



INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO BIOMECÂNICO E CINEMÁTICO PARA REMO OLÍMPICO

Fernando de Souza Pereira Monteiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Biomédica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Biomédica.

Orientadores: Marcio Nogueira de Souza
Alexandre Visintainer Pino

Rio de Janeiro
Junho de 2014

INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO BIOMECÂNICO E
CINEMÁTICO PARA REMO OLÍMPICO


Fernando de Souza Pereira Monteiro

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
BIOMÉDICA.

Examinada por:



Prof. Marcio Nogueira de Souza, D.Sc.



Prof. Frederico Caetano Jandre de Assis Tavares, D.Sc.



Prof. Alessandro Jacoud Peixoto, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2014

Monteiro, Fernando de Souza Pereira

Instrumentação para Monitoramento Biomecânico e Cinemático para Remo Olímpico/Fernando de Souza Pereira Monteiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XIX, 96 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Marcio Nogueira de Souza

Alexandre Visintainer Pino

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Biomédica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 78 – 82.

1. Biomecânica. 2. Remo Olímpico. 3. Instrumentação. I. Souza, Marcio Nogueira de *et al.*
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Biomédica. III. Título.

Para minha namorada Débora

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que colaboraram com esse projeto. Dentre todos eu destaco: Adriano Guedes de Carvalho, Alexandre Visintainer Pino, Aluizio Soares da Fonseca, Ana Carolina Schmidt Borges, Anderson Francisco da Costa Souza, Carlos Antonio Egger Mendonça, Daniele Polato, Daniel dos Santos Morim, Débora Paulino Oliveira, Eduardo Rodrigues Guimarães, Fabricio Sander Zubelli, Filipe Maia Lessa Pinheiro, Hudson Cabral Limeira, João Marcos Yamasaki Catunda, José Luis Lopes da Silveira, Katia Goretti de Lima, Márcio de Oliveira Nunes, Marcio Nogueira de Souza, Nelson Luiz de Paula Menezes Monnerat, Pedro Cunha Campos Roquette, Rafael Rodrigues de Carvalho, Ricardo José Soares, Roberto Teixeira Nahon Marinho, Teresa de Souza Pereira e William Soares Filho.

Gostaria também de agradecer à Capes, ao CNPq e à FAPERJ pelo financiamento da pesquisa e à equipe de remo do Clube de Regatas do Flamengo.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO BIOMECÂNICO E CINEMÁTICO PARA REMO OLÍMPICO

Fernando de Souza Pereira Monteiro

Junho/2014

Orientadores: Marcio Nogueira de Souza
Alexandre Visintainer Pino

Programa: Engenharia Biomédica

A biomecânica tem grande influência no desempenho de atletas de remo olímpico, e existe uma dificuldade inerente de avaliá-la de forma objetiva durante as sessões de treinamento. Apesar de existirem sistemas acadêmicos e comerciais desenvolvidos com esse objetivo, esses são limitados ou possuem custo elevado, e em sua maioria não apresentam especificação de desempenho dos sensores empregados. Apresenta-se, nesta dissertação, o desenvolvimento do protótipo de um sistema de aquisição, armazenamento e telemetria; bem como um conjunto de sensores e técnicas de pós-processamento com objetivo de medir sinais de interesse para a análise biomecânica do remo: posição, velocidade e aceleração do barco; força aplicada aos remos; ângulos horizontal e vertical de remos, posição de tronco e carrinho. O sistema desenvolvido mostrou-se adequado para a aplicação em ambiente agressivo e foi capaz de mensurar as variáveis de interesse dentro de suas faixas de operação. As não linearidades foram da ordem de 2% do fundo de escala para todos os sensores exceto o sensor de força, que registrou uma não linearidade de 10%. A repetitividade e a reprodutibilidade dos procedimentos de calibração apresentaram resultados compatíveis com as não linearidades dos sensores. Os resultados da medição em um atleta apresentam morfologia similar à descrita na literatura.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

BIOMECHANICAL DATA ACQUISITION AND TELEMETRY SYSTEM
APPLIED TO OLYMPIC ROWING

Fernando de Souza Pereira Monteiro

June/2014

Advisors: Marcio Nogueira de Souza
Alexandre Visintainer Pino

Department: Biomedical Engineering

Biomechanics has great influence on the performance of Olympic rowing athletes. There is an inherent difficulty in evaluating the biomechanic objectively during the training sessions. Although there are academic and commercial systems developed for this purpose, these are limited or too expensive and have no performance specification of the sensors employed. This dissertation presents the development of a prototype of acquisition, recording and telemetry system; as well as a set of sensors and post-processing techniques for measure signals of interest to the biomechanical analysis of rowing: boat position, velocity and acceleration; force applied in the oars; horizontal and vertical angles of the oars; and the position of athlete's trunk and sliding seat. The system proved to be suitable for application in harsh environment and was able to record and transmit the variables of interest with acceptable operating ranges, with hysteresis and nonlinearity of less than 10% FSO for the force sensor and less than 2% for all other sensors. The repeatability and reproducibility of calibration procedures presented results compatible with the of the sensors nonlinearities. The measurement results for a professional athlete showed a morphology similar to those described in the literature.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Símbolos	xv
Lista de Abreviaturas	xviii
1 Introdução	1
1.1 Remo	1
1.1.1 Simuladores de Remo	3
1.2 Objetivos gerais	5
1.3 Objetivos específicos	5
1.4 Estrutura da dissertação	5
2 Fundamentação Teórica	7
2.1 Sensores	7
2.1.1 <i>Strain Gauges</i> e Células de Carga	7
2.1.2 <i>Encoders</i> Ópticos	7
2.2 Navegação	8
2.2.1 Navegação Inercial	8
2.2.1.1 Acelerômetros	9
2.2.1.2 Giroscópios	10
2.2.2 GNSS e GPS	11
2.2.3 Fusão de Sensores e Filtro de Kalman	14
2.3 Telemetria	19
2.3.1 Legislação Relativa à Transmissão sem Fio	19
2.3.2 Estimativa de Alcance Máximo do Enlace	19
2.4 Terminologia Náutica	20
3 Revisão Bibliográfica	21
3.1 Instrumentação para Simuladores de Remo	21

3.2	Instrumentação para Embarcações	21
3.3	Taxa de Amostragem	23
3.4	Sinais da literatura	23
3.5	Telemetria	25
3.6	Sistemas Comerciais	26
4	Metodologia	28
4.1	Sensores	28
4.1.1	Sensores da Cinemática do Barco	28
4.1.2	Sensores de Ângulos de Remo	29
4.1.2.1	Calibração	31
4.1.3	Sensores de Força Aplicada ao Remo	31
4.1.3.1	Projeto Mecânico	32
4.1.3.2	Projeto Eletrônico	35
4.1.3.3	Calibrador de Força e Procedimento de Calibração	40
4.1.4	Sensores de Posição Linear de Tronco e Carrinho	41
4.1.4.1	Calibração	42
4.2	Sistema de aquisição e telemetria desenvolvido	43
4.2.1	Projeto Eletrônico	44
4.2.2	Telemetria	47
4.2.3	Gerenciamento de Energia	47
4.2.4	Resistência a Água	49
4.2.5	<i>Firmware</i>	49
4.3	Processamento de Dados	52
4.3.1	Filtro de Kalman	53
4.4	Metodologia de Avaliação	54
4.4.1	Testes de Bancada	55
4.4.1.1	Telemetria	55
4.4.1.2	Sensores de Cinemática do Barco	55
4.4.1.3	Sensores de Ângulo	57
4.4.1.4	Sensor de Força	57
4.4.1.5	Calibrador de Força	57
4.4.1.6	Sensores de Posição de Carrinho e Tronco	58
4.4.2	Testes de Campo	58
4.4.3	Testes <i>In Situ</i> e fusão de dados	59
5	Resultados	60
5.1	Testes de Bancada	60
5.2	Testes de Campo	61
5.3	Testes <i>In Situ</i>	65

5.4 Fusão de dados	68
6 Discussão e Conclusão	74
Referências Bibliográficas	78
A Diagramas Esquemáticos	83
B Desenhos das Placas de Circuito Impresso	88
C Códigos de Componentes	91
D Lista de Problemas Conhecidos	93
D.1 Sistema de Aquisição	93
D.1.1 Gravação no cartão SD	93
D.1.2 GPS	93
D.2 Sensores	94
D.2.1 Sensores Inerciais	94
D.2.1.1 Sensores de Posição de Carrinho e Tronco	94
D.3 Processamento de Dados	94
E Permissão de Uso de Figuras	96

Lista de Figuras

1.1	Componentes do <i>single skiff</i>	2
1.2	Componentes do remo.	2
1.3	Representação esquemática da forqueta e da secção transversal da chumaceira.	3
1.4	Simuladores de remo.	4
2.1	Diagrama esquemático de um acelerômetro.	10
2.2	Princípio de funcionamento de giroscópios de estrutura vibratória. . .	11
2.3	Exemplos de posicionamento de quatro satélites com baixa e alta diluições de precisão.	13
2.4	Representação esquemática das operações realizadas no calculo recursivo do filtro de Kalman	18
2.5	Terminologia náutica e sistema de coordenadas.	20
3.1	Registro do aceleração no eixo x do barco com o atleta remando com voga 24.	24
3.2	Registro da força aplicada aos remos em função do ângulo horizontal para o remo de boreste.	25
3.3	Registro da força em função do ângulo horizontal para o remo de boreste.	25
3.4	Sistemas comerciais de aquisição de dados biomêcanicos para remo. .	27
4.1	IMU SEN-11072.	28
4.2	Sensor de ângulo.	30
4.3	Convenção dos sentidos de ângulos utilizada.	30
4.4	Diagrama esquema simplificado do circuito do amplificador de força. .	31
4.5	Representação do sensor de força fixado no remo.	32
4.6	Variáveis do projeto mecânico do sensor de força.	34
4.7	Desenhos em CAD e foto do sensor de força.	35
4.8	Esquema de montagem dos extensômetros.	36
4.9	Diagrama da secção longitudinal da haste com extensômetro.	37
4.10	Diagrama esquema simplificado do circuito do amplificador de força. .	39

4.11	Esquema do procedimento de calibração dos sensores de força.	40
4.12	Encoder opticos E6A2-CW3C.	41
4.13	Desenho em CAD do corpo dos sensores de posição linear.	42
4.14	Montagem do sistema de aquisição e dos sensores de posição linear.	43
4.15	Calibração dos sensores de posição.	43
4.16	Sistema de aquisição.	44
4.17	Visão geral do sistema de aquisição.	44
4.18	Placa de desenvolvimento UBW32 (DEV-09713).	45
4.19	Placa adaptadora para cartão micro SD BOB-00544.	46
4.20	Componentes do receptor de GPS.	46
4.21	Componentes do transmissor/receptor de rádio.	47
4.22	Componentes do sistema de gerenciamento de energia.	48
4.23	Circuito da chave liga/desliga.	48
4.24	Circuito do sensor de bateria.	49
4.25	Visão geral do <i>firmware</i>	50
4.26	Fluxograma do laço principal do <i>firmware</i>	50
4.27	Máquina de estados da chave iniciar-terminar.	51
4.28	Máquina de estados do <i>encoder</i>	51
4.29	Esquema de montagem do sistema de aquisição na mesa simuladora de movimentos.	55
4.30	Esquema do procedimento de calibração estática dos sensores de força. 58	
5.1	Perda de pacotes em função da distância.	60
5.2	Reta de calibração do sensor de força de boreste do Treinador 4.	63
5.3	Reta de calibração do sensor de força para calibração estática.	63
5.4	Reta de calibração do sensor de força de boreste sem o remo.	64
5.5	Registro da aceleração no eixo x.	65
5.6	Registro de força.	66
5.7	Registro de ângulos horizontais.	66
5.8	Registro de ângulos verticais.	67
5.9	Registro de posições lineares.	67
5.10	Registro da força em função do ângulo horizontal.	68
5.11	Registro do ângulo vertical em função do ângulo horizontal.	68
5.12	Registro do aceleração no eixo x.	69
5.13	Velocidade no trecho entre os segundos 400 e 420.	70
5.14	Velocidade duranteo percurso de 2000m.	70
5.15	Polinômio de linha de base subtraído da aceleração.	71
5.16	Derivada do sinal de GPS reamostrado e filtrado.	71
5.17	Posição do barco no trecho entre os segundos 400 e 402.	72

5.18	Posição do barco no trecho entre os segundos 400 e 420.	72
5.19	Posição do barco durante o percurso de 2000m.	73
6.1	Comparação do desempenho dos sensores com a literatura	77
A.1	Diagrama esquemático do primeiro estágio de amplificação do sensor de força.	83
A.2	Diagrama esquemático do circuito de condicionamento do calibrador do sensor de força.	84
A.3	Diagrama esquemático da placa de condicionamento de sinais e <i>modem</i> de rádio.	85
B.1	Placa de circuito impresso do primeiro estágio de amplificação do sensor de força.	88
B.2	Placa de circuito impresso circuito de condicionamento do calibrador do sensor de força.	89
B.3	Placa adaptadora do sistema de aquisição.	89
B.4	Placa de circuito impresso de condicionamento de sinais e <i>modem</i> de rádio.	90

Lista de Tabelas

4.1	Características do giroscópio biaxial IDG500	29
4.2	Características do acelerômetro triaxial ADXL335	29
4.3	Características dos potenciômetros 248TBCF103A26A1	30
4.4	Dados de projeto do sensor de força	34
4.5	Características da célula de carga SV-200	40
4.6	Características microcontrolador PIC32MX795F512L	45
4.7	Posições angulares usadas na calibração dos acelerômetros	56
4.8	Posições e velocidades angulares usadas na calibração dos giroscópios	57
5.1	Coefficientes de calibração e não linearidade	61
5.2	Ajuste de linha de base do sensor de ângulo horizontal de boreste	61
5.3	Ajuste de linha de base do sensor de ângulo horizontal de bombordo	62
5.4	Coefficientes de calibração do sensor de força de remo de boreste	62
5.5	Coefficientes de calibração do sensor de força de remo de bombordo	62
5.6	Ajuste de linha de base do sensor de posição de carrinho	64
5.7	Ajuste de linha de base do sensor de posição de tronco	64
5.8	Desvios padrão de repetitividade e reprodutibilidade para os sensores calibrados em campo	65
A.1	Mapa das conexões entre microcontrolador e o cartão micro SD	84
A.2	Mapa das conexões dos sensores	86
A.3	Mapa das conexões entre microcontrolador e receptor de GPS	87
A.4	Mapa das conexões entre microcontrolador e o <i>modem</i> de rádio	87
C.1	Códigos dos componentes comprados na Sparkfun	91
C.2	Códigos dos componentes comprados na Digikey	92

Lista de Símbolos

a	Aceleração, p. 9
C	Matriz de acoplamento de saída, p. 15
c	Velocidade da luz no vácuo, p. 12
d	Diâmetro do carretel, p. 41
$\mathcal{E}()$	Valor esperado, p. 15
$e(k)$	Vetor de erro de medição, p. 15
e_t	Erro do relógio do receptor, p. 12
$e_{\ddot{y}_{acx}}(k)$	Erro de medição da aceleração do barco medida pelo acelerômetro, p. 54
$e_{y_{gps}}(k)$	Erro de medição da posição do barco medida pelo GPS, p. 54
F	Força, p. 9, 33
G	Fator de Gauge, p. 35
g	Aceleração da gravidade, p. 55
G_t, G_r	Ganhos das antenas de transmissão e recepção, p. 19
I	Matriz de identidade, p. 16
K	Matriz de ganhos de Kalman, p. 15
k	Número da amostra, p. 15
L, b, h	Comprimento, largura e altura da haste do sensor de força, p. 32
L_f	Seletividade, p. 19
L_p	Perdas de propagação, p. 19

m	Massa, p. 9
M_b	Momento fletor, p. 33
p_i	Pseudodistância entre o receptor de GPS e o satélite i , p. 12
p_p	Transições de estado do encoder por pulso, p. 42
P_r	Potência no receptor, p. 19
P_t	Potência de transmissão, p. 19
p_v	Pulsos por volta do encoder, p. 42
Q	Autocovariância do erro de processo, p. 15
R	Autocovariância do erro de medição, p. 15
r	Raio médio da Terra, p. 12
$Sd()$	Desvio padrão, p. 53
t	Hora interna do receptor de GPS, p. 12
t_i	Hora interna do satélite i , p. 12
T_{min}	Período mínimo entre transições de estado do encoder, p. 42
$u(k)$	Vetor de entrada, p. 15
V	Tensão de cisalhamento, p. 33
$Var()$	Variância, p. 54
v_{max}	Velocidade linear máxima, p. 41
$W(k)$	Vetor de erro de processo, p. 15
$w_{\ddot{x}_{barco}}(k)$	Erro de processo da aceleração do barco, p. 54
$\hat{x}(k)$	Estimativa <i>a posteriori</i> do vetor de estado, p. 15
$\hat{x}^-(k)$	Estimativa <i>a priori</i> do vetor de estado, p. 15
$x(k)$	Vetor de estado, p. 15
$x_{barco}(k)$	Posição do barco, p. 53
$\dot{x}_{barco}(k)$	Velocidade do barco, p. 53

$\ddot{x}_{barco}(k)$	Aceleração do barco, p. 53
$\hat{x}(k)$	Erro da estimativa <i>a posteriori</i> do vetor de estado, p. 16
$\tilde{x}^-(k)$	Erro da estimativa <i>a priori</i> do vetor de estado, p. 16
x_r, y_r e z_r	Coordenadas de posição do receptor de GPS, p. 12
$y(k)$	Vetor de saída, p. 15
$y_{gps}(k)$	Medição da posição do barco com base no GPS, p. 53
$\int \ddot{y}_{acx}(k)$	Medição da velocidade do barco com base no acelerômetro, p. 53
$\ddot{y}_{acx}(k)$	Medição da aceleração do barco com base no acelerômetro, p. 53
Γ	Matriz de acoplamento de entrada, p. 15
$\delta(k)$	Função delta de Kronecker, p. 15
ϵ	Deformação do extensômetro, p. 37
ε	Deformação, p. 33
θ	Ângulo de inclinação, p. 56
π	Razão entre o perímetro de uma circunferência e seu diâmetro, p. 41
σ	Estresse sobre um ponto na superfície, p. 33
σ_L	Desvio padrão entre treinadores, p. 59
σ_R	Desvio padrão de reprodutibilidade, p. 59
σ_r	Desvio padrão de repetitividade, p. 59
σ_T	Desvio padrão de cada treinador, p. 59
Φ	Matriz de atualização de estado, p. 15
ϕ	Ângulo de azimute, p. 56
ω	Deflexão, p. 33
ω_{max}	Velocidade angular máxima, p. 41

Lista de Abreviaturas

A/D	<i>Analog-to-Digital Converter</i> - Conversor Analógico-Digital, p. 45
AHRS	<i>Attitude and heading reference system</i> - Sistema de referência de atitude e rumo, p. 9
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> - Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informação, p. 14
BER	<i>Bit Error Rate</i> - Taxa de Erro de Bits, p. 19
CAD	<i>Computer Aided Design</i> - Desenho Assistido por Computador, p. 35
CMRR	<i>Common-Mode Rejection Ratio</i> - Razão de Rejeição de Modo Comum, p. 38
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> - Verificação de Redundância Cíclica, p. 45
DGPS	<i>Differential GPS</i> - GPS diferencial, p. 14
DOP	<i>Dilution of precision</i> - Diluição de precisão, p. 13
DTG	<i>Dynamically tuned gyroscope</i> - Giroscópio dinamicamente compensado, p. 10
ECG	Eletrocardiograma, p. 23
ESG	<i>Electrically suspended gyroscope</i> - Giroscópio suspenso eletricamente, p. 10
FAT	<i>File Allocation Table</i> - Tabela de Alocação de Arquivos, p. 45
FFT	<i>Fast fourier transform</i> - Transformada rápida de Fourier, p. 23
FOG	<i>Fiber optic gyroscope</i> - Giroscópio de fibra óptica, p. 10

GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i> - Sistemas Globais de Navegação por Satélite, p. 11
GPS	<i>Global Positioning System</i> - Sistema de Posicionamento Global, p. 11
IMU	<i>Inertial measurement unit</i> - Unidade de medição inercial, p. 8
INS	<i>Inertial navigation system</i> - Sistema de navegação inercial, p. 8
MEMS	<i>Microelectromechanical systems</i> - Microssistemas eletromecânicos, p. 10
NMEA	<i>National marine electronics association</i> - Associação nacional de eletrônicos marítimos, p. 14
RLG	<i>Fiber Optic Gyroscope</i> - Giroscópio de Anel Laser, p. 10
RTK	<i>Real time kinematic</i> - Cinemática de tempo real, p. 14
SGB	Sistema geodésico brasileiro, p. 13
SMD	<i>Surface Mount Device</i> - dispositivo de montagem de superfície, p. 44
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> - Interface de Periférico Serial, p. 45
TIA	<i>Telecommunications industry association</i> - Associação das indústrias de telecomunicações, p. 14
ToF/ToA	<i>Time of flight/Time of arrival</i> - Tempo de voo/Tempo de chegada, p. 12
UART	<i>Universal Asynchronous Transceiver</i> - Transmissor e Receptor Universal Assíncrono, p. 46
VSG	<i>Vibrating structure gyroscope</i> - Giroscópios de estrutura vibratória, p. 11

Capítulo 1

Introdução

1.1 Remo

O remo é um esporte praticado há séculos, e foi incluído no programa dos Jogos Olímpicos de 1900, o segundo da era moderna [1]. O objetivo da competição é deslocar o um barco por um percurso de 2000 m na superfície da água no menor tempo, usando para tanto a força muscular e remos como alavancas inter-resistentes [2]. Existem 14 categorias nas competições de remo olímpico, em função do tipo de embarcação, idades, peso, sexo e número de remadores. Existem duas modalidades principais: *sweep* e *sculling*. A modalidade *sweep*, ou palamenta simples, consiste no uso de barcos no qual cada remador utiliza um remo de aproximadamente 370 cm, segurando-o com as duas mãos; sendo a guarnição (tripulação) efetuada em duplas, quartetos ou octetos, com ou sem timoneiro. Já na modalidade *sculling* (palamenta dupla), cada remador utiliza dois remos mais curtos, com aproximadamente 290 cm, segurando cada um com uma das mãos, em barcos para um, dois ou quatro remadores, sempre sem timoneiro. Nesse trabalho consideraremos apenas um tipo de embarcação: o *single skiff*, que é um barco para *sculling* para apenas um remador e mede aproximadamente de 8,20 m de comprimento e pesa cerca de 14 kg [2].

No que se refere especificamente ao remo olímpico, o *single skiff* possui uma bola de borracha fixada na proa do barco (bola de proa) que serve para protegê-la contra choques e marcar o cruzamento das linhas de partida e chegada. O barco possui ainda um assento deslizante montado sobre trilhos (carrinho) e um ponto de fixação para os pés (finca-pé) (Figura 1.1a). O finca pé permite que a força dos membros inferiores possa ser usada para movimentar os remos. Os remos têm de 250 a 300 cm de comprimento, e a pá, parte mais larga que fica em contato com a água, possui cerca de 50 cm de comprimento por 25 cm de largura. Eles são feitos de materiais compósitos, como fibra de carbono e são fixados ao barco por meio de uma peça, chamada forqueta, que gira livremente no plano horizontal em torno

de um pino. O pino por sua vez é ligado a um conjunto de duas hastes de metal, chamadas braçadeiras, que por sua vez se fixam nas laterais do barco (Figura 1.1b).

