.3 Matriz de Rotação \Rightarrow Ângulos de Euler

$$\mathbf{e}_n^b(\mathbf{C}_n^b) = \begin{bmatrix} \text{atan2}(-c_{21}, c_{11}) \\ \text{asen}(c_{31}) \\ \text{atan2}(-c_{32}, c_{33}) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.19})$$

IV.6.4 Matriz de rotação \Rightarrow Quatérnio unitário

$$\mathbf{q}_n^b(\mathbf{C}_n^b) = \begin{cases} \mathbf{q}_{n0}^b(\mathbf{C}_n^b) & \text{se } c_{22} > -c_{33}, c_{11} > -c_{22}, c_{11} > -c_{33} \\ \mathbf{q}_{n1}^b(\mathbf{C}_n^b) & \text{se } c_{22} < -c_{33}, c_{11} > -c_{22}, c_{11} > -c_{33} \\ \mathbf{q}_{n2}^b(\mathbf{C}_n^b) & \text{se } c_{22} > -c_{33}, c_{11} < -c_{22}, c_{11} < -c_{33} \\ \mathbf{q}_{n3}^b(\mathbf{C}_n^b) & \text{se } c_{22} < -c_{33}, c_{11} < -c_{22}, c_{11} < -c_{33} \end{cases} \quad (\text{IV.20})$$

$$\mathbf{q}_{n0}^b(\mathbf{C}_n^b) = \begin{bmatrix} (1 + c_{11} + c_{22} + c_{33})^{\frac{1}{2}} \\ (c_{23} - c_{32})/(1 + c_{11} + c_{22} + c_{33})^{\frac{1}{2}} \\ (c_{31} - c_{13})/(1 + c_{11} + c_{22} + c_{33})^{\frac{1}{2}} \\ (c_{12} - c_{21})/(1 + c_{11} + c_{22} + c_{33})^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.21a})$$

$$\mathbf{q}_{n1}^b(\mathbf{C}_n^b) = \begin{bmatrix} (c_{23} - c_{32})/(1 + c_{11} - c_{22} - c_{33})^{\frac{1}{2}} \\ (1 + c_{11} - c_{22} - c_{33})^{\frac{1}{2}} \\ (c_{12} + c_{21})/(1 + c_{11} - c_{22} - c_{33})^{\frac{1}{2}} \\ (c_{31} + c_{13})/(1 + c_{11} - c_{22} - c_{33})^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.21b})$$

$$\mathbf{q}_{n2}^b(\mathbf{C}_n^b) = \begin{bmatrix} (c_{31} - c_{13})/(1 - c_{11} + c_{22} - c_{33})^{\frac{1}{2}} \\ (c_{12} + c_{21})/(1 - c_{11} + c_{22} - c_{33})^{\frac{1}{2}} \\ (1 - c_{11} + c_{22} - c_{33})^{\frac{1}{2}} \\ (c_{23} + c_{32})/(1 - c_{11} + c_{22} - c_{33})^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.21c})$$

$$\mathbf{q}_{n3}^b(\mathbf{C}_n^b) = \begin{bmatrix} (c_{12} - c_{21})/(1 - c_{11} - c_{22} + c_{33})^{\frac{1}{2}} \\ (c_{31} + c_{13})/(1 - c_{11} - c_{22} + c_{33})^{\frac{1}{2}} \\ (c_{23} + c_{32})/(1 - c_{11} - c_{22} + c_{33})^{\frac{1}{2}} \\ (1 - c_{11} - c_{22} + c_{33})^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.21d})$$

IV.6.5 Quatérnio unitário \Rightarrow Ângulos de Euler

$$\mathbf{e}_n^b(\mathbf{q}_n^b) = \begin{bmatrix} \text{atan2}(-2q_1q_2 + 2q_0q_3, q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2) \\ \text{asen}(2q_1q_3 + 2q_0q_2) \\ \text{atan2}(-2q_2q_3 + 2q_0q_1, q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.22})$$

IV.6.6 Quatérnio unitário \Rightarrow Matriz de rotação

$$\mathbf{C}_n^b(\mathbf{q}_n^b) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & 2q_1q_3 - 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 + 2q_0q_2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.23})$$

V. MONTAGEM DO MÓDULO GPS/UMI

Este anexo tem como objetivo descrever as etapas da montagem do módulo sensorial GPS/UMI, de modo a documentar de forma razoável o processo para sua duplicação e uso futuro. Apresenta-se alguns detalhes sobre quatro etapas: soldagem da placa de interface, preparação do gabinete, montagem de estruturas auxiliares e testes. Infelizmente não foi possível documentar o processo detalhadamente, com imagens de todas as etapas, mas espera-se que com as recomendações deste anexo e visualização do primeiro protótipo seja possível realizar uma montagem bem-sucedida.