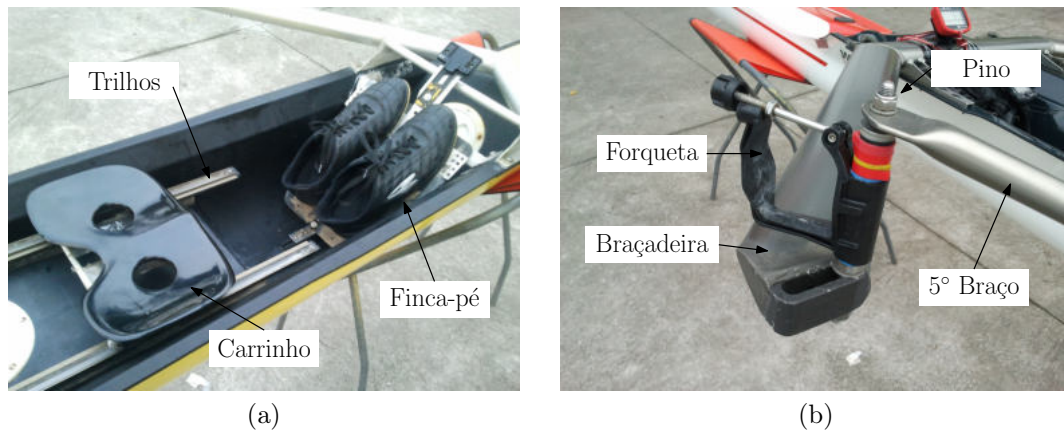


Figura 1.1: Componentes do *single skiff*.

Quando o remador, de costas para a o sentido de deslocamento do barco puxa os remos, estes formam uma alavanca inter-resistente ou de segunda classe, na qual as pás do remo, então submersas, utilizam o arrasto hidrodinâmico para atuarem como pontos de apoio. A força é transferida para as forquetas e para o barco pelo pino e braçadeiras. A parte do remo entre o punho e a forqueta é chamada de alavanca interna, enquanto o segmento entre a forqueta e a pá é a alavanca externa. Entre os dois segmentos é fixada uma peça chamada chumaceira que serve para apoiar o remo na forqueta, e um anel que impede que o remo atravesse a forqueta (Figura 1.2). A chumaceira possui chanfros que impedem que o remo gire em torno de seu eixo longitudinal, o mantendo em duas posições estáveis, com a pá na vertical ou na horizontal, representadas na Figura 1.3.

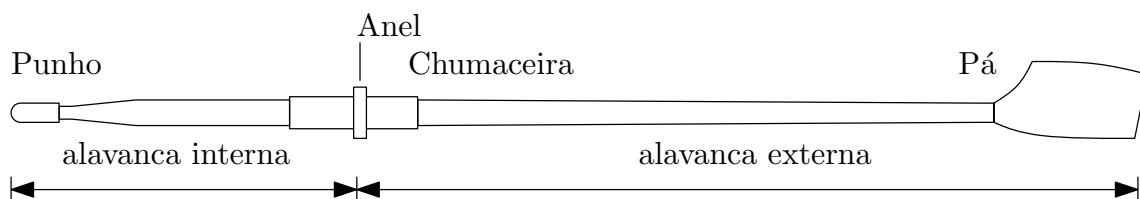


Figura 1.2: Componentes do remo.

O movimento de remar é cíclico, composto por quatro fases distintas: entrada ou *catch*, fase ativa ou *drive*, extração ou *finish* e recuperação ou *recovery*. A frequência com a qual o remador executa esse movimento cíclico é chamada voga, medida tipicamente em ciclos por minuto. Na primeira fase (entrada) o remador submerge as pás dos remos. Nesse momento o remador está com os joelhos flexionados, braços estendidos e tronco inclinado para frente. A seguir o remador estende as articulações de quadril, joelhos e tornozelos, enquanto contrai as de ombro, cotovelo e inclina o

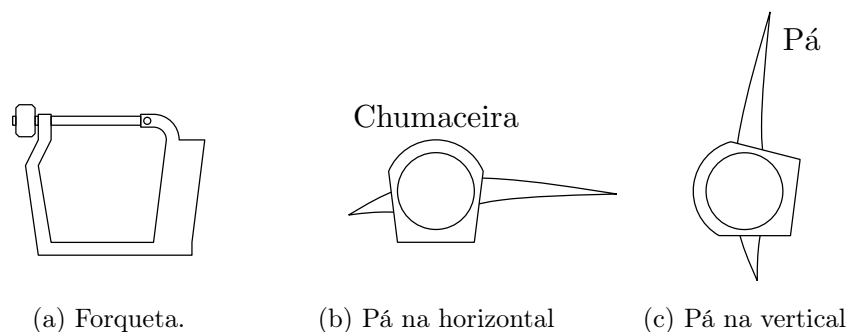


Figura 1.3: Representação esquemática da forqueta e da secção transversal da chumaceira.

tronco para trás, impulsionando o barco. A seguir o remador retira as pás dos remos da água e retorna a posição inicial, enquanto mantém os remos fora da água [3].

1.1.1 Simuladores de Remo

Existem aparelhos destinados ao treinamento e avaliação de atletas em terra firme, sendo particularmente úteis quando se observam condições desfavoráveis para a prática na água. O primeiro deles é o tanque de remo (Figura 1.4a), que consiste em uma instalação semelhante a uma piscina com uma estrutura que simula os componentes do barco no meio. Alguns tanques mais modernos possuem uma montagem mecânica que simulam a instabilidade do barco ao permitir o movimento de rolagem, possibilitando o treinamento de equilíbrio; e bombas para movimentar a água e simular de forma mais realista a hidrodinâmica da remada. [4].

O outro tipo de simulador é o remoergômetro (Figura 1.4b). Ele possui um trilho onde é apoiado um assento deslizante, fixadores para os pés e uma haste que simula os remos. Quando essa haste é puxada, ela transmite o movimento a uma roda por meio de um mecanismo de catraca, e quando essa haste é liberada ela retorna a posição original por meio de uma mola. A roda possui um mecanismo que gera um atrito variável, permitindo assim variações de carga. Além disso, os remoergômetros podem possuir indicadores eletrônicos de voga, potência, velocidade, tempo, calorias, distância, entre outros.

De forma similar ao tanque, o exercício em remoergômetro, quando comparado com a prática em barcos, possui diferenças na biomecânica do movimento. O treinamento no remoergômetro pode resultar em destreinamento para o remo [5].

O desempenho de atletas de remo olímpico é questão complexa e multifacetada, envolvendo a biomecânica do atleta e sua interação com o barco, questões fisiológicas relacionadas à força, potência e resistência muscular; redução de lesões, entre outras [6].



(a) Tanque de Remo.



(b) Remoêrgometro.

Figura 1.4: Simuladores de remo.

Existe uma dificuldade inerente de avaliar a biomecânica dos atletas durante o treinamento devido à grande distância entre o atleta e o observador [6]. Técnicas tradicionais de avaliação do treinamento tem como base a análise visual (com ou sem o auxílio de filmagem), que são incapazes de detectar detalhes da técnica, como por exemplo a força aplicada aos remos, e são suscetíveis a erros relacionados à variabilidade interobservador. Nesse contexto foram propostos sistemas dedicados à avaliar de forma objetiva grandezas como cinemática do barco, o movimento do atleta e a força que ele exerce[6].

Estes sistemas, em geral, dividem-se em duas categorias: sistemas simples com um conjunto limitado de variáveis medidas, que em geral não contemplam a investigação biomecânica desejada; ou sistemas comerciais complexos, cujo custo é proibitivo para grande parte das equipes, ou mesmo de equipes nacionais de países em desenvolvimento. Além disso, a maioria desses sistemas não fornecem informações necessárias para emprego em investigação científica, como a avaliação metrológica do desempenho dos sensores.

O objetivo desse trabalho é, portanto, desenvolver um protótipo de um sistema de aquisição e telemetria de dados biomédicos que possa ser aplicado para instrumentação de uma embarcação para remo olímpico para um remador *single skiff*. Além disso, almeja-se também o desenvolvimento de um conjunto de sensores para medidas de cinemática do barco e biomecânica do remador, que inclui a força de propulsão empregada pelo atleta juntamente com um conjunto de medidas de posição lineares e angulares que permitam estimar a posição de segmentos do corpo do atleta diretamente envolvidos no movimento da remada.

1.2 Objetivos gerais

- Desenvolver um sistema de aquisição e telemetria para sinais de interesse biomédico;
- Desenvolver uma instrumentação para medir a cinemática de um barco *single skiff* e os sinais da biomecânica do remador.

1.3 Objetivos específicos

- Construir um sistema com capacidade de medir:
 - A cinemática do barco (posição, velocidade e aceleração);
 - A força de propulsão aplicada aos remos;
 - Os ângulos horizontal e vertical dos remos;
 - A posição do assento deslizante e do tronco do remador.

O sistema deve ser capaz de fazer aquisição de todos os sinais relacionados acima e armazená-los para análise posterior, assim como de transmitir por um enlace de radiofrequência. Os componentes do sistema devem resistir à água e a corrosão. Também é desejável que o sistema possa ser montado e desmontado rapidamente por apenas uma pessoa, não dependa de modificações permanentes no barco e não provoque nenhum desconforto no atleta.

1.4 Estrutura da dissertação

No Capítulo 1 é apresentada a motivação, os objetivos e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 é feita uma breve introdução aos principais conceitos utilizados na dissertação, entre eles: Navegação inercial, sensores, GPS, filtro de Kalaman e remo olímpico. No Capítulo 3 é apresentada a revisão da literatura relacionada com sistemas de aquisição e sensores empregados na análise biomecânica do remo olímpico. Também são descritos os sistemas comerciais existentes. No Capítulo 4 é detalhado o projeto do sistema de aquisição, dos sensores e do processamento de dados, bem como a metodologia empregada na avaliação do sistema. No Capítulo 5 são apresentados os resultados: as curvas e coeficientes de calibração dos sensores, os sinais registrados durante uma sessão de treino de um atleta e o resultado do processamento de dados. No Capítulo 6 é realizada a discussão dos resultados e são apontados as possíveis melhorias à serem feitas em trabalhos posteriores.

Os Apêndices A e B detalham os diagramas esquemáticos e desenhos das placas de circuito impresso. O Apêndice C apresenta os códigos dos componentes eletrônicos utilizados. O Apêndice D apresenta alguns problemas do sistema de aquisição e as soluções sugeridas. Por último o Apêndice E contém as permissões de uso das figuras utilizadas neste trabalho.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Sensores

2.1.1 *Strain Gauges* e Células de Carga

Extensômetros ou *Strain Gauges* são sensores capazes de medir deformações em corpos. Existem diversos tipos de extensômetros: capacitivos, resistivos, ópticos (Redes de Bragg), piezoresistivos, piezoelétricos, mecânicos, entre outros. Neste trabalho serão considerados apenas os extensômetros resistivos. Nesse tipo de sensor um condutor é fixado ao corpo e conforme o mesmo se deforma a secção transversal e o comprimento do condutor variam, resultando em uma variação de resistência elétrica.

Extensômetros resistivos modernos são construídos depositando uma película de metal em um filme isolante. A geometria do condutor normalmente é projetada de modo aumentar a sensibilidade do mesmo em um determinado eixo de deslocamento, enquanto reduz nos demais. O circuito típico de medição emprega uma ponte de Wheatstone para transformar variações de extensão (e resistência) em um sinal de tensão [7].

2.1.2 *Encoders* Ópticos

Encoders, ou codificadores, são sensores que convertem uma posição linear ou angular em um código apresentado em sua saída. A faixa de entrada é quantizada em um número limitado de passos (*steps*). Nesse trabalho somente consideramos encoders angulares incrementais. Esses sensores fornecem um código referente à direção do último passo e portanto não armazenam a posição. As principais vantagens desse tipo de sensor são uma grande resolução, se comparado com encoders absolutos (mais passos por volta, menos graus por passo) e a capacidade de contar um número ilimitado de voltas, dado que exista um circuito contador capaz de totalizar

esses passos.

2.2 Navegação

Navegar consiste em planejar ou executar um deslocamento entre dois pontos. Para navegar é necessário definir uma rota, ou seja, um conjunto de pontos que definem a trajetória, e se conhecer sua posição em relação a cada um desses pontos, de forma que seja possível fazer as eventuais correções. Também chamamos de navegação o conjunto de técnicas empregadas para determinar as variáveis cinemáticas translacionais e rotacionais de um veículo em relação a um dado sistema de coordenadas. Para tanto podem ser usadas posições de astros, sinais elétricos, eletromagnéticos, acústicos, marcos visuais, etc.[8],

2.2.1 Navegação Inercial

Sistemas de navegação inercial (INS - *Inertial navigation system*) empregam o princípio da inércia, ou seja, a oposição a mudanças do estado de movimento de corpos que possuem massa. INSs não dependem de qualquer referência externa (tendo como possíveis exceções a aceleração da gravidade e a velocidade angular de rotação da Terra), permitindo a operação em qualquer ambiente, sem necessidade de infra estrutura externa. Outra vantagem é a maior taxa de atualização (maior que 1 kHz), possibilitando o uso em sistemas de controle de atitude e posição. A principal desvantagem é o acúmulo de erros provenientes da integração das acelerações e velocidades angulares.

INSs têm como base dois componentes básicos: um conjunto de sensores chamado unidade de medição inercial (IMU - *Inertial measurement unit*) e um computador de navegação. A IMU é composta por acelerômetros e giroscópios, normalmente 3 de cada, orientados ortogonalmente e montados de forma rígida a uma base comum.

Existem duas maneiras de fixar a IMU ao veículo: Montagem com cardan ou montagem solidária [9]. A montagem com cardan (ou *gimballed*) consiste em usar juntas tipo cardan (*gimbal*) concêntricas que permitem manter a IMU sempre com a mesma orientação independente do movimento angular da plataforma. Idealmente, com uma montagem perfeitamente equilibrada e sem atrito nos rolamentos das juntas, nenhum movimento angular seria transmitido. Como isso não é possível é usado um sistema de controle em malha fechada usando as informações obtidas pelos giroscópios para manter a orientação da IMU. Esse tipo de montagem é mais complexa, aumentando o custo, peso e volume; sendo normalmente empregada em sistemas inerciais de alta precisão.

A montagem solidária (*strapdown*) consiste em fixar a IMU diretamente ao veí-

culo, de modo que seus eixos ficam permanentemente alinhados com o sistemas de coordenadas do veículo. Esses sistemas são mecanicamente mais simples, no entanto o computador de navegação passa a ser responsável pela geração de um sistema de coordenadas inerciais por meio da integração dos sinais de velocidade angular (AHRS - *Attitude and heading reference system* - Sistema de referência de atitude e rumo) e pela transformação de coordenadas (rotação) dos sinais de aceleração para o sistema de coordenadas inerciais.

Então, para ambas as montagens, as acelerações em um sistema de coordenadas inerciais são integradas por duas vezes de modo a obter a velocidade e a posição.

2.2.1.1 Acelerômetros

Os acelerômetros são sensores utilizados para medir a aceleração própria de um corpo, embora existam outros tipos de sensores que medem aceleração, como inclinômetros (ou clinômetros), gravímetros ou sismógrafos, que não serão tratados nesse texto. De acordo com segunda lei de Newton, a aceleração de um objeto é dada por:

$$\sum F = ma \tag{1}$$

De forma que conhecendo as forças que atuam sobre esse objeto ($\sum F$) e um fator de escala m é possível calcular a aceleração. Normalmente não é possível medir as forças atuando diretamente sobre o objeto do qual se deseja medir a aceleração, sendo que essas medidas de força são feitas geralmente em uma massa de prova (também conhecida como massa sísmica), que consiste em uma pequena massa mecanicamente acopladas ao objeto de modo que o movimento do objeto seja transmitido a ela [10]. A Figura 2.1 ilustra o funcionamento de um acelerômetro. Ao aplicar uma aceleração no corpo do sensor, a massa de teste, por inércia, tende a se deslocar no sentido contrário, provocando uma deflexão (d) que é proporcional a aceleração.

Acelerômetros são insensíveis a aceleração da gravidade, dado que ela atua igualmente no corpo do sensor e na massa de teste. Logo, um acelerômetro em queda livre ou em órbita tem saída nula. Dessa forma os acelerômetros fornecem um sinal proporcional ao somatório dos componentes das acelerações não gravitacionais ao qual o mesmo é submetido em seu eixo principal de medição.

As diversas tecnologias de acelerômetros disponíveis utilizam o princípio anteriormente mencionado. As diferenças fundamentais consistem no modo de fabricação, tipo de estrutura de suporte da massa de teste e tipos de sensores de posição ou deslocamento empregados, podendo esses serem indutivos, capacitivos, resistivos, acústicos, ópticos, entre outros. Várias tecnologias de acelerômetros empregam um sistema em malha fechada para anular o deslocamento da massa de prova, por meio

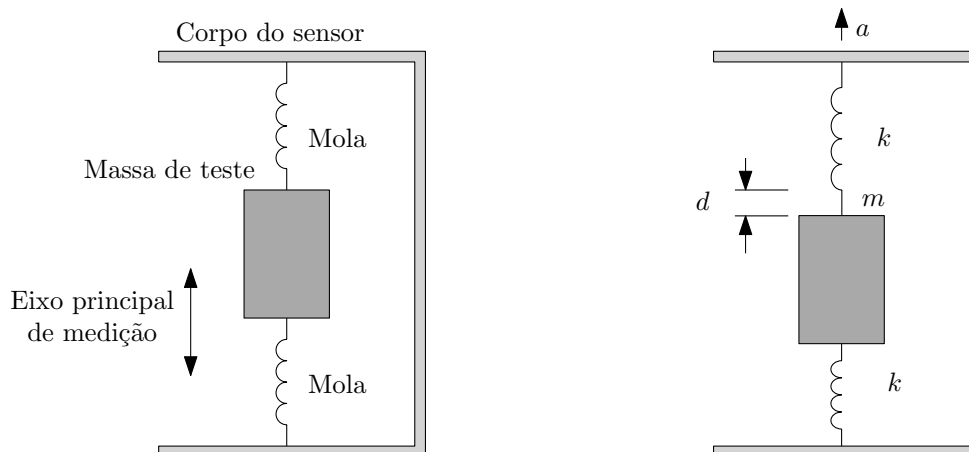


Figura 2.1: Diagrama esquemático de um acelerômetro. Adaptado de Titterton e Weston [10].

de atuadores eletrostáticos ou eletromagnéticos, de modo que o sinal de controle dos atuadores é proporcional à aceleração. Dessa forma as estruturas de fixação elásticas têm uma menor variação de comprimento, resultando em uma maior linearidade do sensor.

Acelerômetros que empregam a tecnologia de microsistemas eletromecânicos (MEMS -Microelectromechanical systems) utilizam estruturas microscópicas de silício ou quartzo feitas por decapagem (*etching*), possibilitando a fabricação dos componentes mecânicos e eletrônicos de um acelerômetro triaxial em uma mesma pastilha de circuito integrado [11], levando a obtenção de sensores resistentes, compactos e baratos [10].

2.2.1.2 Giroscópios

Giroscópios, também conhecidos como girômetros ou giros, são sensores que medem velocidades angulares em torno de um determinado eixo de rotação. Em linhas gerais os giroscópios se valem de 3 princípios de funcionamento distintos. Giroscópios mecânicos, como os ESG (*Electrically suspended gyroscope* - Giroscópio suspenso eletricamente) e DTG (*Dynamically tuned gyroscope* - Giroscópio dinamicamente compensado) utilizam o princípio da conservação de momento angular. Eles possuem uma estrutura girando com uma velocidade angular que se opõe a rotações nos outros eixos [9]. Esses giroscópios possuem a maior precisão (Estabilidade de linha de base de $1,5 \times 10^{-6}$ a $1,5 \times 10^{-4}$ °/hora [11]), mas em geral são caros, grandes, pesados e não toleram acelerações elevadas [11].

Giroscópios ópticos, como o FOG (*Fiber optic gyroscope* - Giroscópio de fibra óptica) e RLG (*Ring laser gyroscope* - Giroscópio de anel laser), utilizam o efeito Sagnac. Tal efeito tem como base a influência da rotação em um interferômetro, de modo que a frequência da luz no percurso do interferômetro muda devido à invari-

ância da velocidade da luz, provocando uma mudança no padrão interferométrico. A principal vantagem desse tipo de sensor é a durabilidade e robustez intrínsecas, uma vez que o mesmo não possui partes móveis. No entanto, esses sensores tem precisão inferior aos mecânicos.

Giroscópios de Estrutura Vibratória (VSG - *Vibrating structure gyroscope*) empregam uma estrutura excitada para oscilar em um dado sentido ou modo oscilatório. Quando essa estrutura é submetida a uma aceleração angular o momento angular é conservado, de modo que a energia é convertida em outro modo oscilatório. Medindo a amplitude e a frequência dessa oscilação é possível determinar a velocidade angular. A Figura 2.2 ilustra esse fenômeno.

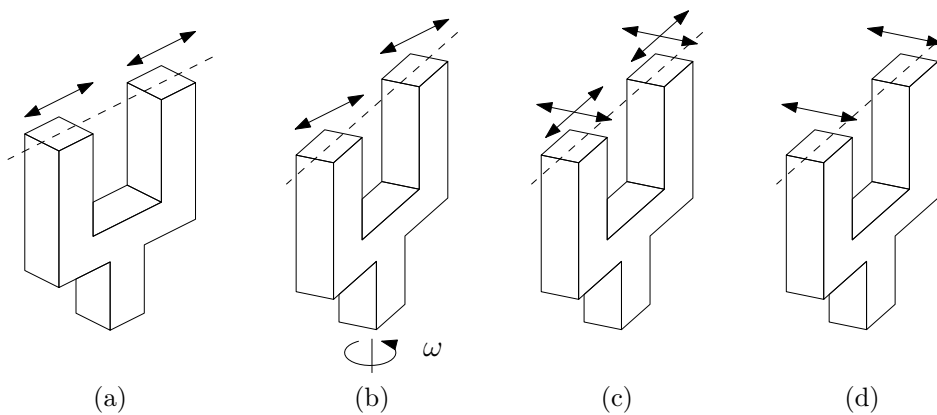


Figura 2.2: Princípio de funcionamento de giroscópios de estrutura vibratória, destacando o modo oscilatório de entrada 2.2a, o acoplamento dos modos devido à conservação de momento angular (2.2b e 2.2c) e o modo de saída (2.2d). Adaptado de Grewal *et al.* [8].

Tipos comuns de estrutura vibratória são os diapasões (*tuning forks*), pentes (*combs*), discos ou taças (*wine glasses*) e normalmente possuem precisão inferior aos giroscópios mecânicos e ópticos. Giroscópios MEMS utilizam estruturas vibratórias, resultando em sensores de baixa precisão (1,5 a 150 °/hora de estabilidade de linha de base [11]), mas que são baratos, leves e compactos.

2.2.2 GNSS e GPS

Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite Systems*) representam, de maneira genérica, sistemas que empregam sinais transmitidos por satélite para posicionamento e navegação. O sistema mais antigo em operação e mais amplamente utilizado é o *United States NAVSTAR Global Positioning System* ou simplesmente GPS (*Global Positioning System*). O GPS foi desenvolvido nas décadas de 1970 e 80 para aplicações militares e atualmente está disponível para uso civil.

A arquitetura do sistema GPS é composta por 3 segmentos: espacial, controle e de usuário. O segmento de controle é composto por um conjunto de estações terrestres responsáveis por monitorar e controlar os satélites, de forma a garantir a integridade dos mesmos e a precisão do sistema. O segmento espacial é composto por um conjunto de no mínimo 24 satélites em 6 planos orbitais igualmente espaçados. A constelação foi planejada para que qualquer ponto na superfície do planeta sempre tenha visada direta de pelo menos 4 satélites. Cada satélite possui um relógio atômico, que é utilizado para gerar uma referência de tempo com altíssima precisão que é transmitida para a superfície do planeta. Além da informação de relógio os satélites transmitem continuamente as informações referentes a suas posições orbitais (efemérides) e outras informações que auxiliam no cálculo da posição.

O segmento de usuário consiste em um dispositivo que recebe os sinais transmitidos pelos satélites. Com base na posição de cada satélite e no cálculo do tempo que a mensagem levou para chegar ao receptor (ToF/ToA - *Time of flight/Time of arrival* - Tempo de voo/Tempo de chegada) estima sua distância em relação ao satélite (Equação 2) [8].

$$p_i = (t_i + e_t - t)c \quad (2)$$

onde de t_i e t correspondem à hora interna do satélite e do receptor respectivamente, e_t é o erro do relógio do receptor, i é o número do satélite e c é a velocidade de propagação da luz. Com base nessa distância a posição do receptor é dada pela Equação 3.