V.1 Placa de interface

Antes de se iniciar o processo de soldagem da placa de interface do módulo sensorial, é importante que se entenda a função de cada parte do circuito e como os componentes se interconectam. Isto é especialmente importante para que se possa rapidamente entender os problemas que podem surgir durante a montagem, e saná-los antes que comprometam o processo. Para isso, a leitura do capítulo 3 e a análise dos esquemáticos presentes no Anexo I é fundamental. O projeto realizado no programa *Altium Designer 10*[®], presente no CD conforme descrito no Anexo II, pode auxiliar na visualização de conexões específicas da placa de interface, caso seja necessário.

As placas de circuito impresso da versão do módulo sensorial apresentada neste trabalho foram testadas seletivamente na fabricação. É recomendado utilizar, preferencialmente, as placas que foram testadas eletronicamente para evitar possíveis defeitos decorrentes do processo de fabricação difíceis de identificar manualmente, como curto-circuitos entre trilhas e o plano terra. As placas testadas estão marcadas na borda com tinta vermelha. Imagens das placas e botões como chegaram pelo correio do fabricante na China podem ser vistas na Figura V.1. O custo de fabricação deste conjunto de 10 placas de circuito impresso foi de 25 dólares, um preço bem competitivo quando comparado a empresas nacionais que chegam a cobrar cerca de 350 reais por serviço equivalente.



(a)

(b)

Figura V.1: Placa de interface do módulo sensorial GPS/UMI

Caso o responsável pela montagem do módulo não tenha experiência alguma com a soldagem de placas de circuito impresso, recomenda-se a leitura de referências sobre o processo e alguma prática com circuitos simples, para evitar a presença da chamada “solda fria” ou sobreaquecimento de componentes. Enquanto a primeira falha pode levar à desconexão de terminais de componentes de forma difícil de identificar, a segunda pode resultar na perda do componente. Se este já estiver parcial ou totalmente soldado à placa, o problema é ainda maior pois sua substituição é trabalhosa e pode causar danos permanentes à placa de interface¹.

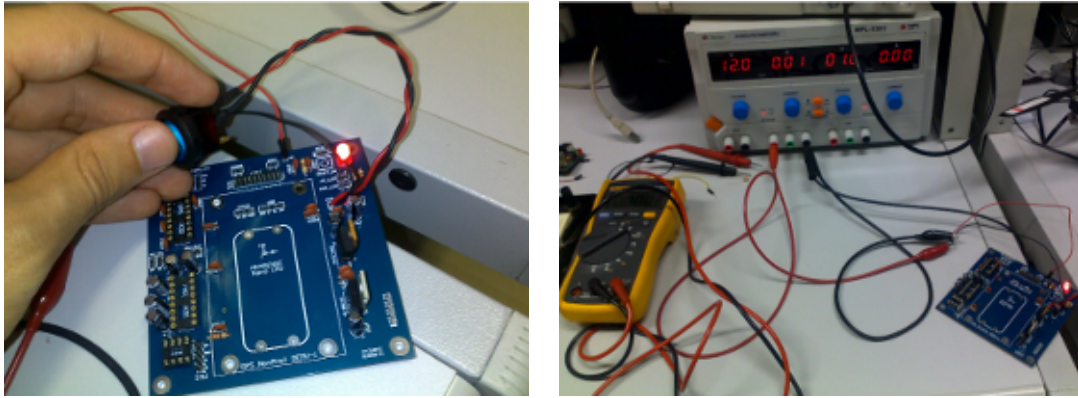
É preciso pensar antecipadamente sobre formas de fixação de diferentes tipos de componentes: enquanto resistores e capacitores podem ter seus terminais dobrados para fixação, soquetes não oferecem a mesma possibilidade e são usualmente fixados com fita isolante ou sustentados pela mão do responsável pela montagem do módulo (o que é bem mais difícil!). A ordem das operações, principalmente em placas de duas camadas em que há componentes em ambas faces é crucial para a execução bem sucedida da montagem de uma placa de circuito impresso, pois determinadas configurações dificultam em muito a associação de componentes sucessores.