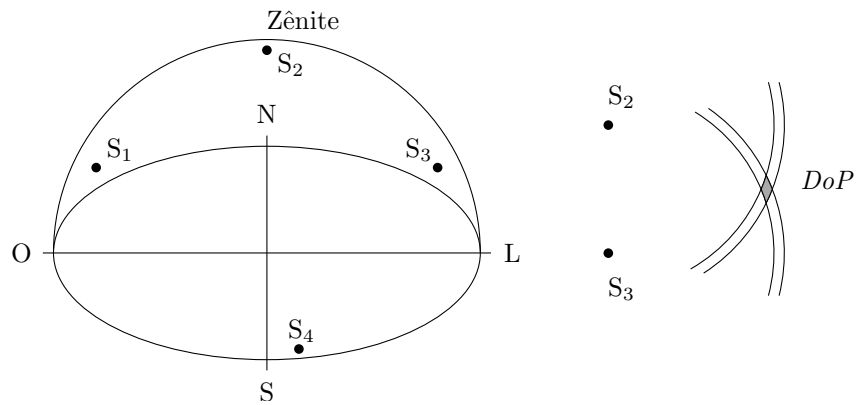
$$p_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (3)$$

onde p_i , x_i , y_i e z_i são pseudodistância e coordenadas de cada satélite, que são conhecidas; x , y e z são as coordenadas do receptor que se deseja calcular. São necessários informações de pelo menos 4 satélites de modo a se determinar as quatro variáveis: x_r, y_r, z_r e e_t , de acordo com o sistema de Equações 4 [8]. O valor r corresponde ao raio da terra. Para mais de quatro satélites, o sistema de equações não lineares fica sobredeterminado, de modo que a solução é obtida pelo método dos mínimos quadrados ou algum método equivalente.

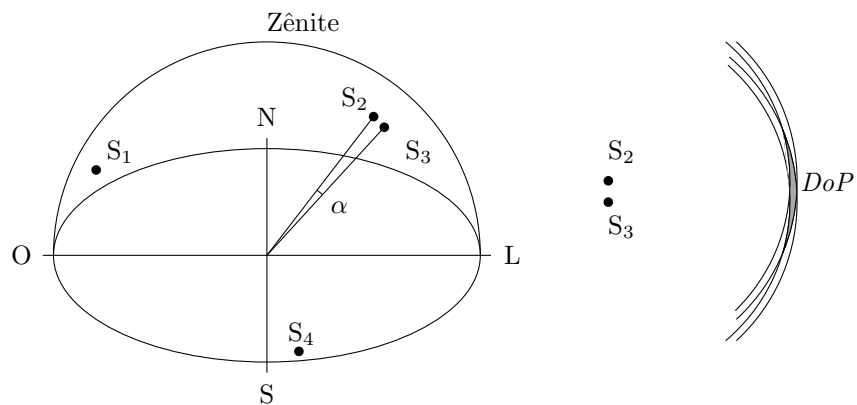
$$\begin{bmatrix} p_1^2 - (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) - r^2 \\ p_2^2 - (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) - r^2 \\ p_3^2 - (x_3^2 + y_3^2 + z_3^2) - r^2 \\ p_4^2 - (x_4^2 + y_4^2 + z_4^2) - r^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & -2z_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & -2z_2 & 1 \\ -2x_3 & -2y_3 & -2z_3 & 1 \\ -2x_4 & -2y_4 & -2z_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ e_t \end{bmatrix} \quad (4)$$

A precisão da medida de posição feito pelo receptor do sistema é influenciada pela posição relativa dos satélites, uma vez que o cálculo de distâncias entre satélites

com posições angulares (azimute e elevação) muito próximas, enfatizam os erros aleatórios. Esse efeito é chamado diluição de precisão (DOP - *Dilution of precision*). A Figura 2.3 ilustra a situação em que o ângulo entre os satélites influencia a incerteza da solução de posição.



(a) Geometria de satélites adequada resultando em uma baixa diluição de precisão.



(b) A proximidade dos satélites S_2 e S_3 aumenta a incerteza da solução de posicionamento para a mesma incerteza das pseudodistâncias.

Figura 2.3: Exemplos de posicionamento de quatro satélites com baixa (2.3a) e alta (2.3b) diluições de precisão.

Por último, a solução de posição com base em uma referência inercial calculada com base no centro da terra é convertida para um sistema de coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude) com base em um *datum* geodésico. Por omissão, o sistema GPS utiliza o *datum* geodésico WGS84, de cobertura global, na maioria de suas mensagens padrão. No entanto, o uso de um *datum* específico para uma região, como por exemplo o Sistema geodésico brasileiro (SGB), permite uma maior precisão das coordenadas dentro daquela região.

Outros fatores que influenciam a precisão e exatidão do GPS incluem, mas não se limitam à efeitos relativísticos, diferenças na velocidade de propagação dos sinais de rádio na atmosfera, erros nas efemérides estimadas dos satélites, erros no relógio interno dos mesmos. O *datum* geodésico utilizado influencia apenas a precisão do

sistema.

Uma importante característica das fontes de erro de sistemas de navegação por satélite é que elas influenciam de forma igual uma região. Logo, se um receptor de GPS for instalado em um ponto fixo georeferenciado (ou no mínimo conhecido), o erro medido nele pode ser utilizado para corrigir o erro de outros receptores dos quais se deseja determinar a posição. A esse conjunto de técnicas é dado o nome de DGPS (*Differential GPS* - GPS diferencial).

O GPS RTK (*Real time kinematic* - Cinemática de tempo real) é um sistema que emprega um conjunto de receptores conectados por enlaces de rádio de forma similar ao DGPS; mas o cálculo das pseudodistâncias é feito com base na informação de fase da portadora dos sinais de GPS, ao invés do conteúdo das mensagens. Como a frequência de onda da portadora é significativamente (1540 vezes) maior, a resolução espacial de posicionamento é maior, resultando em erros da ordem de milímetros. Sistemas RTK utilizam receptores mais sofisticados e são normalmente empregados em aplicações que requerem alta precisão, como agrimensura, topografia, cartografia e geodésia.

Os receptores de GPS se comunicam usando a interface definidas pela norma NMEA 0183 (*National marine electronics association* - Associação nacional de eletrônicos marítimos). A norma especifica que os dados são transmitidos usando a camada física definida pela norma TIA-422 (*Telecommunications industry association*) usando mensagens em ASCII (*American Standard Code for Information Interchange* - Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação).

2.2.3 Fusão de Sensores e Filtro de Kalman

Fusão de dados sensores consiste em utilizar medidas redundantes provenientes de diversos sensores de modo a produzir sinais de saída com características superiores às dos sinais de entrada individuais. Para tanto o Filtro de Kalman é comumente utilizado.

O filtro de Kalman é um algoritmo proposto por Rudolf E. Kálmán no fim da década de 50, que pode ser utilizado tanto para aplicações de filtragem, previsão ou suavização. Ele utiliza um modelo de espaço de estados com múltiplas entradas e saídas e modela os processos estocásticos envolvidos em uma forma matricial. Seu processamento é recursivo, sendo assim é possível empregá-lo em aplicações de em tempo real [12]. O filtro de Kalman não exige a estacionariedade dos processos estocásticos envolvidos e foi idealizado para sistemas lineares, no entanto esta técnica pode ser generalizada para sistemas não lineares usando derivadas parciais locais. [13].

A seguir é apresentada demonstração algoritmo do filtro para um sistema discreto

no tempo, linear, aleatório e invariante no tempo. O modelo de espaço de estados é apresentado na Equações 5 e 6.

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k) + W(k) \quad (5)$$

$$y(k) = Cx(k) + e(k) \quad (6)$$

onde k representa o número da amostra, $x(k) \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estados do processo, $u(k) \in \mathbb{R}$ é uma entrada determinística, $y(k) \in \mathbb{R}^m$ o vetor de saída ou medição. $W(k) \in \mathbb{R}^m$ e $e(k) \in \mathbb{R}$ são sequências discretas de ruído branco estacionário, com média nula, denominados de ruído do processo e ruído de medição, respectivamente. Φ, Γ, C são as matrizes de atualização de estado, acoplamento de entrada, acoplamento de saída respectivamente, todas conhecidas e constantes. O par (Φ, C) é observável. As matrizes de autocovariância dos vetores de erro $W(k)$ e $e(k)$, bem como a covariância entre os dois vetores de erro são descritos nas Equações 7, 8 e 9.

$$\mathcal{E}[W(k_1)W^T(k_2)] = Q\delta(k_1 - k_2) \quad (7)$$

$$\mathcal{E}[e(k_1)e^T(k_2)] = R\delta(k_1 - k_2) \quad (8)$$

$$\mathcal{E}[w(k_1)e^T(k_2)] = 0, \forall k, j \quad (9)$$

onde $\mathcal{E}()$ é o valor esperado e $\delta()$ é o delta de Kronecker. O observador de estados é descrito pelas Equações 10 e 11. A estimativa $\hat{x}^-(k+1)$ é chamada *a priori* pois leva em consideração apenas a atualização do estado de acordo com a planta, antes de incorporar a medição do vetor de saída $y(k)$. Da mesma forma a estimativa $\hat{x}(k)$ é chamada *a posteriori* é feita após incorporar a medição da saída da planta.

$$\hat{x}^-(k+1) = \Phi\hat{x}(k) + \Gamma u(k) \quad (10)$$

$$\hat{x}(k) = \hat{x}^-(k) + \Phi K(k)(y(k) - C\hat{x}^-(k)) \quad (11)$$

O filtro de Kalman pode ser interpretado como estimador linear de estados ótimo, que minimiza a variância do erro do estimador. A matriz K combina o vetor de saída medido com a estimativa *a priori* do vetor de saída ($C\hat{x}^-(k)$) de modo a minimizar o erro de estimativa de estados. Combinando as duas estimativas obtemos a equação do estimador completo:

$$\hat{x}^-(k+1) = \Phi\hat{x}^-(k) + \Phi K(k)(y(k) - C\hat{x}^-(k)) + \Gamma u(k) \quad (12)$$

O erro das estimativas de estado *a priori* e *a posteriori* são descritos pelas Equações

ções 13 e 14.

$$\tilde{x}^-(k+1) = x(k+1) - \hat{x}^-(k+1) \quad (13)$$

$$\tilde{x}(k) = x(k) - \hat{x}(k) \quad (14)$$

Substituindo as Equações 5 e 10 na Equação 13 obtemos:

$$\begin{aligned} \tilde{x}^-(k+1) &= [\Phi x(k) + \Gamma u(k) + W(k)] - [\Phi \hat{x}^+(k) + \Gamma u(k)] \\ &= \Phi x(k) + W(k) - \Phi \hat{x}(k) \\ &= \Phi[x(k) - \hat{x}(k)] + W(k) \\ &= \Phi \tilde{x}(k) + W(k) \end{aligned} \quad (15)$$

Substituindo as Equações 6 e 11 na Equação 14 obtemos:

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k) &= x(k) - \hat{x}^-(k) - K(k)[Cx(k) + e(k) - C\hat{x}^-(k)] \\ &= \tilde{x}^-(k) - K(k)[C\tilde{x}^-(k) + e(k)] \\ &= \tilde{x}^-(k) - K(k)C\tilde{x}^-(k) + K(k)e(k) \\ &= [I - KC]\tilde{x}^-(k) + Ke(k) \end{aligned} \quad (16)$$

Onde I é a matriz de identidade. Observamos que o erro do estimador *a priori* depende do erro do estimador *a posteriori* e vice e versa. Passamos então ao cálculo das matrizes de covariância dos erros de estimador *a priori* e *a posteriori*.

$$P^-(k+1) = \mathcal{E}[\tilde{x}^-(k+1)(\tilde{x}^-(k+1))^T] \quad (17)$$

$$P(k) = \mathcal{E}[\tilde{x}(k)(\tilde{x}(k))^T] \quad (18)$$

Substituindo a Equação 16 na Equação 18 obtemos:

$$\begin{aligned} P(k) &= \mathcal{E}[\tilde{x}(k)(\tilde{x}(k))^T] \\ &= \mathcal{E}[[I - KC]\tilde{x}^-(k) + Ke(k)][[I - KC]\tilde{x}^-(k) + Ke(k)]^T \end{aligned} \quad (19)$$

Mas como $\tilde{x}^-(k)$ e $e(k)$ são descorrelacionados, os termos cruzados são nulos, resultando em:

$$\begin{aligned}
P(k) &= \mathcal{E}[[I - KC]\tilde{x}^-(k)][[I - KC]\tilde{x}^-(k)]^T + \mathcal{E}[Ke(k)][Ke(k)]^T \\
&= [I - KC]P^-(k)[I - KC]^T + KRK^T \\
&= P^-(k) - KCP^-(k) - P^-(k)C^TK^T + KCP^-(k)C^TK^T + KRK^T \\
&= P^-(k) - KCP^-(k) - P^-(k)C^TK^T + K[CP^-(k)C^T + R]K^T
\end{aligned} \tag{20}$$

Substituindo as Equação 15 na Equação 17 obtemos:

$$P^-(k+1) = \mathcal{E}[\Phi\tilde{x}(k) + W(k)][\Phi\tilde{x}(k) + W(k)]^T \tag{21}$$

De forma similar à covariância do estimador *a priori*, $\tilde{x}(k)$ e $W(k)$ são descorrelacionados, resultando na Equação 22.

$$\begin{aligned}
P^-(k+1) &= \mathcal{E}\{\Phi\tilde{x}(k)[\Phi\tilde{x}(k)]^T\} + \mathcal{E}\{W(k)[W(k)]^T\} \\
&= \Phi P(k)\Phi^T + Q
\end{aligned} \tag{22}$$

Para encontrar a matriz K que minimiza as matrizes covariância do erro de estimador *a priori* calculamos a derivada do traço da matriz $P(k)$ (Equação 20) e igualamos a zero. Note que ao minimizar o erro *a priori*, o erro *a posteriori* também será minimizado. As Equações 23 a 25 descrevem as derivadas do traço dos termos da Equação 20.

$$\frac{dTr[(P^-(k))]}{dK} = 0 \tag{23}$$

$$\frac{dTr[(-KCP^-(k))]}{dK} = \frac{dTr[(P^-(k)C^TK^T)]}{dK} = [CP^-(k)]^T \tag{24}$$

$$\frac{dTr[(K[CP^-(k)C^T + R]K^T)]}{dK} = 2K(CP^-(k)C^T + R) \tag{25}$$

Logo a derivada do traço da matriz de covariância dos erros *a posteriori* é dada por (Equação 26).

$$\frac{dTr[(P(k))]}{dK} = -2[CP^-(k)]^T + 2K(CP^-(k)C^T + R) \tag{26}$$

Igualando a derivada a zero obtemos:

$$\begin{aligned}
\frac{dTr[(P(k))]}{dK} &= -2[CP^-(k)]^T + 2K(CP^-(k)C^T + R) = 0 \\
2K(CP^-(k)C^T + R) &= 2[CP^-(k)]^T
\end{aligned} \tag{27}$$

Então, a matriz de ganhos de Kalman é dada por:

$$K = P^-(k)C^T(CP^-(k)C^T + R)^{-1} \quad (28)$$

Podemos simplificar a Equação 17 substituindo K pela Equação 28.

$$\begin{aligned} P(k) &= P^-(k) - KCP^-(k) - P^-(k)C^TK^T + K[CP^-(k)C^T + R]K^T \\ P(k) &= P^-(k) - KCP^-(k) - P^-(k)C^TK^T + \\ &\quad P^-(k)C^T(CP^-(k)C^T + R)^{-1}[CP^-(k)C^T + R]K^T \\ P(k) &= P^-(k) - KCP^-(k) - P^-(k)C^TK^T + P^-(k)C^TK^T \end{aligned} \quad (29)$$

Então a versão simplificada da matriz de covariância do erro de estimador *a posteriori* é dada pela Equação 30.

$$P(k) = [I - KC]P^-(k) \quad (30)$$

O primeiro passo do algoritmo recursivo consiste em se calcular as estimativas *a priori* do vetor de estado $\hat{x}^-(k)$ (Equação 10) e da matriz de covariância $P^-(k)$ (Equação 22) com base na amostra anterior (estimativa de estado da $\hat{x}(k-1)$ e matriz de covariância $P(k-1)$). A seguir é calculada a matriz de ganhos K , conforme a Equação 28. Por fim são calculadas as estimativas *a posteriori* do vetor de estado $\hat{x}(k)$ (Equação 11) e da matriz de covariância $P(k)$ (Equação 30) com base nas estimativas *a priori*, na matriz de ganhos de Kalman e no vetor de medição $y(k)$. O ciclo então recomeça para estimar o estado para $k+1$. A Figura 2.4 ilustra o cálculo iterativo do algoritmo.

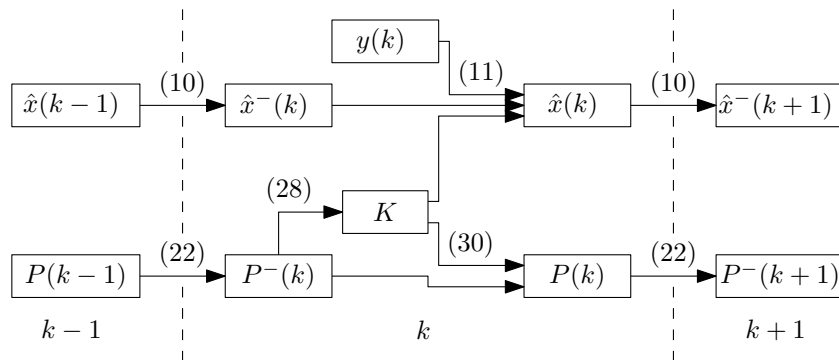


Figura 2.4: Representação esquemática das operações realizadas no cálculo recursivo do filtro de Kalman. Os números entre parênteses indicam o número da Equação utilizada em cada etapa do cálculo.

2.3 Telemetria

2.3.1 Legislação Relativa à Transmissão sem Fio

O artigo 163 da Lei Nº 9.472, de 16 de julho de 1997 [14] prevê que o uso de equipamentos de radiofrequência depende de autorização prévia, com exceção de equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita definidos pela ANATEL.

Para ser considerado um equipamento de radiocomunicação de radiação restrita deve atender as condições de faixa de frequência e intensidade de campo definida pela resolução 506 da ANATEL [15], de modo que possa ser utilizado com dispensa da licença de funcionamento de estação e independente de outorga de autorização de uso de radiofrequência. Equipamentos de radiação restrita devem operar em caráter secundário, ou seja, não possuem proteção (legal) contra interferência provocada por outra estação e não poderão causar interferência em outra transmissão de caráter primário. Além disso, a resolução determina que somente as faixas de 902 a 907,5 MHz, 915 a 928 MHz, 2400 a 2483,5 MHz e 5725 a 5850 MHz podem ser usadas em transmissões que empregam alguma técnica de modulação digital. A potência de transmissão é limitada em 1 W (30 dBm).

2.3.2 Estimativa de Alcance Máximo do Enlace

Podemos prever o alcance máximo para um modem de 1 W operando na faixa de 902 a 928 MHz (Equação 31);

$$P_r = P_t + G_t + G_r + L_p + L_f \quad (31)$$

onde P_r é a potência na entrada do receptor, P_t é a potência de saída do transmissor G_t e G_r são os ganhos das antenas, L_f é a perda de seletividade e L_p são as perdas devido a propagação no espaço. Os valores típicos de ganho para antenas curtas (20 cm é de +3 dBm e a seletividade da ordem de -20 dBm para um *modem* típico). As perdas de propagação a uma distância de 2 km em espaço aberto com ambas as antenas a 1m de altura podem ser estimadas com base no modelo Hata [16] para áreas abertas, resultando em uma perda de 133 dBm. Dessa forma temos:

$$P_r = 30 + 3 + 3 + (-133) + (-20) = -117 \text{ dBm} \quad (32)$$

Essa potência de recepção é inferior à sensibilidade da maior parte dos modems comerciais [17, 18], de modo que não é possível utilizá-los mantendo uma taxa de erro de bits (BER - *Bit Error Rate*) aceitável.

2.4 Terminologia Náutica

A nomenclatura das partes do barco segue a nomenclatura náutica. Considerando a direção do movimento, a proa é a parte da frente do barco e a popa a parte de trás. Boreste (ou estibordo) e bombordo são os lados direito e esquerdo, sendo normalmente indicados pelas cores verde e encarnado (vermelho). O sistema de coordenadas normalmente adotado para embarcações considera o eixo x na direção popa-proa, o y na direção bombordo-boreste e o z na direção zênite-nadir. Os movimentos translacionais nos eixos x, y e z damos os nomes de avanço (*surge*), deriva (*sway*) e afundamento (*heave*), respectivamente. De forma similar, movimentos rotacionais nos eixos x, y e z são chamados rolagem (*roll*), arfagem (*pitch*) e guinada (*yaw*). A Figura 2.5 ilustra esses conceitos.

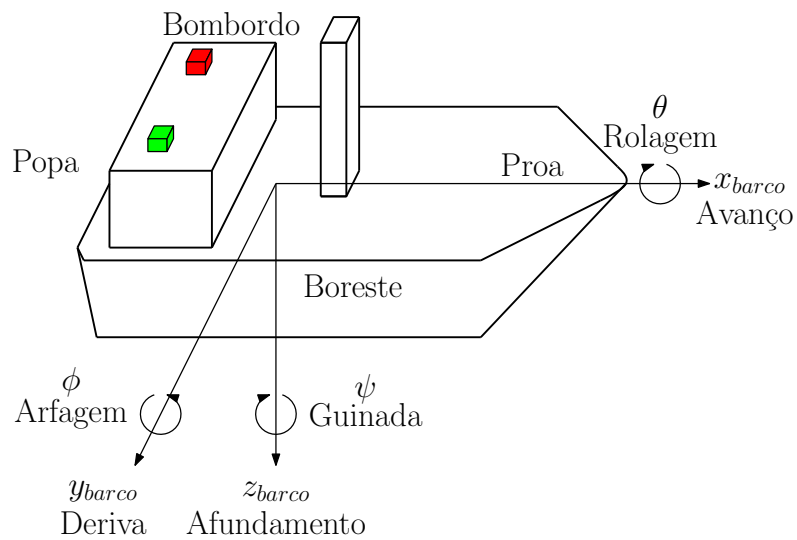


Figura 2.5: Terminologia náutica e sistema de coordenadas.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

3.1 Instrumentação para Simuladores de Remo

Apesar das restrições apresentadas na Secção 1.1.1, simuladores de remo têm sido amplamente utilizados para treinamento e permitem a avaliação de atletas em um ambiente controlado com uma repetitividade adequada [19], podendo ainda fornecer informações para o atleta durante o treinamento[20, 21].

Em geral os sistemas que empregam remoergômetros utilizam células de carga na haste [5, 19–22] e nos finca pés [20–22]. O deslocamento da haste (que simula os remos) é medida por um potenciômetro [5, 21] ou um encoder digital [22], dessa forma obtendo força e amplitude de movimento da remada.

Hawkins [20] utilizou goniômetros para medir os ângulos de articulação do tornozelo, joelho, quadril, e cotovelo. Černecký *et al.* [22] empregaram um sistema com base em processamento de imagem, e usaram marcadores infravermelhos para medir ângulos de tornozelo, joelho, quadril, ombro, cotovelo e punho.

King *et al.* [23] utilizaram uma rede de sensores sem fio, na qual os nós possuíam uma unidade inercial composta por um acelerômetro triaxial e um giroscópio biaxial. Os nós foram instalados na coxa, e nas regiões sacral e lombar, sendo os dados de aceleração coletados e processados para obter os ângulos de quadril e do segmento sacro-lombar. Os ângulos foram comparados com os obtidos com um sistema de imagem BTS SMART-D (BTS Bioengineering, Itália). Os resultados indicaram uma precisão de 4,1 graus, o que foi considerado satisfatório para análise biomecânica. Além disso, o sistema pode ser facilmente adaptado para uso no barco.

3.2 Instrumentação para Embarcações

De forma similar à instrumentação apresentada para remoergômetros, vários autores investigaram formas de monitorar a técnica de remada, bem como o resultado dessa

técnica; o que pode ser obtido pela cinemática do barco, que consiste na avaliação de seu deslocamento, velocidade e aceleração. A aceleração pode ser medida por acelerômetros triaxiais fixados ao casco [6, 24–26], mas a medida de aceleração é contaminada pela aceleração resultante da força normal, uma vez que o barco possui livre movimento de rolagem e arfagem. Smith e Loschner [24] e Bettinelli *et al.* [6] utilizaram os sinais de giroscópios triaxiais para compensar esse erro. Já Pilgeram e Delwiche [25] utilizaram dois conjuntos de acelerômetros triaxiais de modo a obter resultados similares. A velocidade poderia, a princípio, ser obtida integrando-se o sinal dos acelerômetros; porém, essa integração resultaria em acúmulo de erro ao longo do tempo. Medidas diretas de velocidade podem ser feitas por intermédio de uma turbina que é movida pelo fluxo contrário da água [24] ou sensores de efeito Hall [27], ou indiretamente, derivando o sinal de posição obtido por um receptor GPS [28].

De forma análoga, a posição do barco pode ser medida por meio do GPS [29], por integração do sinal de velocidade ou dupla integração do sinal de aceleração. Simoes *et al.* [29] propuseram um sistema de medição da cinemática do barco com base apenas na informação de posição obtida por um receptor de GPS de alta precisão. A velocidade e a aceleração foram estimadas derivando o sinal de posição. Magee e Denys [30] propuseram um sistema de medição cinemática utilizando apenas um GPS RTK, obtendo medidas com alta precisão e acurácia, a uma taxa de 20 Hz.

A medida do padrão biomecânico da remada pode ser feita pela avaliação das posições dos punhos dos remos, da posição do assento deslizante e do tronco do remador e a força aplicada nos remos e no finca-pé. A posição dos punhos dos remos é obtida na medida dos ângulos da forqueta. Pilgeram e Delwiche [25] e Bettinelli *et al.* [6] utilizaram potenciômetros montados na forqueta de modo a medir o deslocamento angular dos remos no eixo horizontal. Já Smith e Loschner [24] utilizaram um conjunto de dois potenciômetros montados em braços giratórios de modo a medirem os ângulos nos eixos horizontal e vertical.

Llosa *et al.* [26] implementaram um sistema que tem como base um par de acelerômetros triaxiais fixados no punho do remo com eixos paralelos e não colineares, de forma a ser possível descrever o movimento dos remos nos dois eixos. Smith e Loschner [24], Kleshnev [31] e Bettinelli *et al.* [6] utilizaram potenciômetros de fio para medir a posição do assento deslizante. Kleshnev [31] utilizou esse mesmo tipo de potenciômetro para medir o ângulo de tronco do remador. Já McBride e Elliott [27] utilizaram sensores de velocidade de efeito Hall montados em cada assento de um barco para 8 remadores, de modo avaliar a sincronia dos movimentos.

Smith e Loschner [24] usaram um sensor piezoelétrico tridimensional montado no pino da forqueta para medição da força aplicada nos remos. Outra possibilidade é utilizar strain gauges em ponte de Wheatstone, fixados diretamente nas hastes dos

remos [25] ou montados em células de carga presas aos remos [31] ou nas braçadeiras [6] que dão sustentação à forqueta.

A força de propulsão dos pés foi medida com duas células de carga montadas no suporte do finca pé de modo a monitorar a contribuição individual de cada um dos pés [6, 24, 31]. Krumm *et al.* [32] utilizaram um conjunto de dois sensores de força de 6 com graus de liberdade, capazes de medir intensidade e direção de forças e torques, situados abaixo da planta dos pés e duas células de carga simples (com apenas um grau de liberdade) de liberdade abaixo dos calcanhares, de modo obter um perfil da distribuição de força de cada pé. Outros trabalhos monitoraram também variáveis fisiológicas específicas para aplicação em remo, como ECG (eletrocardiograma)[33] e $VO_2\max$ [34].

Borges [35] construiu um sistema de aquisição com base em uma placa de aquisição Logomatic V2 SD *datalogger* (Sparkfun, EUA), uma tríade de acelerômetros MMA7260Q (Freescale,EUA) e um módulo de GPS Venus638FLPx (Skytraq,China). Foi utilizado um algoritmo de correção de dos sinais de aceleração e GPS que tem por base o ajuste de um polinômio de linha de base de aceleração a ser subtraído de modo minimizar o erro de integração. Também foi desenvolvido um conjunto de rotinas de processamento para geração de relatórios de desempenho dos atletas. Limeira [36] desenvolveu um conjunto de ângulo horizontal e vertical e utilizou esse mesmo sistema de aquisição para gravar sinais provenientes de sensores. Foram obtidas incertezas da ordem de $1,5^\circ$ no eixo horizontal e $1,2^\circ$ no eixo vertical. Uma versão anterior do sistema de medição de posição de tronco e carrinho foi desenvolvida e testada utilizando esse mesmo sistema de aquisição, resultando em erros da ordem de 0.4 cm e não linearidades menores que 0,5% do fundo de escala [37].

3.3 Taxa de Amostragem

Na maioria dos estudos os sinais foram medidos a uma taxa de 100 Hz [6, 22, 24, 35]. Hawkins [20] utilizou 200 Hz, Llosa *et al.* [26] 83 Hz e Mattes e Schaffert [28] utilizaram 50 Hz para sinais de aceleração e 4 Hz para sinais de GPS. Borges, analisando a FFT (*Fast fourier transform* - Transformada rápida de Fourier) dos sinais de aceleração, observou que a maior parte da energia está contida numa banda de até 5 Hz e utilizou um filtro passa baixas nessa frequência. Outros trabalhos utilizaram frequências de corte superiores de 5 Hz [22] 10 Hz [6, 26].

3.4 Sinais da literatura

Para fim de comparação com os resultados deste trabalho são apresentados sinais de aceleração, força em função de ângulo horizontal de remo, ângulo vertical em

função do ângulo horizontal e posição de tronco, todos adaptados da literatura. Observa-se que o sinal 3.1 apresenta um comportamento periódico, com período de aproximadamente 2,5 s, equivalente a uma voga de 24 remadas por minuto. O sinal é caracterizado por apresentar um pico negativo (pegada), com aproximadamente $-2,5 \text{ m/s}^2$ seguido de um pico positivo de 2 m/s^2 (fase ativa) e um platô em torno de $-0,4 \text{ m/s}^2$ (extração e recuperação) [38].

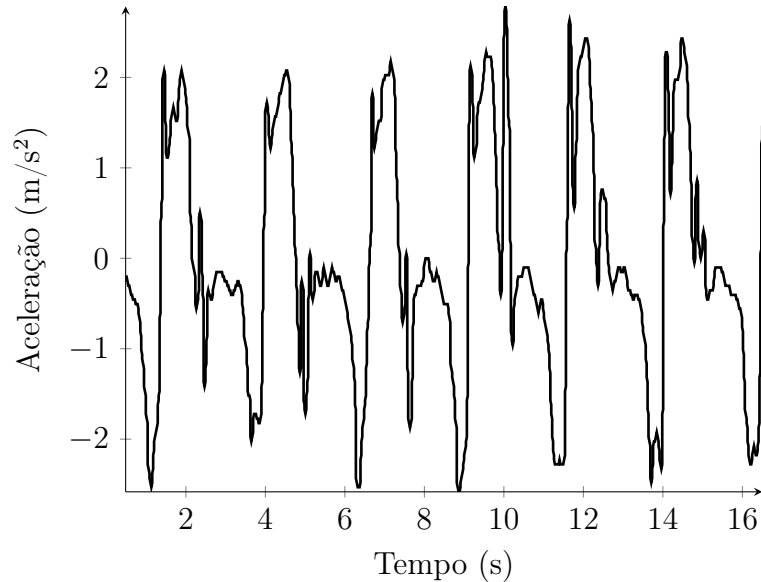


Figura 3.1: Registro da aceleração no eixo x do barco com o atleta remando com voga 24. Adaptado de Mattes e Shaffert [28].

Os sinais descritos nas Figuras 3.2 e 3.3 foram obtidos em um barco de parlamenta simples com dois remadores, no entanto pode ser utilizado para comparação com os resultados desse trabalho, provenientes de um *single-skiff*. Os sinais mostram o comportamento durante um ciclo de remada. Observa-se uma amplitude de ângulo horizontal de cerca de 80° , de -50° a 30° . O sinal de força de Boreste apresenta um máximo de 800 N ocorrendo para um ângulo de -10° . Ambos os bordos apresentam um laço ocorrendo próximo a -30° (pegada) acompanhado de uma força ligeiramente negativa. O ângulo vertical apresentou uma amplitude de 9° , de $-4,5^\circ$ a $4,5^\circ$. Para o sinal de boreste o pico negativo de ângulo vertical ocorre em um ângulo horizontal de aproximadamente -10° .

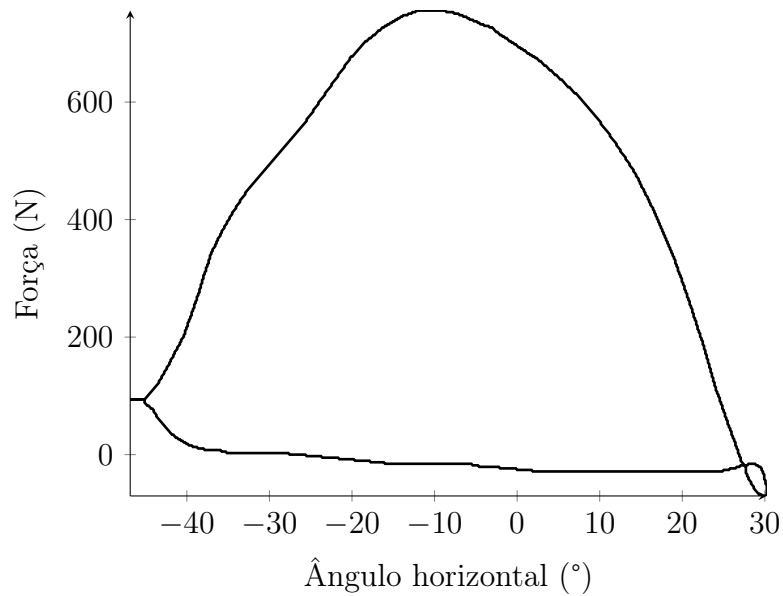


Figura 3.2: Registro da força aplicada aos remos em função do ângulo horizontal para o remo de boreste. Adaptado de Kleshnev [31].

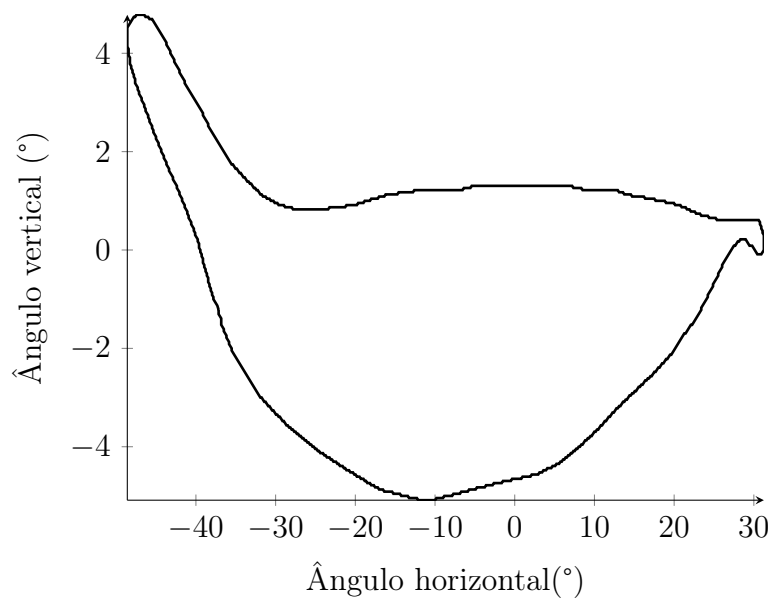


Figura 3.3: Registro do ângulo vertical em função do ângulo horizontal para o remo de boreste. Adaptado de Kleshnev [31].

3.5 Telemetria

Alguns dos trabalhos de instrumentação para barcos apresentados armazenam os dados em uma memória não volátil para análise posterior [6, 25]. Outros, no entanto, empregam sistemas de telemetria para transmitir os dados coletados para margem ou outra embarcação, permitindo que os treinadores avaliem a técnica e orientem os

atletas durante o treinamento. Smith e Loschner [24] utilizaram um sistema comercial de telemetria (pocketLAB, Digital Effects). Simoes *et al.* [29] utilizaram um rádio ZigBee de longo alcance (500mW - Xbee pro 868,Digi,EUA) e foram capazes de receber 98,2% dos dados transmitidos pelo barco, em um teste que simulava as distâncias e condições de uma regata. McBride e Elliott [27] também utilizaram sistemas de telemetria, no entanto não detalham quais as técnicas e equipamentos foram empregados.

3.6 Sistemas Comerciais

O BioRow (BioRow LTD, Reino Unido) [39] é um dos sistemas mais completos disponível no mercado (Figuras 3.4a e 3.4b). Ele utiliza células de carga presas aos corpos dos remos para medição de força; potenciômetros montados ortogonalmente para medição de ângulos horizontal e vertical dos remos; potenciômetros de fio SP-50 (Celesco,EUA) para medição de posição de tronco e carrinho; finca pé com célula de carga e um conjunto de IMU e GPS para medição da cinemática do barco. O BioRow é capaz de armazenar os dados em uma memória não volátil e transmitir a curta distância para a lancha do treinador. O sistema possibilita ainda montar até 8 conjuntos de sensores em cascata, de modo a instrumentar barcos para 8 remadores. O sistema de aquisição permite amostrar e gravar até 128 canais à 25,50 e 100 Hz com resolução de 14 bits.

Outro sistema disponível é o PowerLine (Peach Inovations, Reino Unido). O PowerLine possui sensores de força e ângulo vertical montados em uma forqueta modificada (Figura 3.4c); além de sensores cinemáticos: GPS, IMU e turbina (*impeller*) (Figura 3.4d), sensor de posição de carrinho sem contato mecânico. Esse sistema possibilita a aquisição de até 8 forquetas e demais sensores a uma taxa de 50 Hz, e possui um modem de rádio para telemetria com alcance de 100-150 m [40].

O SpeedCoach XL3 (Nielsen-Kellerman, EUA) utiliza turbina magnética e um sensor indutivo montado no carrinho para medir velocidade e voga. Esse sistema possui um modem de rádio integrado com alcance de 4,8 km e capacidade de receber sinais de frequência cardíaca de uma fita Polar (Polar, EUA) [41].

O sistema SmartOar (SmartOar Technologies, EUA) consiste em um conjunto de sensores inerciais e de força montados diretamente no corpo dos remos e permite registro dos dados e transmissão para um *tablet* na lancha do treinador [42]. O sistema RowCom (Oar Inspired, Austrália) utiliza um conjunto de forquetas modificadas para medir força e ângulo horizontal, similares as do PowerLine, que se comunicam por meio de uma rede sem fio. Por ultimo, o Arondight (Talon Technology, Reino Unido) consiste de um remo com sensores inerciais e de força, além de gravador integrado [43].



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.4: Sistemas comerciais de aquisição de dados biomecânicos para remo: BioRow (a e b) e PowerLine (c e d).

Capítulo 4

Metodologia

4.1 Sensores

4.1.1 Sensores da Cinemática do Barco

Foi utilizada uma central de medição inercial de 5 graus de liberdade SEN-11072 (Sparkfun, EUA). Essa central inercial consiste em uma placa de circuito impresso adaptadora (Figura 4.1) com dois circuitos integrados: um acelerômetro tri-axial ADXL335 (Analog Devices, EUA) e um giroscópio bi-axial IDG500 (InvenSense, EUA). A placa possui ainda um regulador de tensão de 2,8 V e capacitores de *bypass* recomendados pelos fabricantes dos sensores. Ambos os circuitos integrados empregam a tecnologia de microsistemas eletromecânicos (MEMS) e possuem saída analógica. As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as principais características estáticas e dinâmicas desses dois sensores. A placa do sensor foi soldada a placa de controle, de modo que os sistemas de referência dos sensores fossem solidários (*strapdown*) ao sistema de referência inercial do sistema de aquisição e do barco.

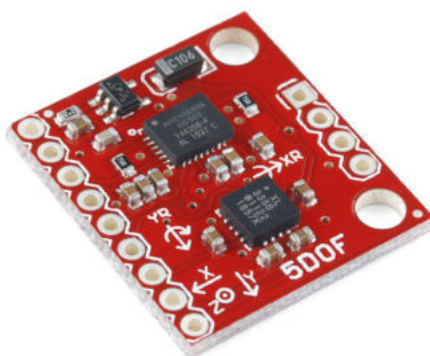


Figura 4.1: IMU SEN-11072.

É importante notar que o uso de sensores inerciais com saída analógica em conjunto com um conversor A/D de 10 bits resultou em uma degradação da qualidade dos sinais devido à resolução do A/D.

Tabela 4.1: Características do giroscópio biaxial IDG500 usando as saídas com ganho de 4,5

Característica	Valor
Faixa de operação	± 110 °/s
Sensibilidade	9.1 mV/ °/s
Não linearidade	1 % do fundo de escala
Sensibilidade entre eixos	± 1 %
<i>Offset</i>	1.35 V
Banda	<140 Hz (-3dB)
Ruído	0.8 mV RMS 0.09 °/s RMS
Resolução (A/D de 10 bits)	0.35 °/s por bit

Tabela 4.2: Características do acelerômetro triaxial ADXL335

Característica	Valor
Faixa de operação	$\pm 3,6g$
Sensibilidade	300 mV/g
Não linearidade	1% do fundo de escala
Sensibilidade entre eixos	1%
<i>Offset</i>	1.5 V
Banda	50 Hz (Cx,Cy e Cz = 100nF)
Ruído nos eixos X e Y	$150\mu g/\sqrt{\text{Hz}} = 1$ mg
Ruído no eixo Z	$300\mu g/\sqrt{\text{Hz}} = 2$ mg
Resolução (A/D de 10 bits)	10.7 mg por bit

Os sensores foram calibrados por uma Equação linear (linha de base e ganho) para cada eixo de modo a manter a compatibilidade do sistema proposto com os programas de processamento de dados anteriores, no entanto essa calibração é incapaz de corrigir erros provenientes do desalinhamento entre o sistema de coordenadas do barco e o sistema de coordenadas da unidade de medição inercial. Outras possíveis técnicas de calibração consistem em fazer uma regressão linear múltipla ou a determinação da matriz de rotação ótima.

4.1.2 Sensores de Ângulos de Remo

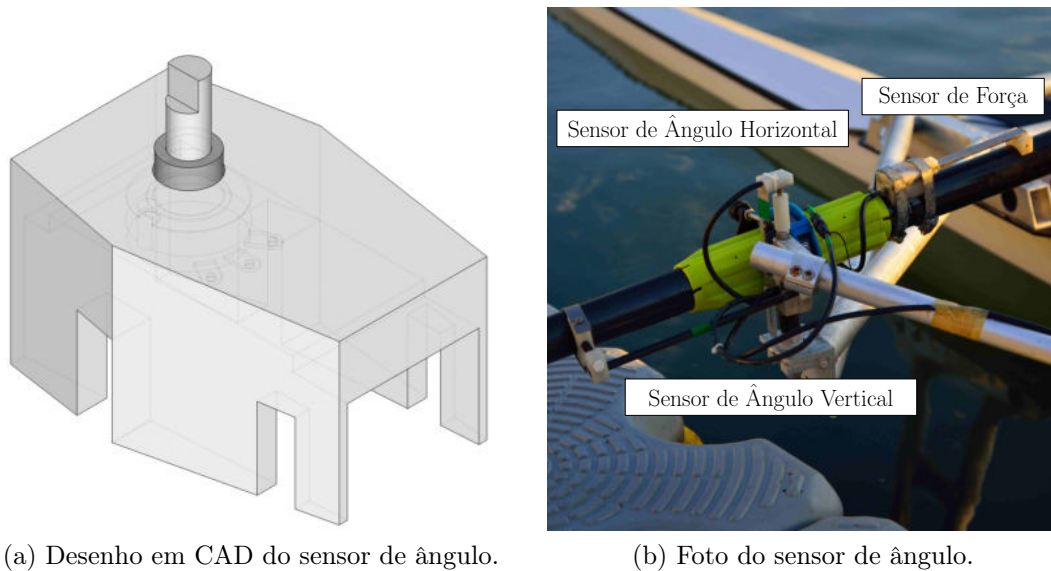
Os sensores de posição de ângulo horizontal e vertical foram desenvolvidos utilizando-se potenciômetros 248TBCF103A26A1 (CTS Eletrocomponents - EUA). Suas características são descritas na Tabela 4.3.

Tais potenciômetros foram montados em um peças construídas de nylon, aço inox e fibra de carbono que permitem a rápida fixação dos mesmos na forqueta. A Figura 4.2 apresenta os desenhos em CAD e a foto do sensor terminado. As convenções

Tabela 4.3: Características dos potenciômetros 248TBCF103A26A1

Característica	Valor
Ângulo de rotação máximo	250°
Faixa de operação	220°
Não linearidade	±2% do fundo de escala
Vida útil mecânica	2×10^6 de ciclos
Resistência elétrica	$10^4 \Omega$
Grau de proteção	IP67

de sentido utilizadas para os sensores de ângulo são: ângulo horizontal positivo na direção da proa e ângulo vertical positivo na direção de cima (Figura 4.3).



(a) Desenho em CAD do sensor de ângulo.

(b) Foto do sensor de ângulo.

Figura 4.2: Sensor de ângulo.

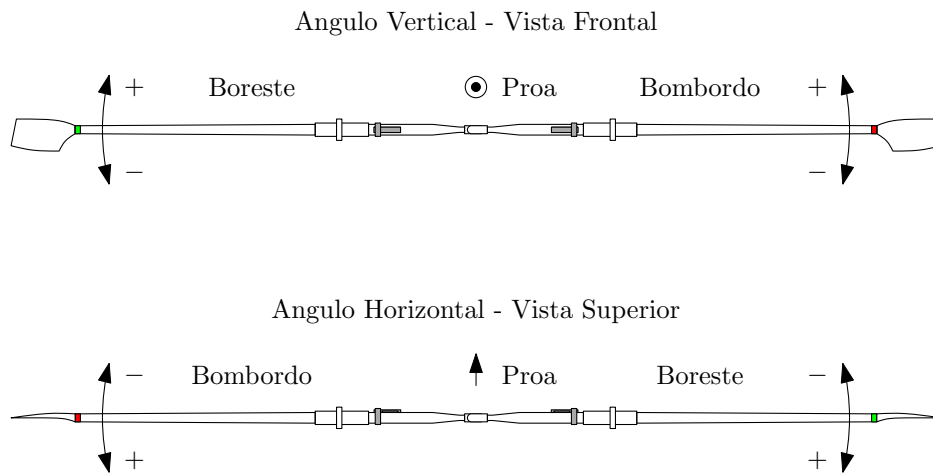


Figura 4.3: Convenção dos sentidos de ângulos utilizada.

A faixa de operação dos potenciômetros utilizados é de 220°. Para medida de ân-

gulo horizontal de remo, tipicamente na faixa de 100° a 120° pode ser feita a medida direta da tensão do divisor. O sensor de ângulo vertical com variações de menos de 10° dentro do ciclo da remada, produz um sinal de saída com amplitude da ordem de 100 mV, sendo necessária a amplificação de modo a utilizar mais adequadamente a faixa de operação do conversor A/D do sistema de aquisição. Esse circuito foi projetado usando um amplificador operacional OPA2350 (Texas Instruments - EUA), uma vez que estes são *rail-to-rail*, possibilitando a operação com uma tensão de alimentação simples de 3,3 V. O circuito possui dois trimpots para ajuste de ganho e offset. Ele foi montado em uma placa de circuito impresso a ser instalada dentro da caixa a prova d'água do sistema de aquisição.