A primeira etapa para montagem da placa de interface é a conexão de componentes responsáveis pela alimentação do circuito. Isto possibilita a verificação das tensões de alimentação de todos circuitos integrados antes que sejam incorporados muitos componentes à placa, prevenindo a perda de componentes devido a falhas de fabricação ou montagem. Nesta etapa, recomenda-se:

- **Cuidado com a polaridade dos capacitores eletrolíticos** associados aos reguladores tensão – usualmente o terminal maior é o positivo, cujo furo correspondente está marcado na placa, mas vale a pena conferir se este é o caso com o capacitor usado.
- **Cuidado ao soldar os reguladores de tensão:** estes componentes têm terminais maiores e portanto mais difíceis de esquentar até a temperatura certa para a solda. O aquecimento contínuo de seus terminais, por incapacidade de soldá-los na placa, pode levar ao acionamento do mecanismo de desligamento térmico (*thermal shutdown*) presente na maioria dos reguladores de tensão lineares. Este mecanismo corta a corrente a partir de determinada temperatura, apenas retornando ao pleno funcionamento após resfriamento. Isto não impede que o componente seja danificado permanentemente por sobreaquecimento.
- **Não mexa demais nos reguladores de tensão** pois seus terminais são frágeis e quebram com facilidade, o que pode resultar em falhas durante o funcionamento do módulo sensorial quando usado em terreno irregular, quando este é submetido a alto nível de vibração.

Após a soldagem dos reguladores de tensão e de seu capacitores associados, é possível testar a alimentação da placa. Para isso não é necessário soldar o conector da bateria ou a chave liga-desliga do circuito – embora seja possível fazê-lo neste momento, isto implicará no retrabalho destas conexões quando o circuito for montado no gabinete. Apesar de trivial, este não é um fator usualmente considerado por iniciantes: os conectores e chaves deve passar pelos buracos feitos no gabinete! O conector da bateria, por ser acoplado ao gabinete por dentro e aparafusado por fora, poderia ser conectado neste momento, embora o autor não o recomende.

¹O autor já conseguiu, em sua inabilidade, retirar todo o estanho de ilhas de soldagem, e até esquentar uma trilha o suficiente para ela descolar da placa. Incrível, não? Cuidado para não ser o próximo!



(a)

(b)

Figura V.2: Testes do circuito de alimentação da placa de interface

Recomenda-se, portanto, a ligação de uma fonte de bancada diretamente nos terminais de alimentação 12V e SW, e o uso de fios para curto-circuito dos terminais SW e GND da chave liga-desliga. Há pontos de teste para as tensões de 12V, 5V, 3V3 e GND distribuídos na placa, bastando a utilização de um multímetro para aferir as tensões. Por fim, é desejável conectar-se dissipadores de calor, especialmente no regulador de 5V, para evitar que o gabinete esquente de forma excessiva².

Uma vez testada a seção de alimentação do circuito, é possível então soldar os capacitores e resistores da placa, verificando sempre a polaridade dos capacitores eletrolíticos. Vale lembrar que os capacitores do MAX232 são de $1\mu F$, e não de $1\mu F$ como os associados aos reguladores de tensão, pois são bastante parecidos. Recomenda-se preocupação com a fixação adequada destes componentes, para que fiquem próximos à face da placa e sem folgas. **Atenção:** os LEDs não devem ser soldados à placa, já que ficarão no gabinete conectados à placa por fios.

Em seguida, parte-se para a incorporação dos soquetes dos circuitos integrados da placa. É ideal que se utilize de fita isolante para melhor fixação destes durante o processo de soldagem, conforme recomendação anterior, e que se verifique que todos pinos estão conectados à placa. Isto pode ser feito por meio de um multímetro, na função de teste de continuidade, e é importante já que o processo de soldagem de um soquete com vários pinos é tedioso e sujeito a falhas³.

Neste ponto do processo, é possível fazer o teste da alimentação dos circuitos integrados e das conexões entre eles, fazendo o teste de continuidade com o multímetro diretamente nos pontos dos soquetes. Isso garante que as conexões da placa estão funcionais, e que os componentes serão alimentados conforme especificado em seus respectivos *datasheets*.

Por fim, é preciso fazer a soldagem de pinos e fios de conexão. Os pinos de conexão GPS e IMU são mais simples e podem ser feitos primeiro, lembrando que os pinos do GPS têm o espaçamento não tradicional de 2mm. Basta fixar o número correto de pinos com fita isolante e soldá-los.

Para a conexão dos componentes externos (portas seriais, botão de reset, chave liga-desliga, conector da bateria e LEDs) há duas alternativas: fazer conectores header tipo fêmea que se ligam

²O ponto de conexão do dissipador de calor é conectado ao terminal central dos reguladores de tensão – cuidado para não encostá-los, já que este pino corresponde ao GND no LM7805 e ao 3V3 no LD33V!

³Nunca é demais frisar: os soquetes devem ser soldados sem os componentes, para evitar seu sobreaquecimento.

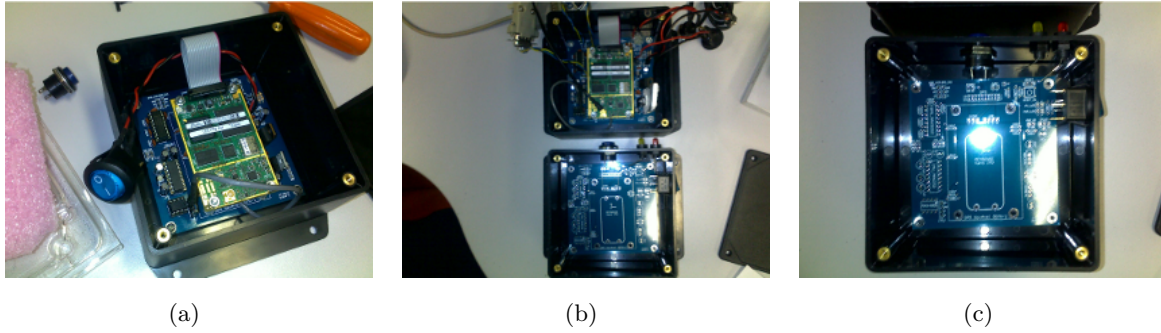


Figura V.3: Verificação da folga de altura e lateral

a pinos de conexão na placa, ou soldar fios de conexão diretamente na placa de circuito impresso. A abordagem adotada no primeiro protótipo foi a segunda, acreditando-se que isso traria maior robustez ao módulo sensorial. Após algum uso, porém, percebeu-se que os fios quebram com facilidade e dificultam o retrabalho de qualquer parte da placa que esteja defeituosa. Uma vez soldados, os fios impedem que se retire a placa do gabinete!

Portanto, recomenda-se que todos componentes externos à placa sejam conectados por meio de conectores header tipo fêmea. A montagem de cabos com estes conectores é mais trabalhosa que soldar os componentes diretamente na placa, porém este trabalho será compensado sempre que surgir a necessidade de alguma manutenção no módulo sensorial⁴. Assim, basta a soldagem de alguns pinos para conexão posterior dos componentes externos quando a placa for montada no gabinete. Pinos são necessários apenas para GPS_CH1, GPS_CH2, IMU_OUT, PV_LED, PWR_LED, PWR e RESET, sendo os demais espaços livres possibilidades de expansões futuras.

V.2 Gabinete do módulo sensorial

O gabinete do módulo sensorial GPS/UMI foi planejado para ter espaço suficiente para a inserção de componentes externos com folga para os sensores e placa de interface, estimando-se a altura da placa após incorporação dos sensores e medindo-se a profundidade dos botões e conectores. Um modelo tridimensional foi feito no *SolidWorks Professional 2010*[®] para auxiliar nesta visualização, que pode ser visto no capítulo 3, que foi posteriormente validada com o gabinete em mãos, conforme visto na Figura V.3. Foram adquiridos gabinetes extras e botões para a montagem de até seis módulos, que devem ficar disponíveis no LARA para uso futuro.