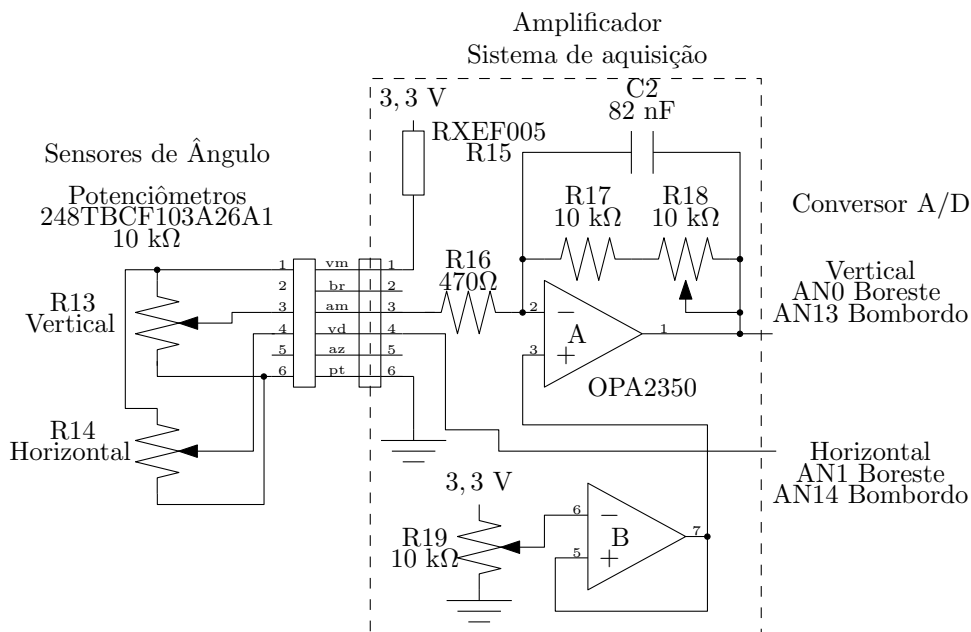


Figura 4.4: Diagrama esquema simplificado do circuito do amplificador de força. A versão completa encontra se no anexo A (Figura A.3).

4.1.2.1 Calibração

Os sensores de ângulo vertical de remo são calibrados em bancada, não requerendo nenhum ajuste especial. Já os sensores de ângulo horizontal precisam de ajuste de linha de base, pois o eixo do potênciometro pode assumir qualquer posição durante a montagem. O procedimento de calibração consiste em alinhar as forquetas em paralelo com o eixo proa-popa e registrar os sinais para ajuste posterior.

4.1.3 Sensores de Força Aplicada ao Remo

Os sensores de força foram desenvolvidos com base no sensor proposto por Kleshnev [31], que é fixado de forma temporária à alavanca interna do remo. O sensor consiste em uma célula de carga com extensômetros elétricos e a eletrônica associada. A

Figura 4.5 mostra uma representação da posição de montagem do sensor em um dos remos, bem como o diagrama de forças que atuam sobre o remo e a deflexão que o mesmo sofre. A montagem na alavanca interna do remo permite que o mesmo fique mais elevado em relação à linha d'água e facilita a conexão dos cabos durante a montagem dos remos no barco. Foi utilizado um sensor para medir força em apenas um eixo pois a chumaceira mantém o remo estável de forma que a força é aplicada em apenas uma direção.

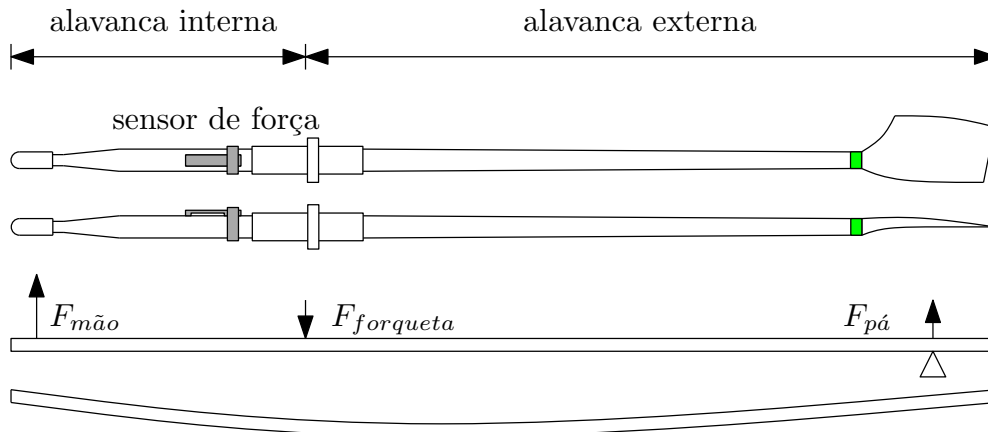


Figura 4.5: Representação do sensor de força fixado no remo, diagrama de forças e direção de deflexão do remo.

4.1.3.1 Projeto Mecânico

O projeto mecânico emprega uma haste em consola (ou cantilever), ou seja, fixa em apenas uma extremidade, para medir esforços de flexão. Tal estrutura, se comparada com uma configuração de haste duplamente apoiada ou duplamente engastada, tem como vantagens a maior robustez e sensibilidade; além de permitir o uso dos extensômetros em configuração de ponte completa.

Para uma haste em consola *cantilever* com comprimento L , largura b e altura h , a qual é aplicada uma força perpendicular F em sua extremidade livre, podemos calcular a tensão de cisalhamento (V) e o momento fletor (M_b) com as Equações 33 e 34.

$$V(x) = -F \quad (33)$$

$$M_b(x) = -F(L - x) \quad (34)$$

Podemos, com base no momento fletor, calcular a deflexão (ω) usando a Equação 35.

$$\omega(x) = \frac{-Fx^2(3L - x)}{6EI} \quad (35)$$

onde E é o módulo de elasticidade (ou Módulo de Young) do material e I é o momento de inércia da haste em relação ao eixo de dobra. De forma similar, calculamos o estresse sobre um ponto na superfície (σ) com a Equação 36.

$$\sigma(x) = \frac{M_b}{Z} = \frac{-6F(L - x)}{bh^2} \quad (36)$$

onde Z equivale ao módulo da seção do material. Por último, calculamos a deformação ε em uma fibra externa do material de acordo com a Equação 37.

$$\varepsilon(x) = \frac{\sigma}{E} = \frac{-6F(L - x)}{Ebh^2} \quad (37)$$

A Figura 4.6 apresenta uma representação da haste em cantilever e diagramas de tensão de cisalhamento (V), momento fletor (M_b), deflexão (ω), estresse sobre um ponto na superfície (σ) e deformação (ε) em função de x . Com base nesses gráficos concluímos que os extensômetros devem ser montados próximos da extremidade engastada ($x = 0$) para que se obtenha maior sensibilidade. Podemos ainda calcular a deflexão, estresse e deformação máximos com base nas Equações 38, 39 e 40, respectivamente.

$$\delta_{max} = \frac{FL^3}{3EI} = \frac{4FL^3}{Ebh^3} \quad (38)$$

$$\sigma_{max} = \frac{FL}{Z} = \frac{6FL}{bh^2} \quad (39)$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E} \quad (40)$$

O material escolhido para a fabricação da haste foi o aço inox, dado que o sensor ficaria diretamente exposto a água do mar. Foram usados extensômetros elétricos de alta elongação (Kyowa KFEL-5-120-C1), que admitem uma deformação máxima de até 15%. O projeto mecânico da célula de carga foi feito tendo em vista os esforços aos quais a mesma é submetida quando instalada no remo. Estimativas iniciais indicavam que a força máxima aplicada ao sensor era inferior a 80 N na condição de máxima força aplicada no remo, bem como a deformação (δ) é da ordem de 1 cm. Com base nesses dados o projeto da haste é feito escolhendo os valores de L , h e b de tal forma que, na condição de maior força admissível a deformação máxima seja inferior a máxima tolerada pelo extensômetro (ε_{adm}) e que o estresse máximo seja inferior ao limiar de escoamento do material da haste (σ_{yss}). A Tabela 4.4 apresenta os principais dados de projeto.

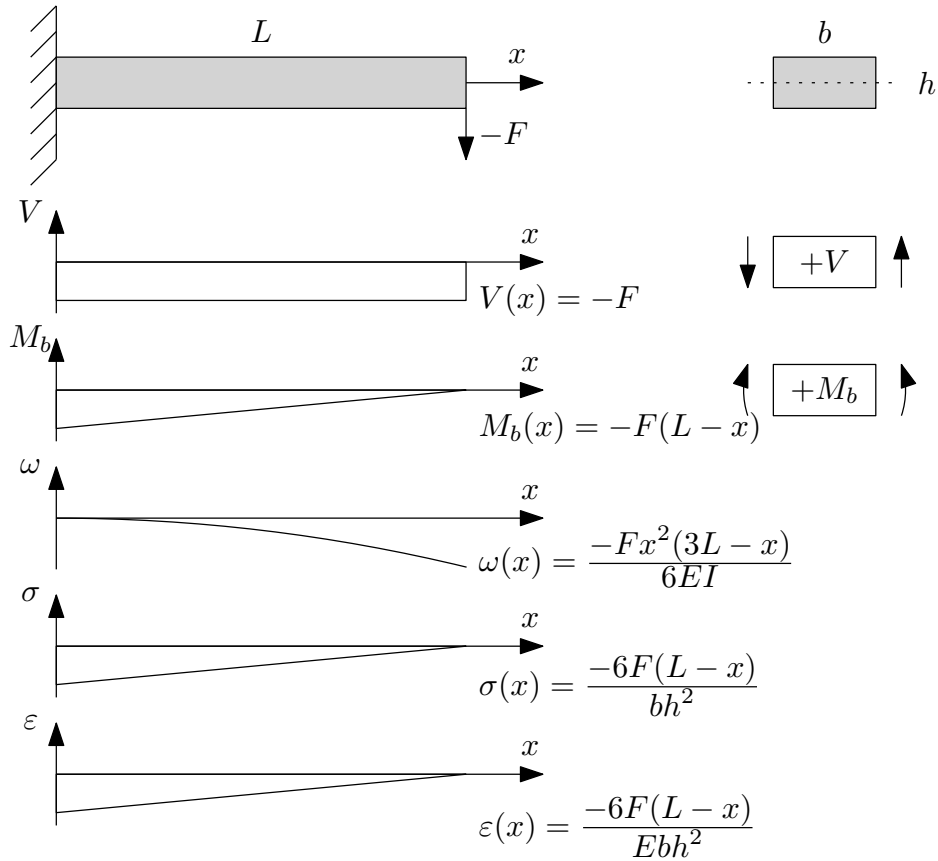


Figura 4.6: Variáveis do projeto mecânico do sensor de força: tensão de cisalhamento, momento fletor, deflexão, estresse e deformação para uma estrutura em cantilever.

Tabela 4.4: Dados de projeto do sensor de força

Variável	Valor	Descrição
F_{tip}	800 N	Força típica aplicada no remo pelo remador [31]
F_{max}	80 N	Força máxima admissível no sensor
L_{max}	40 cm	Comprimento útil da alavanca interna do remo
E_{ss}	180 GPa	Modulo de elasticidade do aço inox
σ_{yss}	860 MPa	Limiar de escoamento do aço inox
ε_{adm}	0,15 m/m	Deformação máxima admissível pelo extensômetro
G	2,1	Fator de gauge
l_{base}	11,5 mm	Comprimento total do extensômetro
l	5 mm	Comprimento efetivo do extensômetro

A partir desses dados escolhemos $L = 125mm$, $b = 12mm$ e $h = 3mm$, de modo que o limiar de escoamento (Equação 41) e a deformação máxima admissível (Equação 42) sejam respeitadas.

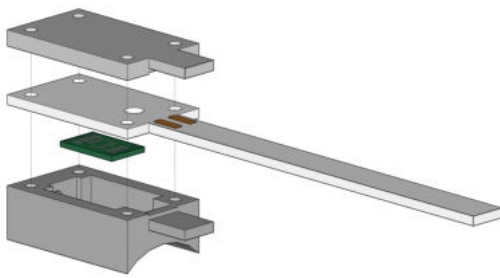
$$\sigma_{max} = \frac{6FL}{bh^2} = \frac{6 \times 80 \times 0,125}{0,012 \times (0,003)^2} = \frac{60}{1,08 \times 10^{-7}} = 555,5 MPa < \sigma_{y_{ss}} \quad (41)$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E} = \frac{5,555 \times 10^8}{1,80 \times 10^{11}} = 0,031 m/m < \varepsilon_{adm} \quad (42)$$

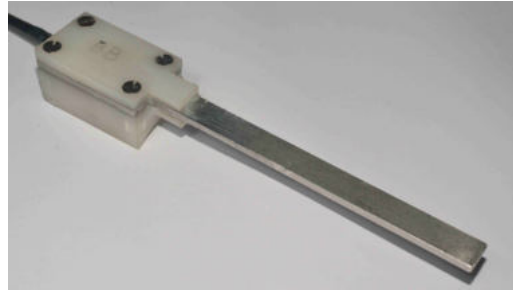
Para a situação de força máxima a deflexão pode ser calculada com a Equação 43.

$$\delta_{max} = \frac{4FL^3}{Ebh^3} = \frac{4 \times 80 \times (0,125)^3}{1,80 \times 10^{11} \times 0,012 \times (0,003)^3} = 10,7 mm \quad (43)$$

A Figura 4.7 apresenta os desenhos em CAD (*Computer Aided Design* - Desenho Assistido por Computador), bem como a foto do sensor terminado. A haste foi usinada à partir de uma chapa de aço inox de 3 mm de espessura e foram usadas duas tampas de nylon que fornecem vedação aos extensômetros, amplificador e fiação. A tampa inferior possui uma superfície curva que aumenta a área de contato do sensor com o remo, proporcionando uma montagem mais resistente.



(a) Vista explodida do sensor.



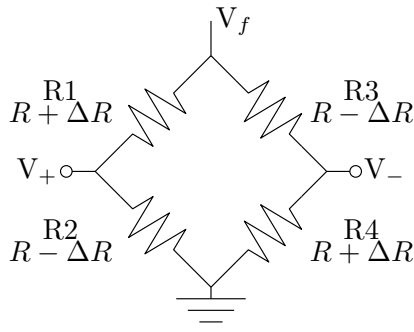
(b) Foto do sensor montado.

Figura 4.7: Desenhos em CAD e foto do sensor de força.

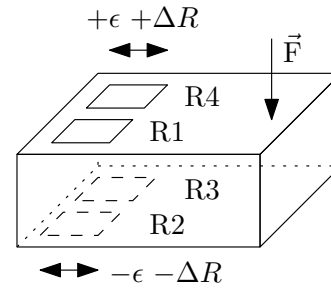
4.1.3.2 Projeto Eletrônico

O circuito eletrônico é composto pelos extensômetros em ponte completa e pelo circuito de amplificação e condicionamento de sinais. Os extensômetros foram montados em uma ponte de Wheatstone, conforme o esquema apresentado na Figura 4.8. Os extensômetros foram colados de forma alternada (Figura 4.8b) de modo que a ponte fosse sensível à flexão da haste.

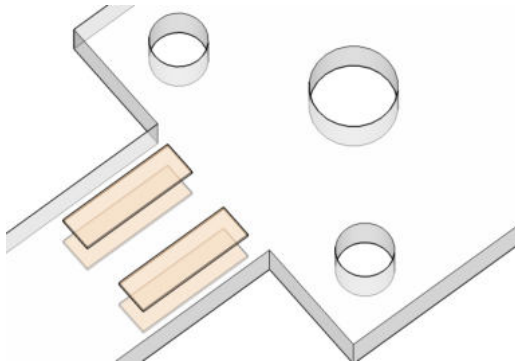
A tensão de saída da ponte de Wheatstone pode ser estimada de acordo com a Equação 44. Nesta análise foram desprezados a deformação de Poisson e o coeficiente térmico devido à baixa sensibilidade dos extensômetros fora do eixo principal e a montagem em ponte completa.



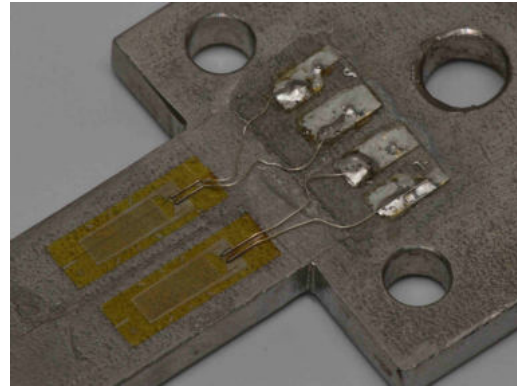
(a) Diagrama do circuito da Ponte de Wheatstone.



(b) Representação da posição de montagem dos extensômetros [7].



(c) Detalhe dos pontos de fixação no modelo em CAD.



(d) Foto dos extensômetros colados na haste.

Figura 4.8: Esquema de montagem dos extensômetros.

$$\begin{aligned}
 V_o &= V_+ - V_- \\
 &= V_f \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) - V_f \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \\
 &= V_f \left\{ \left[\frac{R - \Delta R}{(R - \Delta R) + (R + \Delta R)} \right] - \left[\frac{R + \Delta R}{(R + \Delta R) + (R - \Delta R)} \right] \right\} \quad (44) \\
 &= V_f \left[\left(\frac{R - \Delta R}{2R} \right) - \left(\frac{R + \Delta R}{2R} \right) \right] \\
 &= V_f \left(\frac{-2\Delta R}{2R} \right) = V_f \left(\frac{-\Delta R}{R} \right) = -V_f G \epsilon
 \end{aligned}$$

onde G é o fator de gauge, que é de 2,1 para o modelo escolhido (Kyowa KFEL-5-120-C1) e V_f é a tensão de alimentação da ponte de 3,3 V. Para calcular a variação de comprimento total sofrida pelo extensômetro em função da força aplicada, calculamos a integral definida da deformação (Equação 37) ao longo do comprimento do extensômetro. Os limites de integração p e q representam as extremidades da grade de medição do extensômetro, conforme pode ser visto na representação da

secção longitudinal da haste (Figura 4.9). Dessa forma a variação de comprimento é descrita pela Equação 45.

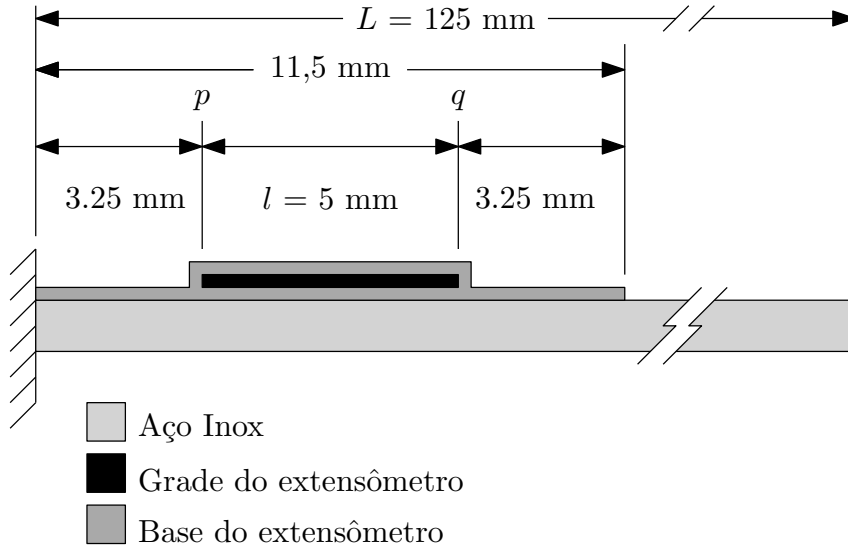


Figura 4.9: Diagrama da secção longitudinal da haste com extensômetro, detalhando a posição exata da grade.

$$\begin{aligned}
 \Delta l &= \int_p^q \varepsilon(x) dx \\
 &= \int_p^q \frac{-6F(L-x)}{Ebh^2} dx \\
 &= \frac{-6F}{Ebh^2} \int_p^q (L-x) dx \\
 &= \frac{-3F(p-q)(p+q-2L)}{Ebh^2}
 \end{aligned} \tag{45}$$

Podemos então calcular a deformação sofrida pelo extensômetro dividindo sua variação de comprimento por seu comprimento original (Equação 46).

$$\begin{aligned}
 \epsilon &= \frac{\Delta l}{l} = \frac{-3F(a-b)(a+b-2L)}{Ebh^2 l} \\
 &= \frac{-3F(p-q)(p+q-2L)}{Ebh^2(p-q)} \\
 &= \frac{3F(p+q-2L)}{Ebh^2}
 \end{aligned} \tag{46}$$

Substituindo a Equação 46 na Equação 44 obtemos a Equação 47, que fornece a tensão de saída da ponte de Wheatstone em função da força aplicada.

$$\begin{aligned}
V_o &= -V_f G \epsilon = \frac{3V_f G(2L - p - q)}{Ebh^2} F \\
&= \frac{3,3 \times 2,1 \times [(2 \times 0,125) - 0,00325 - 0,00825]}{180 \times 10^9 \times 0,012 \times (0,003)^2} F \\
&= \frac{4,958415}{19440} F \\
&= 0,0002550625 F [V]
\end{aligned} \tag{47}$$

Por fim, a sensibilidade é descrita pela Equação 48.

$$S = \frac{V_o}{F} = 255,06 \mu V/N \tag{48}$$

A partir desse valor de sensibilidade projetamos o circuito de amplificação e condicionamento de sinais de modo a filtrar os sinais provenientes dos sensores e utilizar de maneira mais eficiente a faixa dinâmica do conversor A/D. Foi utilizada uma topologia de amplificador com dois estágios, e seu diagrama esquemático simplificado é mostrado na Figura 4.10.

O primeiro estágio foi montado em uma placa de circuito impresso dentro do corpo dos sensores, conforme pode ser visto na Figura 4.7b. Tal abordagem teve por objetivo reduzir o comprimento dos cabos dos extensômetros de modo a reduzir o ruído. Esse estágio utiliza um amplificador de instrumentação INA118 (Burr-Brown/Texas Instruments - EUA) e seu ganho é determinado pela Equação 49 .

$$A_{v1} = 1 + \frac{50k\Omega}{R5} = 1 + \frac{50k\Omega}{1k\Omega} = 51 V/V \tag{49}$$

O primeiro estágio utiliza uma configuração de alimentação simples, ou seja, necessita apenas de alimentação positiva de 5 V. Para isso é necessário aplicar uma tensão de 2,5 V na entrada de compensação de offset (pino 5), de modo que a saída do primeiro estágio tenha excursão simétrica. Foi utilizado um divisor feito com dois resistores, R6 e R7, de 10 kΩ, SMD com encapsulamento 0805, uma vez que não havia espaço dentro sensor para uma um circuito mais complexo. O uso de um divisor resistivo no lugar de uma fonte de tensão de referência com baixa impedância de saída resulta em uma discreta redução da CMRR (*Common-Mode Rejection Ratio* - Razão de Rejeição de Modo Comum) [44].