Caso o responsável pela montagem do módulo não tenha experiência alguma com furadeiras, ceguetas, limas, e outras ferramentas utilizadas no processo, recomenda-se a consulta com alguém mais experiente no local de montagem, que saiba onde estão as ferramentas apropriadas e como usá-las. Fora as medidas normais de segurança quando se trabalha com ferramentas de corte, vale lembrar que o material do gabinete é plástico e derrete com o calor que surge durante seu corte⁵. Utilizando os cabos com conectores header tipo fêmea, é possível testar o módulo antes de proceder para sua incorporação ao gabinete, de forma similar ao que é visto na Figura V.4.

⁴A UMI também requer um conector deste tipo, após a retirada do conector original.

⁵Se as ferramentas ficarem sujas com plástico, limpe-as com cuidado para não se cortar.



Figura V.4: Módulo sensorial sendo testado antes da montagem do gabinete

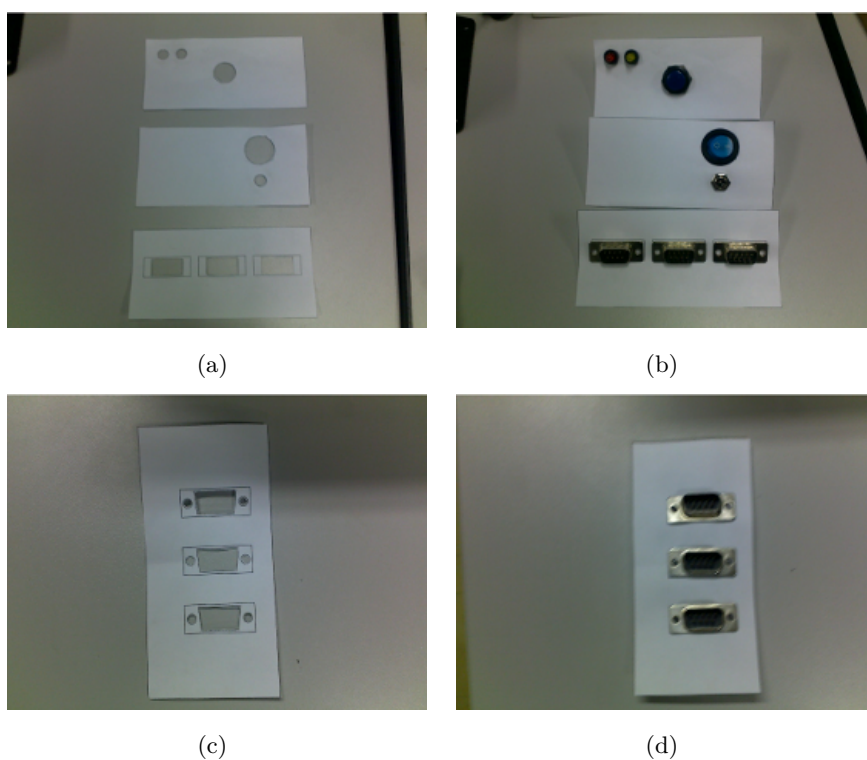


Figura V.5: Gabaritos para furação das faces do gabinete

Para facilitar o processo de furação dos gabinetes, foram desenhados gabaritos para os furos de cada face, conforme visto na Figura V.5. Todos gabaritos estão disponíveis para impressão na seção I. Os projetos no *SolidWorks* também estão presentes no CD, conforme descrito no Anexo II. Antes de serem utilizados, estes foram testados com os componentes inseridos. Neste teste, foi identificado que a configuração das portas seriais não estava adequada para os gabinetes, já que havia interferência com os pontos de fixação da tampa. Isso levou ao reprojeito desta face, conforme as Figuras V.5(c) e V.5(d). Recomenda-se cuidado sempre que algum componente estiver próximo à borda da face, como é o caso dos LEDs, já que esta condição dificulta sua inserção no gabinete. Para sanar este problema é possível tanto adaptar os projetos disponíveis no CD, quanto fixar o gabarito na face com algum deslocamento para afastar os componentes da borda.

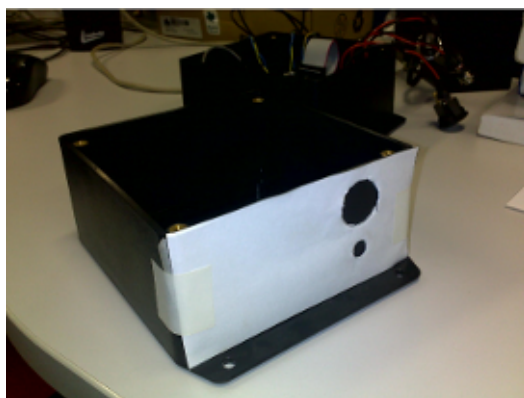


Figura V.6: Gabarito fixado na face do gabinete

Uma vez impressos e recortados os gabaritos, estes devem ser afixados nas faces do gabinete utilizando fita adesiva, conforme a Figura V.6, para auxiliar no posicionamento e execução dos furos. Para a fixação dos gabinetes para a furação, recomenda-se o uso de sargentos próprios para fixação. Alguns estão disponíveis no LARA, e devem ser utilizados conforme visto na Figura V.7. Deve ser considerado que os gabinetes possuem abas laterais que atrapalham na fixação dos gabinetes. Recomenda-se o planejamento das etapas de furação para evitar a utilização de faces furadas para fixação, já que estas ficam fragilizadas quando comparadas às demais.

Para realizar os furos menores do gabinete utilizou-se a furadeira Dremel disponível no LARA, enquanto que os furos maiores foram realizados na furadeira de bancada. Quando utiliza-se a Dremel, é preciso cuidado para fazer os furos perpendiculares às faces. Furos feitos na diagonal resultam em parafusos desalinhados e buracos excêntricos! As Figuras V.8(a) e V.8(b) mostram a realização do furo do parafuso das portas seriais, e o teste para verificar a necessidade de alargá-lo.

Apesar do uso de gabaritos para furação, provavelmente será necessário fazer algum acabamento final para que os componentes se encaixem. O alargamento de furos grandes pode ser feito com uma broca de desbaste na própria Dremel. Além disso, as portas seriais podem necessitar algum uso de limas ou lixas, como visto na Figura V.8. Nesta etapa, é preciso verificar constantemente se a largura e altura dos furos estão suficientes para os conectores da porta serial, para evitar a abertura de furos grandes demais em alguma dimensão.

Quando todos os furos forem feitos de forma bem sucedida, basta soldar os fios conectores aos seus terminais dos componentes externos e inserí-los levando em consideração sua forma de fixação no gabinete (parafuso, porca, abas). A Figura V.9 mostra algumas fotos da montagem final do primeiro protótipo do módulo sensorial. Após algumas horas de trabalho, talvez você fique tão satisfeito quanto o autor na Figura V.10 ao ver que está pronto!

V.3 Estruturas auxiliares

Para uso do módulo sensorial GPS/UMI, é preciso fazer a montagem de estruturas auxiliares para fixação da antena do receptor GPS. Dentre as escolhas possíveis para isso, provavelmente será necessário o uso de algum tipo de placa para suporte da antena. No primeiro protótipo,