O segundo estágio do amplificador de força foi montado na placa de interface, dentro do sistema de aquisição e foi construído com o circuito integrado OPA2350 (Texas Instruments - EUA), que consiste em dois amplificadores operacionais *rail-to-rail*. De forma similar ao primeiro estágio, a alimentação dos amplificadores é simples de 3,3 V. Um dos amplificadores foi utilizado em configuração de amplifica-

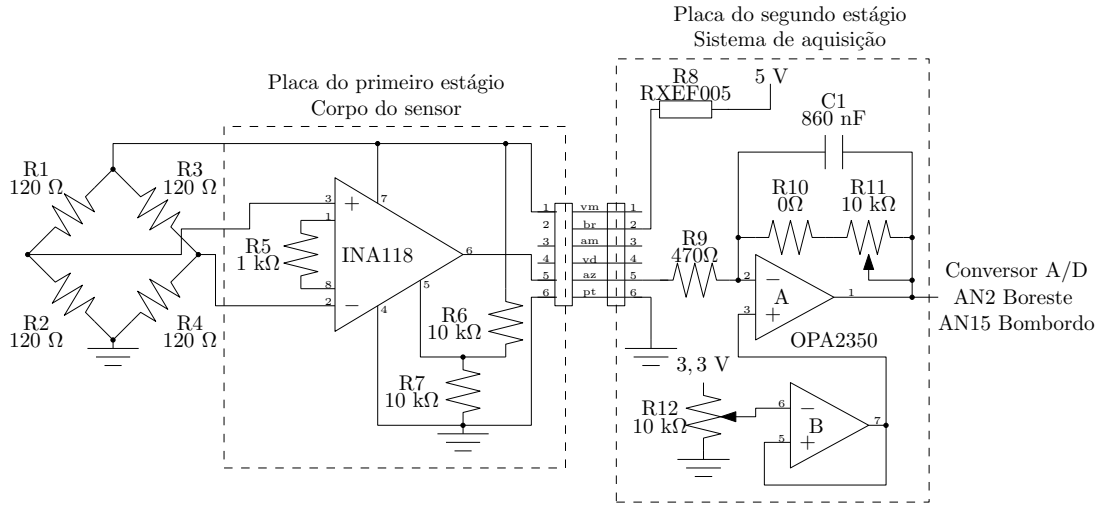


Figura 4.10: Diagrama esquema simplificado do circuito do amplificador de força. A versão completa encontra se no anexo A (Figuras A.1 e A.3).

dor inversor cujo ganho foi estimado pela Equação 50, de modo a aproveitar mais adequadamente a faixa de operação do conversor A/D. Note que só foi considerada excursão positiva (0 a 80 N), dado que o sensor só deve medir força em um sentido

$$Av_2 = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{Av_1 \times S \times F_{max}} = \frac{3,3V}{51 \times 255,06 \times 10^{-6} \times 80} = \frac{3,3V}{1,04} = 3,171V/V \quad (50)$$

As Equações 51 e 52 apresentam o cálculo de R11 e da frequência de corte do filtro passa baixa. Esse filtro é utilizado apenas para estabilização eletrônica e não interfere na banda do sinal de interesse e também não atua como filtro *anti-aliasing* para a frequência de amostragem de 100 Hz.

$$|Av_2| = \frac{R10 + R11}{R9} \therefore R11 = |Av_2|R9 - R10 = 3,171 * 470 - 0 = 1490\Omega \quad (51)$$

Esse valor de R11 foi implementado com um trimpot de 10kΩ para permitir eventuais ajustes de ganho do amplificador.

$$f_c = \frac{1}{2\pi(R10 + R11)C1} = \frac{1}{2\pi \times 1490 \times 470 \times 10^{-9}} \quad (52)$$

$$= \frac{1}{4,19 \times 10^{-3}} = 227,26\text{Hz}$$

O outro amplificador operacional do OPA2350 (B) foi utilizado como *buffer*, cuja entrada é ligada um divisor de tensão feito com um *trimpot* multivolta de 10 kΩ para permitir ajuste do *offset* de saída.

4.1.3.3 Calibrador de Força e Procedimento de Calibração

O sensor de força descrito foi projetado para permitir que o mesmo fosse montado de forma temporária em qualquer remo de palamenta dupla e medir a deformação sofrida por uma secção do remo quando o mesmo é submetido a uma força. Como as características mecânicas do remo são desconhecidas é necessário um procedimento de calibração do conjunto sensor-remo de modo a se obter a relação matemática que converta o valores de tensão na sua saída na força medida. O procedimento consiste em apoiar o remo pelo anel e pela pá, de modo a deixá-lo estável e aplicar uma força na alça do calibrador de força, conforme a Figura 4.11.

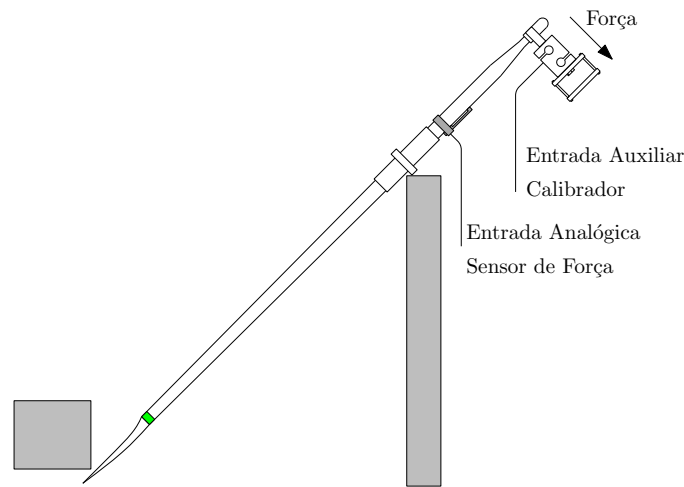


Figura 4.11: Esquema do procedimento de calibração dos sensores de força.

O calibrador de força consiste de uma célula de carga comercial e um circuito de amplificação e condicionamento de sinais. Foi escolhida uma célula de carga para medição de tração/compressão modelo SV-200 (Alfa Instrumentos, Brasil). A Tabela 4.5 sumariza as suas principais características:

Tabela 4.5: Características da célula de carga SV-200

Característica	Valor
Carga nominal	2000 N
Carga máxima admissível	< 3000 N
Sensibilidade	2 mV/V
Erro (% da saída para carga nominal)	< 0,03 %
Resistência elétrica	350 Ω
Rosca dos parafusos	M12x1,75

O circuito de condicionamento associado a célula de carga utiliza uma topologia similar à utilizada pelo sensor de força. O circuito é ligado ao sistema de aquisição pelo canal analógico AN6. As Figuras A.2 e B.2 apresentam os desenhos da placa

de condicionamento. O circuitito possui ajuste de ganho e linha de base por meios de trimpots. O ganho máximo é de 15000 V/V e frequência de corte de 7 Hz.

4.1.4 Sensores de Posição Linear de Tronco e Carrinho

Uma versão anterior do protótipo dos sensores de tronco e carrinho foi apresentada no XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica [37]. Tal versão utilizava potenciômetros multivolta ligados a um carretel e a uma mola espiral. As limitações desse protótipo estavam associadas ao grande diâmetro do carretel necessário, devido à limitação de número de voltas do potenciômetro. Na ocasião foi proposto o uso de um encoder óptico.

Foi desenvolvido uma nova versão desses sensores que emprega *encoders* ópticos incrementais E6A2-CW3C (Yumo Corporation, China) com duas saída em quadratura e 200 pulsos por volta (Figura 4.12).



Figura 4.12: Encoder óptico E6A2-CW3C.

A montagem mecânica emprega um carretel montado em um mancal rolamentado de modo a reduzir o atrito e aumentar a durabilidade do sensor. Uma das extremidades do eixo do carretel é ligada ao *encoder* por meio de um acoplador flexível. A outra extremidade é conectada a uma mola espiral. A Figura 4.13 apresenta o desenho em CAD do sensores.

Em testes anteriores se observou uma velocidade linear máxima (v_{Max}) para tronco e carrinho da ordem de 2 m/s [37]. Dessa forma podemos calcular a velocidade angular máxima (ω_{Max}) registrada pelo encoder é dada pela Equação 54.

$$\omega_{max} = \frac{v_{max}}{d\pi} = \frac{2}{0.03\pi} = 21,22 \text{ revoluções por segundo} \quad (53)$$

onde d equivale ao diâmetro do carretel.

Para o encoder em quadratura ocorrem 4 transições de nível lógico por pulso totalizando 800 transições volta. A Equação 54 permite calcular o período mínimo entre as transições de estado do encoder

$$T_{min} = \frac{1}{p_p \times p_v \times \omega_{max}} = \frac{1}{4 \times 200 \times \omega_{max}} = \frac{1}{16976} = 58,9 \mu s \quad (54)$$

onde p_v equivale ao número de pulsos por volta e p_p e equivale ao número de transições lógicas por pulso.

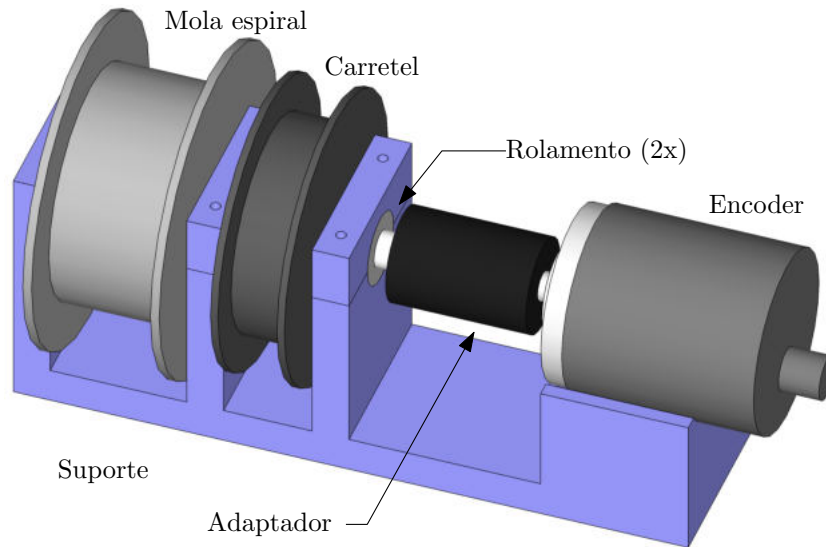


Figura 4.13: Desenho em CAD do corpo dos sensores de posição linear.

Os sensores foram montados em caixas seladas, exceto pelo furo para passagem do fio de nylon. Essas caixas possuem ainda quatro ventosas em sua face inferior para facilitar a fixação da mesma no barco. O sensor de posição de carrinho é fixado no espaço entre o final do trilho e o castelo de proa. A ponta do fio de nylon é fixada ao carrinho usando uma braçadeira plástica descartável. O sensor de posição de tronco é montado no casco de proa do barco, do lado de fora do castelo. O fio passa por uma roldana com altura ajustável fixada a um mastro de fibra de carbono, que por sua vez é fixado à embarcação por uma ventosa e três cabos, presos à bola de proa e aos quintos braços de ambos os bordos. A Figura 4.14 apresenta os sensores montados no barco.

4.1.4.1 Calibração

A calibração dos sensores de posição é feita em 4 etapas, descritas na Figura 4.15. Inicialmente o cabo do sensor de posição de carrinho é ligado ao carrinho, de modo que a mola puxa ele até o final do trilho. O sensor de posição tronco é deixado solto (Figura 4.15a) e o sistema de aquisição é ligado de modo que essas posições sejam registradas como zero. A seguir o sensor de posição tronco é ligado ao carrinho (Figura 4.15b) e desloca-se o carrinho por todo o curso do trilho (Figura 4.15c). Por fim a ponta do sensor de tronco é solto do carrinho e preso às costas do remador (Figura 4.15d).

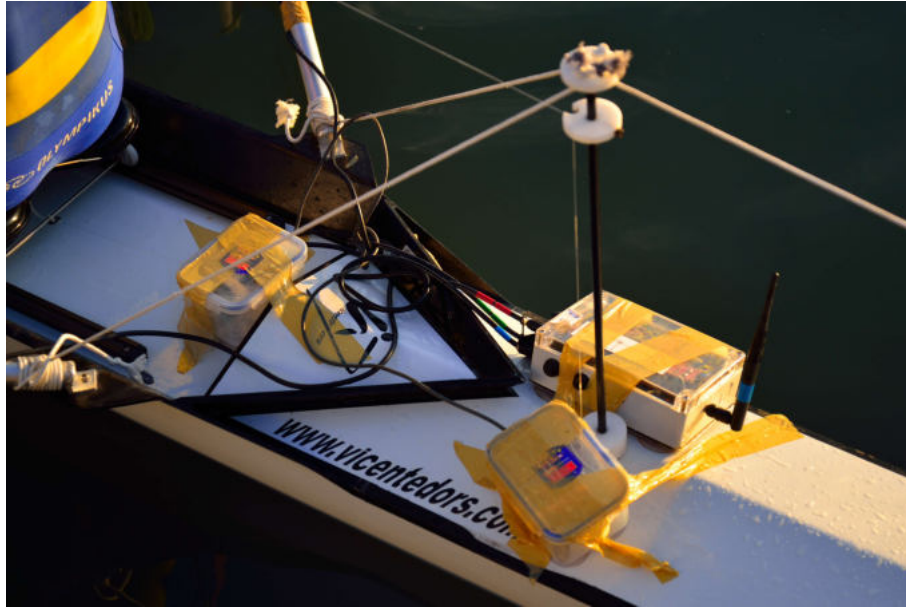


Figura 4.14: Montagem do sistema de aquisição e dos sensores de posição linear.

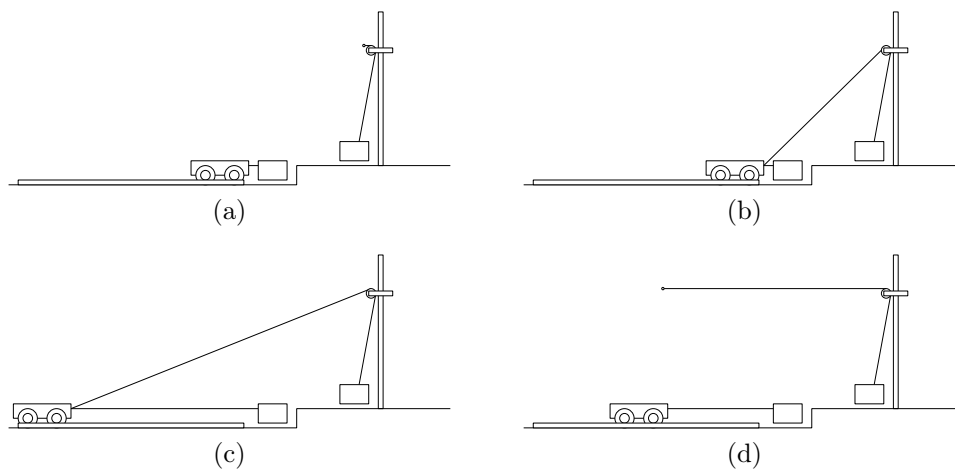


Figura 4.15: Calibração dos sensores de posição.

4.2 Sistema de aquisição e telemetria desenvolvido

A partir dos requisitos de projeto desenvolvidos com base nos Capítulos 1 e 3, bem como as Seções 4.1.1 a deste Capítulo, foram definidas as especificações do sistema de aquisição. O mesmo deve ser capaz de armazenar ao menos 15 canais de entrada, de modo a comportar os seguintes sensores: força, ângulo horizontal e vertical para ambos os bordos, acelerômetros e giroscópios triaxiais, GPS e sensores de posição de tronco e carrinho. Cada canal deve ser amostrado a uma taxa de 100 amostras por segundo. O sistema deve ser capaz de registrar os sinais por um período de até 4h e deve ser resistente à água salgada e a corrosão.

A figura 4.16 apresenta as fotos do sistema de aquisição. Nas seções subsequentes (4.2.1 e 4.2.5) são detalhados o projeto do circuito eletrônico e do *firmware*.

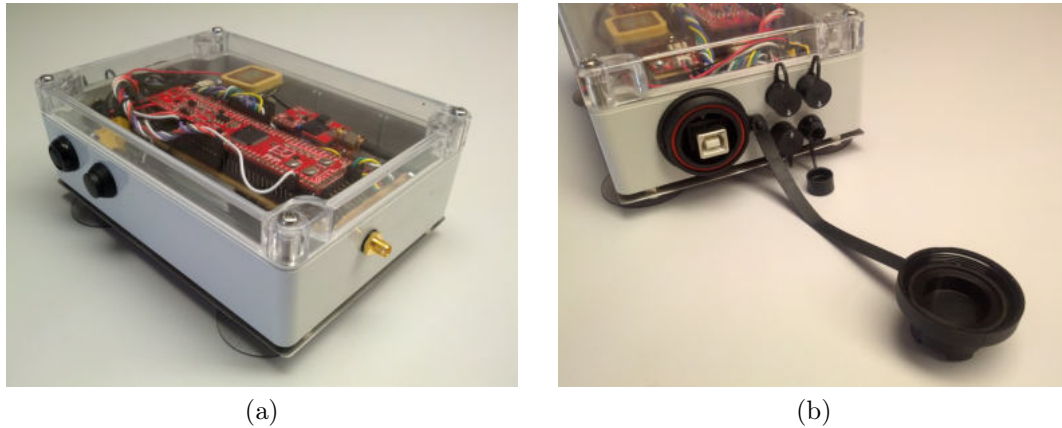


Figura 4.16: Sistema de aquisição.

4.2.1 Projeto Eletrônico

O sistema de aquisição tem por objetivo gravar e transmitir os dados dos sensores. A Figura 4.17 apresenta a visão geral dos principais blocos que o compõe, bem como as conexões entre eles.

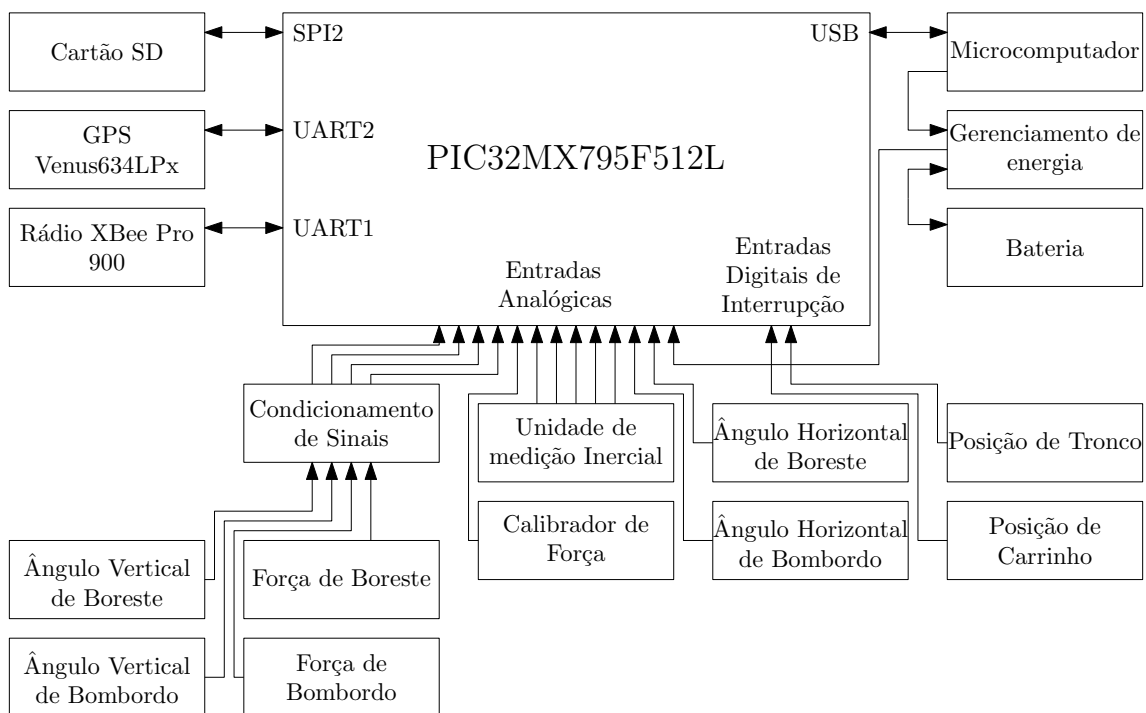


Figura 4.17: Visão geral do sistema de aquisição.

O componente principal do sistema de aquisição é o microcontrolador PIC32MX795F512L (Microchip Technology, EUA). A Tabela 4.6 mostra as características mais relevantes desse componente. Como este componente possui apenas versões de encapsulamento SMD (*Surface Mount Device* - dispositivo de montagem de superfície), foi utilizada uma placa de desenvolvimento UBW32 (DEV-09713 -

Sparkfun Eletronics, EUA), mostrada na Figura 4.18.

Tabela 4.6: Características microcontrolador PIC32MX795F512L

Característica	Valor
Frequência	80 MHz, 1 instrução por ciclo
Memória de Programa	512 KB
Memória de Dados	128 KB
Pinos de entrada/saída	85
Temporizadores	5
Portos de comunicação	1 USB, 6 UART, 4 SPI, 5 I2C
Entradas Analógicas	16, com resolução de 10 bits
Encapsulamentos	TQFP-100 , VTLA-123, XBGA-121

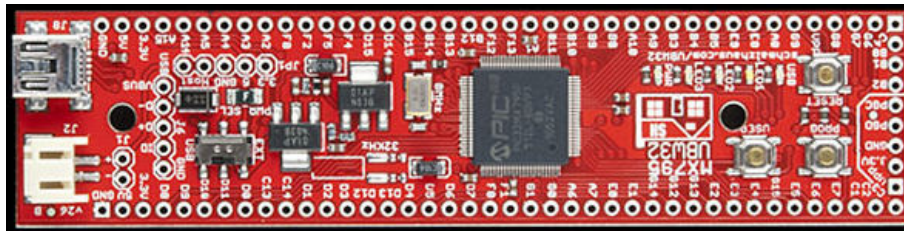


Figura 4.18: Placa de desenvolvimento UBW32 (DEV-09713).

A gravação dos dados foi feita em cartão de memória micro SD de 2 GB formatado em FAT (*File Allocation Table* - Tabela de Alocação de Arquivos) 16. Foi utilizado o protocolo de comunicação SPI (*serial peripheral interface* - interface de periférico serial), empregando para tanto o porto SPI2 do microcontrolador. A velocidade de transmissão usando esse protocolo simples é limitada em centenas de kilobytes por segundo. Existem outros protocolos proprietários para comunicação com o cartão que possibilitam velocidades mais altas, em especial o modo de barramento de quatro bits. Para essa aplicação especificamente, o tempo gasto pelo processador para geração do CRC (*Cyclic Redundancy Check* - Verificação de Redundância Cíclica) para cada operação de leitura e escrita supera a vantagem de utilizar um barramento mais largo e rápido. A conexão elétrica do cartão de memória foi feita usando uma placa adaptadora BOB-00544 (Sparkfun, EUA), apresentada na Figura 4.19. A Tabela A.1, no Apêndice A apresenta o mapa de conexões entre o microcontrolador, placa adaptadora e cartão de memória.

Os dados provenientes dos sensores inerciais, de ângulo, força, calibrador de força e tensão de bateria foram amostrados e convertidos pelo A/D (*Analog-to-Digital Converter* - Conversor Analógico-Digital) interno do microcontrolador. Esse conversor possui um multiplexador analógico programável para 16 entradas e resolução de 10 bits. As referências de tensão do valor 0 e do valor 1023 foram fixadas às

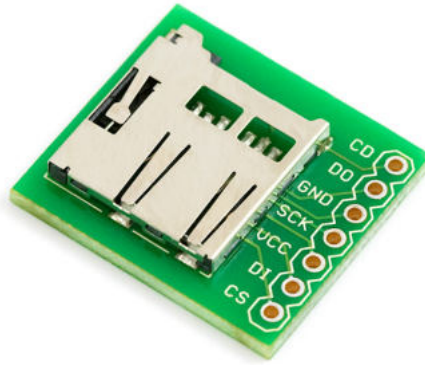


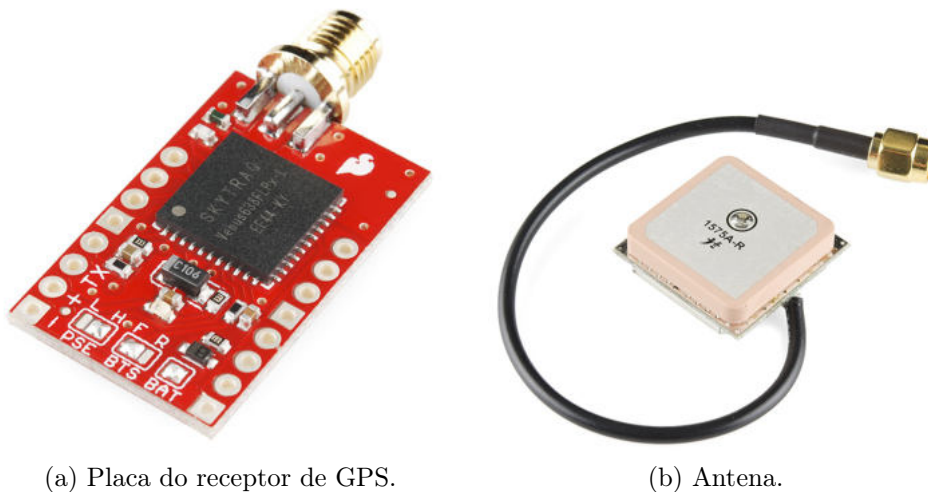
Figura 4.19: Placa adaptadora para cartão micro SD BOB-00544.

barras de alimentação de 3,3 V e 0 V, respectivamente. A Tabela A.2 (Apêndice A) apresenta as conexões entre os sinais provenientes dos sensores/placa de interface.