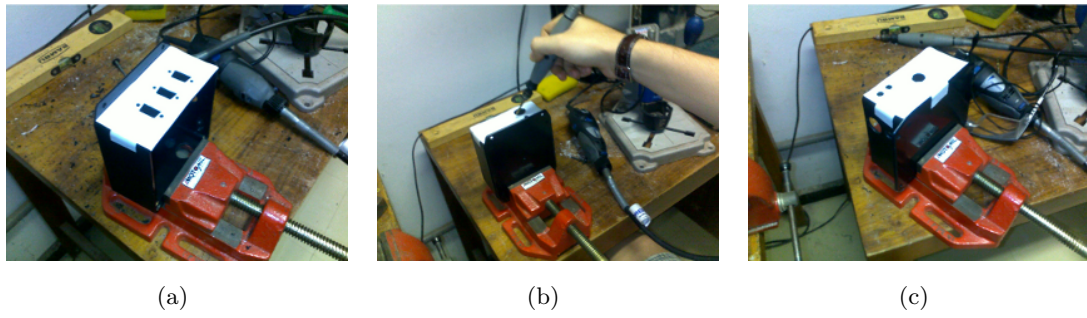


Figura V.7: Fixação do gabinete utilizando sargento

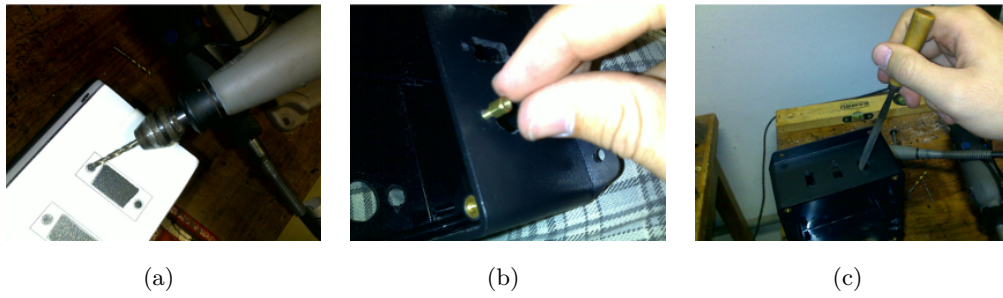


Figura V.8: Fabricação dos furos da porta serial

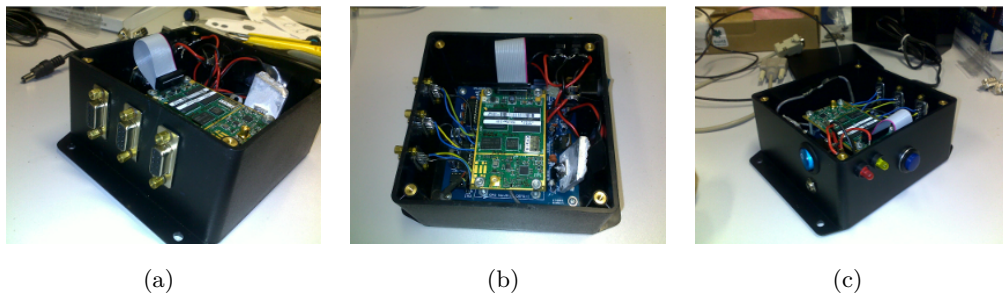


Figura V.9: Montagem final do gabinete



Figura V.10: Felicidade depois de algumas horas de trabalho



Figura V.11: Placa de suporte da antena do receptor GPS



(a)

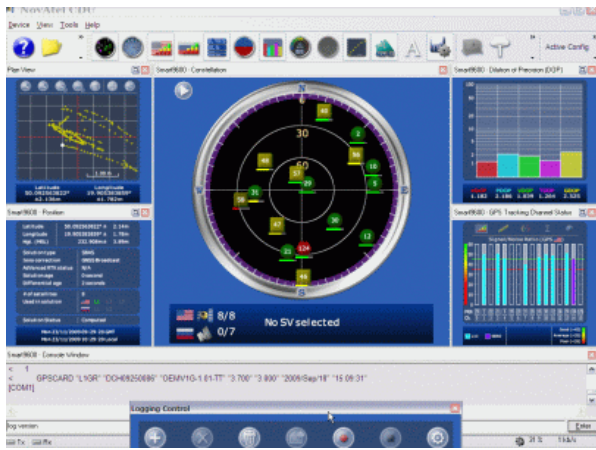
(b)

Figura V.12: Estrutura de suporte da antena do receptor GPS no robô Pioneer 3-AT

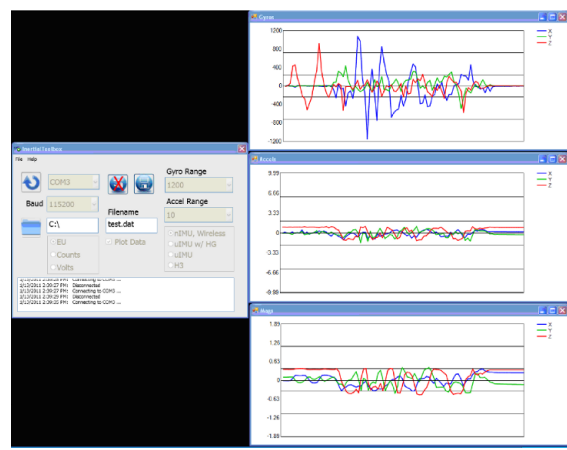


Figura V.13: Montagem independente do módulo sensorial GPS/UMI

escolheu-se fazer este suporte em uma placa de acrílico, cujo gabarito pode ser visto no Anexo I ou no CD, conforme listado no Anexo II. A Figura V.11 mostra a placa de acrílico feita para suporte da antena, e a Figura V.14 mostra estrutura montada com barras de extrusão de alumínio 2020 para fixação da antena no robô Pioneer 3-AT.