Os sensores de posição de tronco e carrinho foram ligados em pinos de entrada e saída digitais com capacidade de disparar uma interrupção a cada transição de nível lógico. A Tabela A.2 contém o mapa de conexões das portas de encoder. O funcionamento dessas entradas é detalhado nas seções 4.2.5 e 4.1.4.

Foi utilizado um receptor de GPS Venus634LPx, que possui frequência de atualização de até 20 Hz, utilizado em conjunto com uma antena ativa com ganho de 26 dB. O GPS foi ligado ao microcontrolador pelo porto UART2 (*Universal Asynchronous Transceiver* - Transmissor e Receptor Universal Assíncrono), com padrão de transmissão de 8 bits, com um stop bit utilizando uma taxa de sinalização de 115200 bits/s.

A Figura 4.20 e a Tabela A.3 (Apêndice A) apresentam, respectivamente, componentes do receptor de GPS e as conexões do mesmo com o microcontrolador.



(a) Placa do receptor de GPS.

(b) Antena.

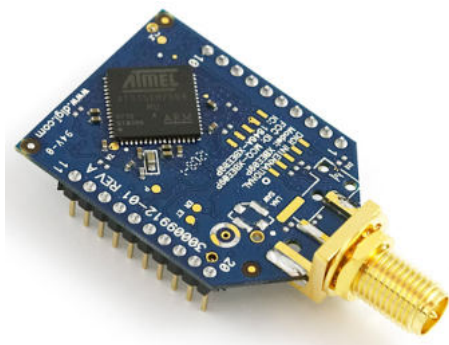
Figura 4.20: Componentes do receptor de GPS.

4.2.2 Telemetria

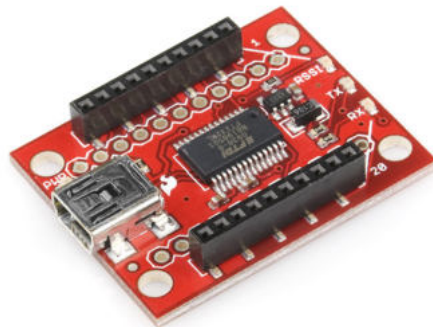
Como existe uma impossibilidade de se estabelecer um enlace a uma distância de 2 km, o que permitiria transmitir os dados até a margem, optou se por utilizar um *modem* com potência suficiente apenas para transmitir por poucas centenas de metros para a lancha dos treinadores.

O *modem* e transmissor/receptor de rádio escolhido foi o XBee Pro 900 RPSMA (Digi International - EUA) com taxa de transferência máxima de 156 Kbps e potência de 50 mW. O mesmo possui certificado de homologação junto a ANATEL sob o número de registro 3349-13-1209 com validade até 08 de outubro de 2015. Foi utilizado um par de rádios em conjunto com um par de antenas W1063 (Pulse Electronics - EUA) com ganho de 3,0 dBi. Um dos rádios foi instalado dentro do sistema de aquisição, e se comunica com o porto UART1 do microcontrolador usando uma transmissão de 8 *bits*, com um stop *bit* e taxa de sinalização de 230400 bits/s. A Tabela A.4 (Apêndice A) apresenta as conexões com o microcontrolador.

O outro rádio foi ligado a um microcomputador usando uma conversor USB-Serial especialmente desenvolvido para os rádios XBee (XBee Explorer USB - Sparkfun Electronics, EUA). A Figura 4.21 mostra a foto do *Modem* de rádio, placa adaptadora e antena utilizados.



(a) *Modem* de rádio XBee Pro 900.



(b) XBee Explorer USB.



(c) Antena W1063.

Figura 4.21: Componentes do transmissor/receptor de rádio.

4.2.3 Gerenciamento de Energia

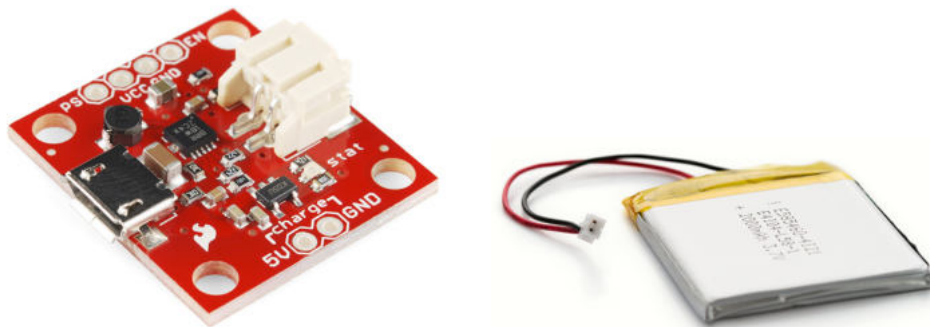
O sistema de aquisição é alimentado por uma bateria interna carregada pela porta USB de um microcomputador. O gerenciamento de carga e descarga da bateria é

feito pelo circuito integrado MCP73831 (Microchip Technology, EUA), e sua saída é elevada para 5 V por conversor *boost* TPS61200 (Texas Instruments, EUA). Ambos os integrados fazem parte de uma placa adaptadora PRT-11231 (Sparkfun Electronics, EUA). O barramento de 5 V é usado por alguns sensores, e convertido para 3,3 V por um regulador LM317M (Texas Instruments, EUA) presente na placa UBW32.

A bateria utilizada é feita de polímeros de íons de lítio, com tensão nominal de 3,7 V e capacidade de carga de 2000 mAh (PRT-08483 - Sparkfun Eletronics, EUA). A Figura 4.22 mostra os componentes do sistema de gerenciamento de energia.

O controle de liga/desliga do circuito é feito pelo pino de controle EN do conversor *boost*. Ao ligar esse pino a 0 V o conversor entra em estado de hibernação, desligando todo o sistema. Esse pino de controle foi ligado ao circuito mostrado na Figura 4.23, de modo que quando a chave é fechada a alimentação do sistema é desligada. O controle proveniente do microcontrolador é utilizado para inibir a ação da chave, impedindo que o sistema seja desligado acidentalmente durante a gravação.

O sensor de carga da bateria consiste em um divisor resistivo ligado à entrada analógica AN12 do microcontrolador, conforme detalhado pela Figura 4.24.



(a) Placa adaptadora PRT-11231
Power Cell - LiPo Charger/Booster.

(b) Bateria de polímeros de lítio.

Figura 4.22: Componentes do sistema de gerenciamento de energia.

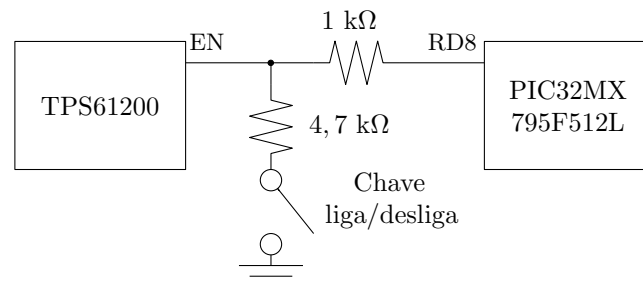


Figura 4.23: Circuito da chave liga/desliga.

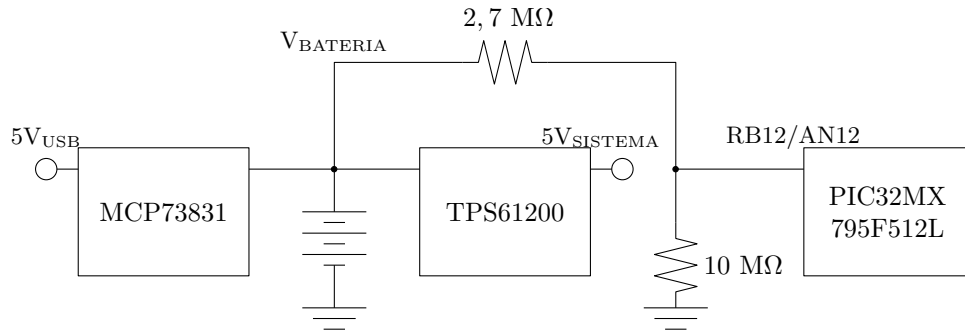


Figura 4.24: Circuito do sensor de bateria.

4.2.4 Resistência a Água

Os componentes descritos acima foram montados em uma caixa com dimensões 170,99 mm de largura; 55,00 mm de altura e 121,01 mm de profundidade; que atende às normas IP65, IP66, IP67, NEMA 1,2,4,4X,12,13 e UL-508. Foram abertos 8 furos na caixa para instalação de um botão com retenção para controle de liga/desliga, um botão de ação momentânea normalmente aberto para controle inicia/para, um conector USB, quatro conectores de seis vias para ligação com os sensores e um conector SMA de antepara para ligação da antena. Todos atendem a norma IP67, e dessa forma todo o sistema é resistente a imersão em água em profundidade inferior a 1 m.

Para proteção adicional, as saídas de 3,3 V e 5 V para os sensores externos possuem um fusível térmico rearmável RXEF005 (TE Connectivity, Suíça) em série. Tal componente apresenta baixa resistência elétrica durante a operação normal, mas limita a corrente de curto em 50 mA, protegendo o sistema de aquisição em caso de curto circuito provocado por perda de estanqueidade no sensores externos, seus cabos e conectores.

4.2.5 *Firmware*

O firmware utiliza uma laço principal e 6 rotinas de interrupção para tratar eventos dos periféricos (temporizadores, portos de comunicação serial com rádio, GPS e encoders), de modo a realizar todas as tarefas no tempo necessário. A ordem de prioridade das chamadas de interrupção levou em conta a frequência esperada de chamadas, a duração da rotina e tolerância a atrasos e perdas de cada rotina de tratamento de interrupção (Figura 4.26).

O laço principal pode ser observado em detalhes na Figura 4.26. Note que quando o sistema de aquisição é conectado a um microcomputador por sua porta USB a aquisição é interrompida de forma segura e o firmware passa a operar unicamente no modo USB. Nesse modo, o cartão de memória é montado como um volume removível de armazenamento (*pen drive*).

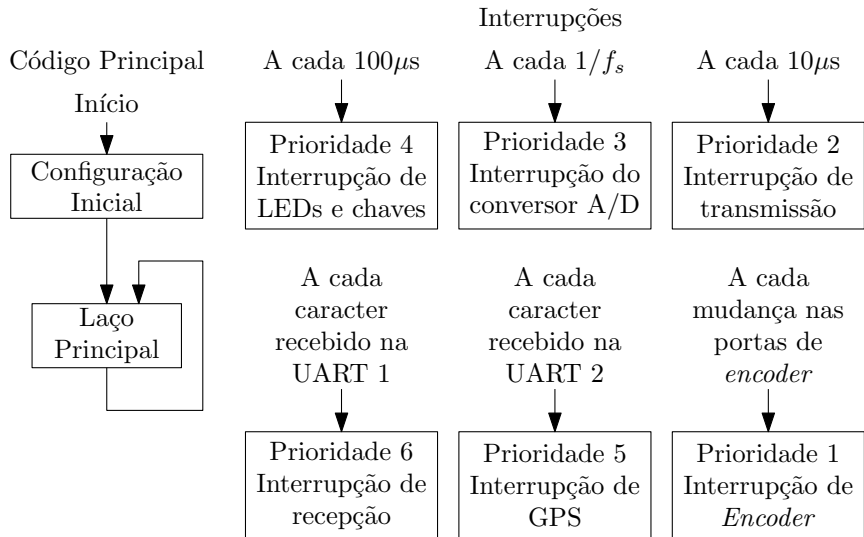


Figura 4.25: Visão geral do *firmware*.

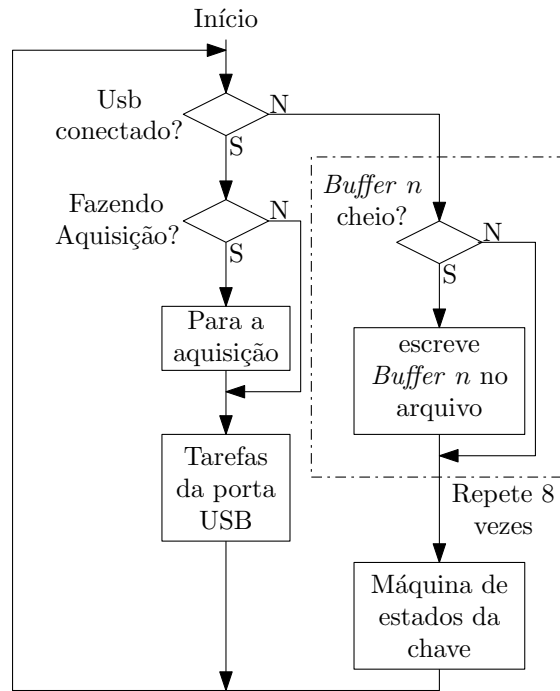


Figura 4.26: Fluxograma do laço principal do firmware.

Devido ao alto custo da chave IP67 optou-se pelo uso de uma interface com apenas um botão para iniciar e terminar a aquisição. Para tanto foi utilizada a máquina de estados descrita pela Figura 4.27. A máquina de estados da chave tem por objetivo obrigar que o sistema execute inteiramente as rotinas de início e término da aquisição, assegurando, assim, a correta criação, abertura, leitura, escrita e fechamento dos arquivos de dados.

A interrupção de *encoder* é chamada a cada transição de nível lógico dos pinos de saída dos *encoders*. Foi implementada uma máquina de estados para monitorar a evolução dos pares de pinos associados a cada entrada de *encoder*, apresentado na

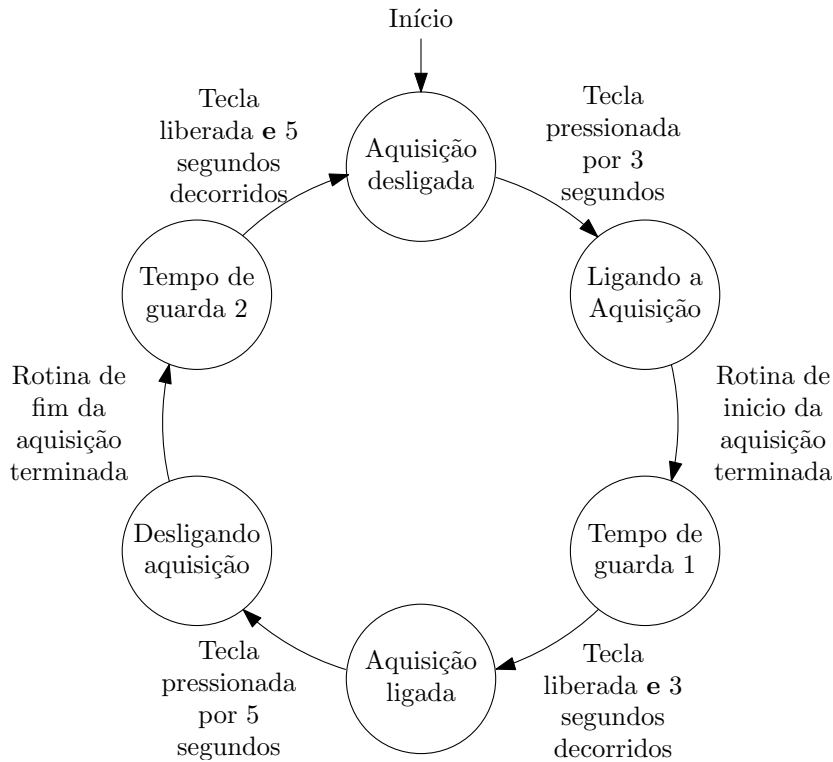


Figura 4.27: Máquina de estados da chave iniciar-terminar.

Figura 4.28. O valor do registrador associado a cada entrada de *encoder* é somado a $+1/4$ ou $-1/4$, de acordo com o sentido de rotação do encoder, de modo que a cada volta completa o registrador conte ± 200 pulsos. A duração dessa chamada de interrupção é inferior a $0.6 \mu s$, cerca de duas ordens de grandeza inferior ao período mínimo entre transições gerados pelo encoder, conforme descrito na Secção 4.1.4.

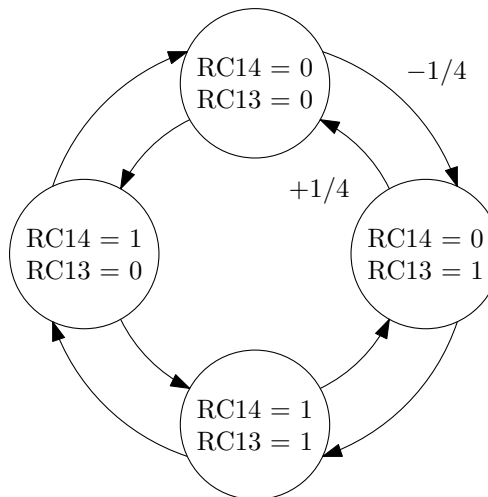


Figura 4.28: Máquina de estados do *encoder*.

A interrupção do porto UART1 é chamada a cada caracter recebido pelo *modem* de rádio. Quando uma mensagem completa é recebida, ela é interpretada e executada. A mensagem de configuração da transmissão de dados consiste de uma

sequência de 9 *bytes* que informa a taxa de aquisição e quais canais de A/D e *encoder* se deseja transmitir. O sistema ainda utiliza outras mensagens de teste e diagnóstico pelo porto UART1.

De forma similar, a interrupção do porto UART2 é disparada a cada caracter recebido do GPS. O GPS é configurado automaticamente para transmitir as mensagens NMEA GGA(hora, latitude, longitude, altitude, diluição horizontal de precisão, estado do receptor, número de satélites), configurado para uma taxa de atualização de 10 Hz; ZDA(data e hora) e VTG (rumo e velocidade) com taxa de atualização de 1 Hz. Quando uma dessas mensagens é recebida corretamente (mediante a uma verificação de *checksum*), seu conteúdo é separado e armazenado em registradores, que, portanto, contém a cópia da informação mais recente recebida do GPS, dessa forma a aquisição do GPS não é sincronizada com a aquisição dos demais canais. O processamento do GPS ocorre mesmo quando a aquisição está desligada, já que as informações do GPS são usadas também para definir os rótulos de data e hora da criação dos arquivos de dados.

A interrupção de A/D é disparada em uma taxa definida pelo arquivo de configuração, tipicamente a frequência de amostragem é de 100 Hz. A cada chamada da rotina os 16 canais de A/D são lidos em sequência. Para o armazenamento em arquivo no cartão de memória, os dados provenientes dos canais selecionados, acrescidos dos dados mais recentes provenientes do GPS e dos canais de *encoder* selecionados são copiados para um *buffer* circular de 4096 *bytes*, que é dividido em 8 blocos de 512 *bytes*. Quando um dos blocos é preenchido, um *flag* é ativado e a escrita continua no bloco seguinte. Os blocos marcados para serem escritos são gravados no cartão pelo laço principal do *firmware*.

Os dados a serem transmitidos pelo rádio (GPS e canais selecionados de A/D e *encoder*) são escritos em um *buffer* circular de 512 bytes em dois blocos de 256 bytes. Uma rotina de interrupção, disparada a cada 10 μ s, verifica se os blocos estão marcados para transmissão e enviam um caracter por vez para o *modem* de rádio.

O *firmware* ocupa 31886 bytes (23%) da memória de programa e 9004 bytes (6,8%) da memória de dados. Vale mencionar que um grande número de pinos de entrada e saída e periféricos internos não são utilizados, possibilitando futuras expansões.

4.3 Processamento de Dados

O processamento dos sinais registrados pelo sistema de aquisição começa com a aplicação dos coeficientes de calibração. A seguir os sinais são recortados em segmentos relevantes, em geral correspondentes ao deslocamento em um trecho de 2000 m. As coordenadas geodésicas de latitude e longitude foram convertidas em distâncias li-

neares por meio do algoritmo proposto por Vincenty [45]. Como a frequência do GPS utilizada é de 10 Hz, enquanto a dos demais sinais é de 100 Hz, foi necessário realizar a interpolação usando spline cúbica. Em seguida os sinais são filtrados por um filtro passa baixa Butterworth de quarta ordem de fase zero com frequência de corte em 5 Hz [35].

4.3.1 Filtro de Kalman

O algoritmo do Filtro de Kalman foi empregado com objetivo de obter sinais da cinemática. Como o movimento do barco é praticamente linear, optou-se por um modelo unidimensional. O vetor de estado escolhido $x(k)$ é composto pela posição, velocidade e aceleração do barco (Equação 55).

$$x(k) = \begin{bmatrix} x_{barco}(k) \\ \dot{x}_{barco}(k) \\ \ddot{x}_{barco}(k) \end{bmatrix} \quad (55)$$

O vetor de medição por sua vez é composto por dois conjuntos distintos de sinais de posição proveniente do GPS, da integral do sinal de aceleração e o sinal de aceleração, provenientes da IMU (Equação 56)

$$y(k) = \begin{bmatrix} y_{gps}(k) \\ \int \ddot{y}_{acx}(k) \\ \ddot{y}_{acx}(k) \end{bmatrix} \quad (56)$$

O modelo cinemático utilizado é descrito pelas Equações 5 e 6 (Seção 2.2.3). Note que a matriz de atualização de estado Φ equivale a um duplo integrador. O vetor de entrada $u(k)$ e a matriz Γ são nulos, e portanto todas as acelerações externas, devido à força do atleta ou do atrito viscoso, por exemplo, são consideradas como ruído do processo, representados pelo vetor $W(k)$ (Equação 57).

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T^2 \\ T \\ 1 \end{bmatrix} w_{\ddot{x}_{barco}}(k) \quad (57)$$

$$y(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} e_{y_{gps}}(k) \\ e_{\int \ddot{y}_{acx}}(k) \\ e_{\ddot{y}_{acx}}(k) \end{bmatrix} \quad (58)$$

onde $T = 1/f_s = 10 \text{ ms}$. A partir desse modelo obtemos as matrizes Q e R pelas Equações 59 e 60, respectivamente.

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T^2 \\ T \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T^2 \\ T \\ 1 \end{bmatrix}^T \text{Var}[e_{\ddot{y}_{acx}}(k)] = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}T^4 & \frac{1}{2}T^3 & \frac{1}{2}T^2 \\ \frac{1}{2}T^3 & T^2 & T \\ \frac{1}{2}T^2 & T & 1 \end{bmatrix} \text{Var}[w_{\ddot{x}_{barco}}(k)] \quad (59)$$

$$R = \begin{bmatrix} \text{Var}[e_{y_{gps}}(k)] & 0 & 0 \\ 0 & T^2 \text{Var}[e_{\ddot{y}_{acx}}(k)] & 0 \\ 0 & 0 & \text{Var}[e_{\ddot{y}_{acx}}(k)] \end{bmatrix} \quad (60)$$

Os valores de $\text{Var}[w_{\ddot{x}_{barco}}(k)]$, $\text{Var}[e_{y_{gps}}(k)]$ e $\text{Var}[e_{\ddot{y}_{acx}}(k)]$ foram obtidos por meio das medidas experimentais de variância da aceleração do barco, da posição de um ponto fixo do GPS e da variância em repouso do sinal do acelerômetro, respectivamente; sendo ajustadas empiricamente de modo a representar as acelerações provocadas por forças externas não modeladas e efeitos da interpolação no sinal de GPS. É importante observar também que uma das premissas do filtro de Kalman é que $W(k)$ e $e(k)$ sejam um ruído branco com e média nula. Caso alguma dessas sequências não possua essa característica a estimativa do estado será degradada.

Por fim definimos os valores iniciais do vetor de estado e matriz de covariância. Como sabemos *a priori* que o barco parte da origem com velocidade e aceleração nulas temos um vetor inicial de estado nulo:

$$x(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (61)$$

E como temos certeza do estado inicial, a matriz de Covariância inicial também é nula:

$$P(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (62)$$

Com base nas matrizes descritas foi aplicado o algoritmo apresentado na Seção 2.2.3.