(a) NovAtel CDU



(b) MEMSense Inertial Toolbox

Figura V.14: *Software* proprietário para teste dos sensores

Houve uma situação em que tornou-se necessário testar o módulo sensorial independentemente do robô. A solução encontrada foi a sua fixação em uma tábua de madeira juntamente da estrutura de suporte da antena do receptor GPS, conforme visto na Figura V.13.

V.4 Testando o módulo sensorial GPS/UMI

Software proprietário dos fabricantes

Para fazer o primeiro teste do módulo sensorial GPS/UMI, recomenda-se o uso do *software* fornecido pelos fabricantes dos sensores. Ambos sensores têm pelo menos dois programas disponíveis para Windows em que é possível testar seu funcionamento. Para o receptor GPS têm-se o *NovAtel Connect*, mais atual e compatível com receptores mais novos, e o *NovAtel CDU*, que apesar de ter seu desenvolvimento descontinuado é compatível com este receptor. Já para a UMI MEMSense NanoIMU têm-se o *Inertial Toolbox*, que plota gráficos com os dados da UMI e permite a gravação de log de dados, e o *IMU Data Console*, que é mais simples e apenas imprime os valores lidos em um prompt de comando. As Figuras V.14(a) e V.14(b) mostram a interface dos programas *NovAtel CDU* e *MEMSense Inertial Toolbox*, que foram mais utilizados pelo autor.

Todos programas têm interfaces bastante intuitivas para uso, de modo que o autor não considera necessário descrever seu funcionamento neste anexo. Caso haja algum problema na conexão dos sensores aos programas de teste, é interessante verificar os seguintes pontos antes de entrar em contato com o suporte técnico da NovAtel e MEMSense:

- **As conexões TX/RX das portas seriais estão trocadas?** Dependendo do cabo utilizado, e do padrão adotado para ligação dos conectores das portas seriais, pode haver algum problema de conexão com o computador.
- **A porta serial está configurada corretamente?** Verifique as configurações de conexão em ambos programas, em particular a porta e sua *baudrate*. Para ambos sensores, a *baudrate*

da porta serial pode ser configurada em 115200 bps nos programas.

- **A porta serial do computador está queimada?** Isto já ocorreu com o autor. Se você não souber testá-la, peça ajuda para alguém do laboratório.

Terminal Serial

Outra forma conveniente de se fazer testes do módulo sensorial GPS/UMI, principalmente quando se está utilizando sistemas Linux, é através do terminal serial de sua preferência. O autor já utilizou o *gtkterm* com sucesso em algumas versões do Ubuntu e Debian, enquanto o *Terminal v1.9b* foi o melhor encontrado para Windows. Uma descrição detalhada destas ferramentas foge do escopo deste trabalho, porém em cada um destes há certos truques que podem auxiliar no teste de funcionalidades do receptor GPS, que demanda o envio de mensagens terminadas com os caracteres CR (*carriage return*) e LF (*line feed*):

- No *gtkterm*, não há uma forma simples de se enviar comandos ASCII para o dispositivo serial conectado, o que é necessário para se testar o receptor GPS. A forma que o autor encontrou de fazê-lo foi ativar a opção **Configuration->CR LF Auto**, escrever o comando desejado em um arquivo texto simples e enviá-lo utilizando a função **File->Send raw file**.
- No *Terminal v1.9b* é possível enviar comandos através da função **Transmit Macros**, sempre adicionando-se o símbolo `$0D` (que representa o valor ASCII do caractere CR) ao final do comando. Não é possível usar o espaço tradicional para envio de mensagens ASCII devido à necessidade de adicionar-se este caractere final.

Além destes truques que nem sempre são tão óbvios, vale lembrar que a configuração correta da porta, *baudrate*, e outros parâmetros da conexão serial são essenciais para o correto funcionamento destas ferramentas de conexão serial. Em alguns sistemas, pode ser necessário executar programas que utilizam a porta serial como administrador ou super-usuário.