4.4 Metodologia de Avaliação

A presente seção apresenta a metodologia que foi utilizada com objetivo de se obter os resultados apresentados no Capítulo 5.

4.4.1 Testes de Bancada

4.4.1.1 Telemetria

O sistema de telemetria foi ensaiado com objetivo de determinar os alcances útil e máximo do enlace de radiofrequência. Para tanto o sistema de aquisição foi configurado para informar e transmitir pacotes de dados contendo suas coordenadas informadas pelo GPS. Um microcomputador foi configurado para receber e armazenar esses dados. O receptor foi mantido parado enquanto o sistema de aquisição foi progressivamente afastado. Os testes foram realizados em campo aberto sobre a terra

4.4.1.2 Sensores de Cinemática do Barco

Os sensores cinemáticos foram ensaiados e calibrados no Laboratório de Sistemas Inerciais do Instituto de Pesquisas da Marinha (LSIN - IPqM) em uma mesa simuladora de movimentos com dois graus de liberdade (Contraves Goerz, EUA). A mesa possibilita o posicionamento angular de inclinação (*tilt*) e coordenação (azimute) com precisão de $0,001^\circ$ e rotações nesses mesmos eixos com velocidades angulares com precisão de $0,001^\circ/\text{s}$. A aceleração da gravidade local é de $9,7876670 \pm 4 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$.

A calibração dos sensores cinemáticos (acelerômetros e giroscópios) foi feita posicionando a mesa na origem (0° de inclinação e 0° de azimute) e fixando o sistema de aquisição a seu tempo. A orientação original do sistema de aquisição foi tal que o eixo z estivesse na direção da gravidade e o eixo x na direção da marca de 0° de azimute, conforme a Figura 4.29.

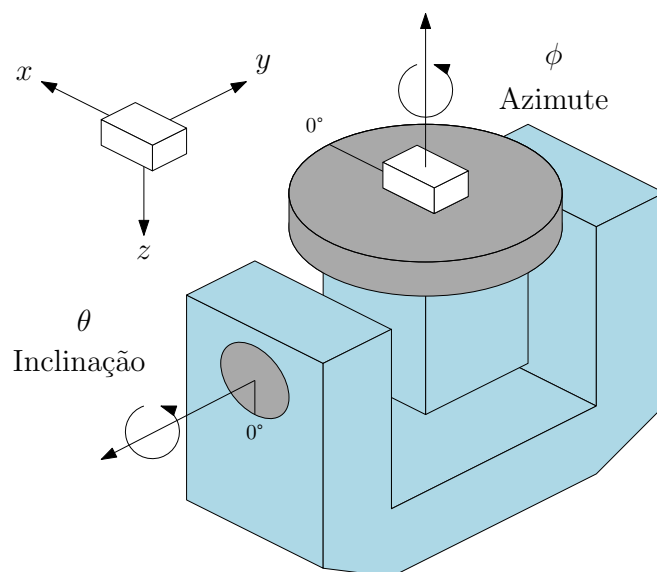


Figura 4.29: Esquema de montagem do sistema de aquisição na mesa simuladora de movimentos.

A calibração dos acelerômetros foi feita posicionando-se o sistema de aquisição em 24 orientações diferentes. O primeiro grupo de 8 posições foi obtido mantendo o azimute em 0° e variando a inclinação em intervalos de 45° . O segundo grupo foi feito mantendo a inclinação em 90° e variando o azimute em intervalos de 45° e o último grupo foi feito posicionando-se inclinação e azimute em 45° e variando em intervalos de 90° , de modo a rebater esse ângulo em todos os octantes. A Tabela 4.7 apresenta todas as posições angulares usadas.

Tabela 4.7: Posições angulares usadas na calibração dos acelerômetros

Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3	
inclinação	azimute	inclinação	azimute	inclinação	azimute
0°	0°	90°	0°	45°	45°
45°	0°	90°	45°	45°	135°
90°	0°	90°	90°	135°	225°
135°	0°	90°	135°	135°	315°
180°	0°	90°	180°	225°	45°
225°	0°	90°	225°	225°	135°
270°	0°	90°	270°	315°	225°
315°	0°	90°	315°	315°	315°

As referências de aceleração para cada eixo foram geradas pelas Equações 63, 64 e 65, onde g é a aceleração da gravidade local, θ é o ângulo de inclinação e ϕ o ângulo de azimute.

$$a_x = g \operatorname{sen}(\theta) \cos(\phi) \quad (63)$$

$$a_y = g \operatorname{sen}(\theta) \operatorname{sen}(\phi) \quad (64)$$

$$a_z = g \cos(\theta) \quad (65)$$

Os giroscópios foram ensaiados orientando-se o sistema de coordenadas do sistema de aquisição com o eixo de azimute, para em seguida excitar os giroscópios com velocidades angulares conhecidas no eixo de inclinação. O sistema de aquisição também foi excitado com rotação em ambos os eixos. A Tabela 4.8 apresenta as combinações de posições e velocidades angulares usados na calibração.

A mesa foi programada para ficar em cada configuração das Tabelas 4.7 e 4.8 por, pelo menos, dez segundos, que medidos a uma taxa de cem amostras por segundo, resultou em um trecho de no mínimo mil pontos. Foi recortado, então, um trecho de mil amostras, cujo valor médio foi considerado para calibração.

Tabela 4.8: Posições e velocidades angulares usadas na calibração dos giroscópios

Arfagem		Rolagem		Rolagem e Arfagem	
azimute	inclinação	azimute	inclinação	azimute	inclinação
0°	0 °/s	90°	0 °/s	50 °/s	50 °/s
0°	-10 °/s	90°	-10 °/s	50 °/s	-50 °/s
0°	-30 °/s	90°	-30 °/s	-50 °/s	50 °/s
0°	-50 °/s	90°	-50 °/s	-50 °/s	-50 °/s
0°	10 °/s	90°	10 °/s		
0°	30 °/s	90°	30 °/s		
0°	50 °/s	90°	50 °/s		
180°	10 °/s	270°	10 °/s		
180°	30 °/s	270°	30 °/s		
180°	50 °/s	270°	50 °/s		

4.4.1.3 Sensores de Ângulo

A calibração dos sensores de ângulo foi feita utilizando um goniômetro construído a partir de um transferidor (com resolução de 1°). Foram registrados, para ambos os bordos, 5 pontos experimentais de ângulo vertical, na faixa entre 10 e -30°, e 13 pontos experimentais de ângulo horizontal entre -60 e 60°. Foram registrados 100 amostras, cujo valor médio foi considerado o valor experimental.

4.4.1.4 Sensor de Força

Para determinar a linearidade do sensor de força isoladamente (não conectado ao remo) foi realizada a calibração do sensor de boreste, usando um conjunto de 4 massas de calibração entre 187 e 1402 gramas, combinadas de modo se obter 8 pontos experimentais. O sensor de força foi fixado na horizontal e as massas serão apoiadas na extremidade da haste do sensor. Foram registrados 1000 amostras, cujo valor médio foi considerado o valor experimental.

Para avaliar a não linearidade estática do conjunto formado pelo remo e pelo sensor de força foi efetuada a calibração estática do conjunto, conforme apresentado na Figura 4.30. Foram utilizadas 6 massas padrão de calibração entre 2,910 e 4,150 kg agrupadas de modo a obter 14 pontos experimentais entre 0 e 22,58 kg sendo 7 referentes a um acréscimos de massa e 7 referentes a decréscimos de massa, de modo a avaliar a histerese do sistema. Foram registradas 1000 amostras, cujo valor médio foi considerado o valor experimental.

4.4.1.5 Calibrador de Força

O calibrador de força foi calibrado usando um conjunto de 6 massas padrão de calibração com massas entre 2,9 a 5,9 kg, que foram combinadas de modo se obter

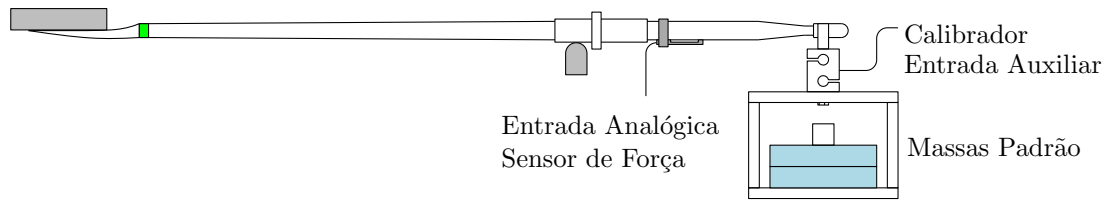


Figura 4.30: Esquema do procedimento de calibração estática dos sensores de força.

11 pontos experimentais. As massas foram sustentadas por um suporte de modo a tracionar a célula de carga. Foram registradas 100 amostras, cujo valor médio foi considerado o valor experimental.

4.4.1.6 Sensores de Posição de Carrinho e Tronco

Os sensores de posição foram calibrados utilizando uma trena (com resolução de 1 mm) fixada ao tampo de uma mesa. O sensor de posição de carrinho foi avaliado em 13 pontos experimentais (0 a 120 cm, com intervalos de 10 cm), enquanto o sensor de posição de tronco foi avaliado em 19 pontos experimentais (0 a 190 cm, com intervalos de 10 cm).

4.4.2 Testes de Campo

Os testes de campo tiveram por objetivo avaliar a repetitividade e reprodutibilidade dos sensores que dependem de calibração em campo. Os testes foram feitos com membros da equipe técnica de remo do Clube de Regatas do Flamengo. A avaliação do procedimento de calibração dos sensores de força foi realizada por quatro treinadores, que executaram o procedimento descrito na seção 4.1.3.3. Foi solicitado que os treinadores mantivessem o calibrador perpendicular ao remo e aplicassem uma força de tração no calibrador por cinco vezes. Para cada repetição foram calculados os coeficientes de ajuste linear (ganho e linha de base) e a não linearidade, e a partir deles, e a média e o desvio padrão dos coeficientes e a média da não linearidade de cada treinador.

Para o ajuste de linha de zero do sensor de ângulo horizontal foi solicitado a cinco treinadores que posicionassem as forquetas de acordo com o procedimento descrito na seção 4.1.2.1. Foi registrado um trecho de 10s com a forqueta em repouso e foram calculadas a média e o desvio padrão do ângulo para cada registro.

Para os sensores de tronco e carrinho foi solicitado a cinco treinadores que deslocassem o carrinho por todo percurso do trilho por dez vezes de acordo com o procedimento descrito na seção 4.1.4.1. Para cada treinador foi calculada a média e desvio padrão do valor da linha de base obtido em cada repetição.

O cálculo dos desvios padrão de repetitividade (σ_r) e de reprodutibilidade (σ_R) foi realizado de acordo com a norma ISO 5725-1 [46]. de acordo com as Equações

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_T} \quad (66)$$

onde σ_T equivale ao desvio padrão calculado a partir das várias medidas de um único treinador em condição de repetitividade, ou seja, empregando a mesma técnica e com um curto espaço de tempo entre elas.

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_R^2} \quad (67)$$

onde σ_L equivale ao desvio padrão calculado entre as médias obtida pelos diversos treinadores.

4.4.3 Testes *In Situ* e fusão de dados

Foi realizada uma gravação de uma sessão de treinamento de um atleta do sexo masculino do Clube de Regatas do Flamengo, com duração de 27 minutos e 31 segundos, a uma taxa de 100 Hz, resultando em um registro de 164086 amostras, das quais foi recortado um trecho de 56877 amostras e 568,90 s (9 minutos e 28 segundos), que equivale a um percurso de 2000 m. A gravação dos sinais de GPS foi feita a uma taxa de 10 Hz e o atleta manteve a voga em 20 remadas por minuto (0,3 Hz). Os testes com atletas foram conduzidos em conformidade com um protocolo aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho sob o número de protocolo 152/10.

Os sinais recortados foram corrigidos pelas respectivas equações de calibração e o algoritmo de fusão de dados foi aplicado. Os resultados foram novamente recortados em um trecho de 2000 amostras, equivalente a 20 segundos (trecho entre 400 e 420 s) para exibição em detalhes de cerca de 5 ciclos de remada. No caso específico do resultado posição proveniente dos métodos de correção foi utilizado também um trecho de 2 segundos, entre o segundo 400 e 402 dos sinais.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Testes de Bancada

Esta secção apresenta os resultados dos testes em bancada, em particular as curvas e coeficientes de calibração dos sensores.

A Figura 5.1 representa o número de pacotes perdidos em função da distância durante o teste do sistema de telemetria. Abaixo de 77 m nenhum pacote foi perdido. Abaixo de 200 m a taxa de pacotes perdidos é inferior a 3%. A comunicação é perdida em 800 m.

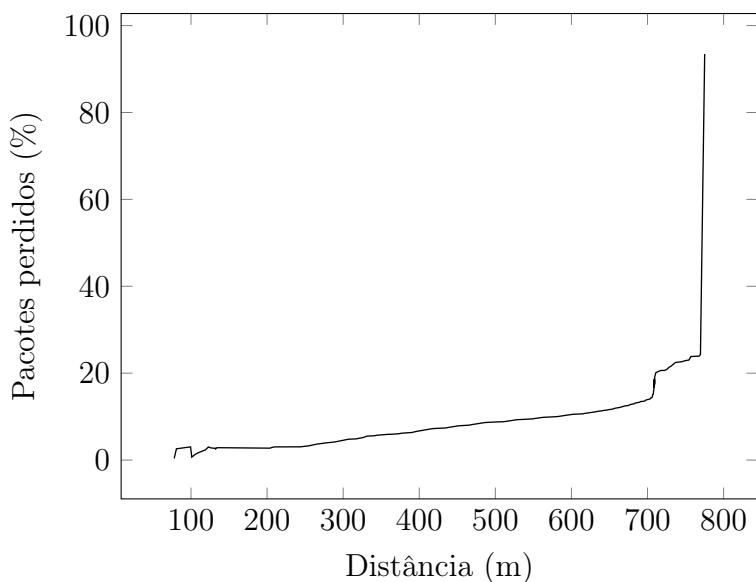


Figura 5.1: Perda de pacotes em função da distância.

A Tabela 5.1 apresenta o resumo dos coeficientes de calibração, bem como a não linearidade percentual em relação ao fundo de escala dos sensores. A linha de base dos sensores de ângulo horizontal depende da montagem dos mesmos e são tratadas na próxima secção.

Tabela 5.1: Coeficientes de calibração e não linearidade

Sensor	linha de base	ganho	não linearidade
Aceleração eixo x	1,3886 V	36,1900 m/s ² V	3,8149 %
Aceleração eixo y	1,3920 V	35,7580 m/s ² V	1,3577 %
Aceleração eixo z	1,4245 V	35,2112 m/s ² V	1,4645 %
Velocidade angular eixo x	1,3654 V	276,0328 °/sV	0,5366 %
Velocidade angular eixo y	1,3182 V	-285,4355 °/sV	0,9261 %
Ângulo horizontal de boreste	-	-71,3816 °/V	1,8936 %
Ângulo horizontal de bombordo	-	69,8454 °/V	1,0562 %
Ângulo vertical de boreste	2,3700 V	15,8568 °/V	1,4152 %
Ângulo vertical de bombordo	0,8919 V	-15,0121 °/V	1,7756 %
Calibrador de força	2,9636 V	-448,2639 N/V	0,3447 %
Posição de carrinho	-	0,0131 cm/V	0,8191 %
Posição de tronco	-	0,0109 cm/V	0,3053 %

5.2 Testes de Campo

Esta secção apresenta os resultados dos valores de calibração em campo feitos pela equipe de remo do Clube de Regatas do Flamengo, conforme descrito na Secção 4.4.2, de modo avaliar a repetitividade e reprodutibilidade da calibração.

As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam as médias e desvios padrão (entre parênteses) da linha de base dos sensores de ângulo horizontal de boreste e bombordo, respectivamente. A última linha equivale à média das médias de cada treinador e o respectivo desvio padrão.

Tabela 5.2: Ajuste de linha de base do sensor de ângulo horizontal de boreste

Treinador	Linha de Base (°)
1	-12,3016 (0,1758)
2	-8,6715 (0,1712)
3	-8,9110 (0,1943)
4	-11,1042 (0,1867)
5	-10,9177 (0,1875)
Média	-10,3812 (1,5478)

Tabela 5.3: Ajuste de linha de base do sensor de ângulo horizontal de bombordo

Treinador	Linha de Base (°)
1	-0,1138 (0,1772)
2	-2,3113 (0,1484)
3	-1,8788 (0,1705)
4	-3,1471 (0,1456)
5	0,5204 (0,1266)
Média	-1,3861 (1,5373)

As Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam as médias e desvios padrão (entre parênteses) da linha de base e ganho dos sensores de força de boreste e bombordo, respectivamente. A não linearidade foi calculada com respeito à reta de calibração média de cada treinador.

Tabela 5.4: Coeficientes de calibração do sensor de força de remo de boreste

Treinador	Ganho (V/N)	Linha de Base (V)	Não Linearidade
1	-465,4990 (14,3606)	2,8992 (0,0106)	5,0447
2	-454,6122 (7,2397)	2,9166 (0,0028)	7,0577
3	-446,9121 (15,1066)	2,9720 (0,0152)	4,3204
4	-454,8127 (10,0542)	2,9577 (0,0097)	6,4955
Média	-455,4590 (7,6373)	2,9364 (0,0341)	-

Tabela 5.5: Coeficientes de calibração do sensor de força de remo de bombordo

Treinador	Ganho (V/N)	Linha de Base (V)	Não Linearidade
1	-475,7215 (6,5086)	2,9452 (0,0236)	6,9974
2	-430,4830 (6,6542)	2,9851 (0,0061)	10,0148
3	-437,9201 (43,6874)	2,9964 (0,0398)	5,9921
4	-441,5975 (6,1505)	3,0067 (0,0096)	8,5445
Média	-446,4305 (20,0672)	2,9938 (0,0110)	-

A calibração dos sensores de força apresentaram uma não linearidade de até 10% em relação ao fundo de escala. A Figura 5.2 ilustra esse comportamento. A não linearidade registrada no teste de calibração estática é de 7,97 % em relação ao fundo de escala, conforme apresentado na Figura 5.2. Observa-se portanto que ao menos parte da não linearidade registrada na calibração em campo pode ser atribuída a uma não linearidade estática do conjunto formado pelo remo e pelo sensor de força.

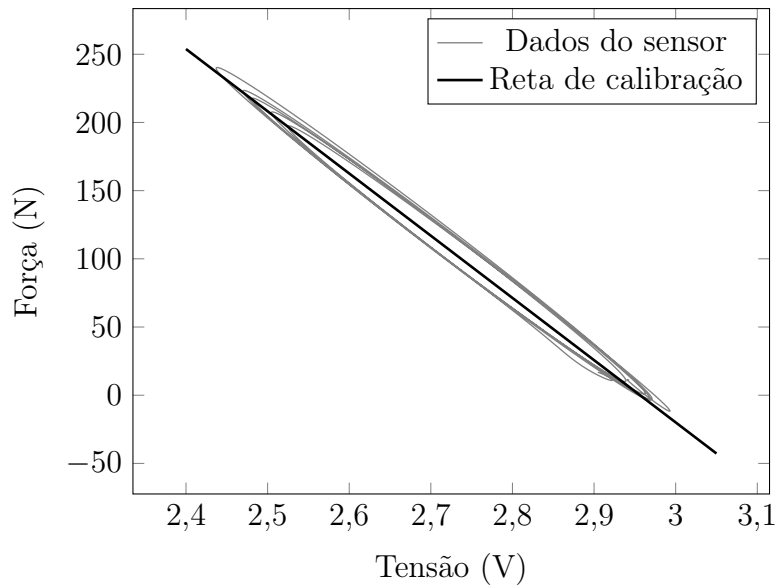


Figura 5.2: Reta de calibração do sensor de força de boreste do Treinador 4.

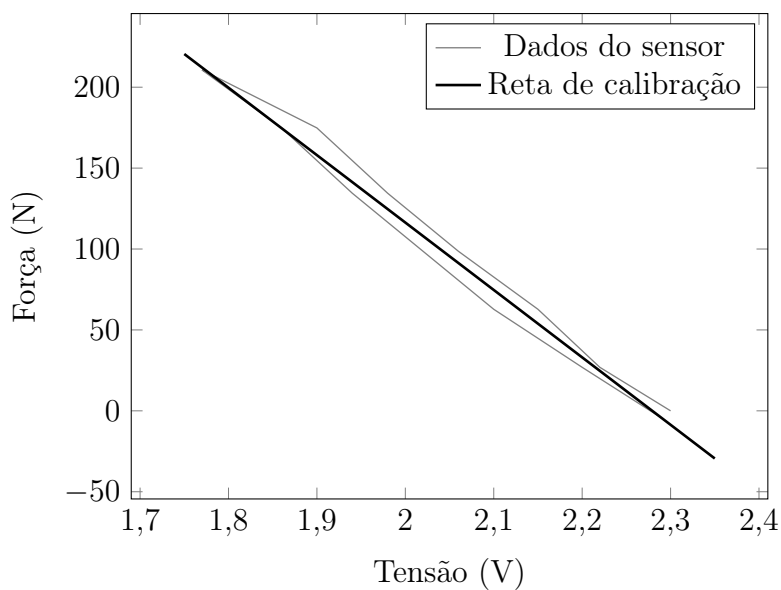


Figura 5.3: Reta de calibração do sensor de força para calibração estática.

Tal não linearidade não é observada no sensor de força quando este não é acoplado ao remo, cuja não linearidade é de 0,5% em relação ao fundo de escala (Figura 5.4). Isso sugere que a histerese apresentada pelo sensor acoplado ao remo, tanto na calibração dinâmica em campo quanto na calibração estática em bancada, é causada pelo comportamento não linear do remo.

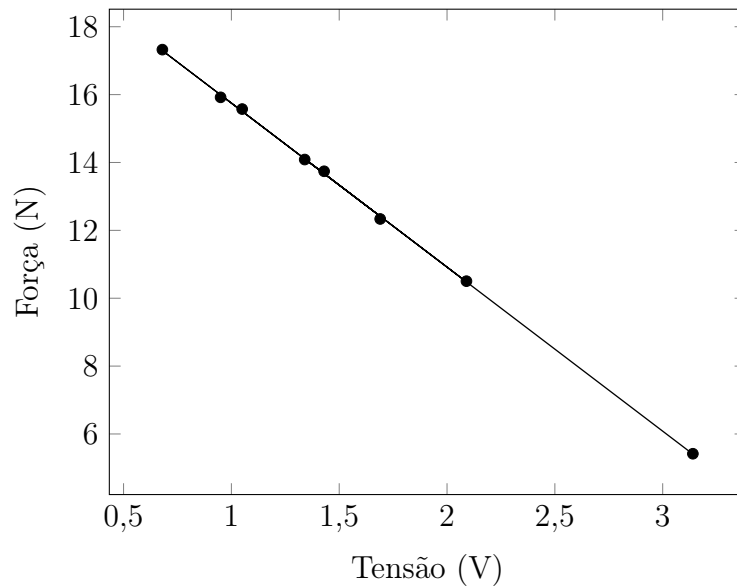


Figura 5.4: Reta de calibração do sensor de força de boreste sem o remo.

As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam as médias e desvios padrão das linhas de base sensores de posição de tronco e carrinho, bem como a média e desvio padrão das médias de cada treinador.

Tabela 5.6: Ajuste de linha de base do sensor de posição de carrinho

Treinador	Linha de Base (cm)
1	72,8164 (1,0665)
2	74,3910 (1,3057)
3	74,1788 (2,6580)
4	72,6316 (1,3099)
5	74,7709 (0,7814)
Média	73,7577 (0,9694)

Tabela 5.7: Ajuste de linha de base do sensor de posição de tronco

Treinador	Linha de Base (cm)
1	46,1353 (0,6449)
2	46,7414 (0,7121)
3	46,5833 (1,6677)
4	46,9005 (0,8347)
5	47,4553 (0,4382)
Média	46,7632 (0,4809)

A Tabela 5.8 sumariza os desvios padrão de repetitividade e reprodutibilidade para os sensores calibrados em campo.

Tabela 5.8: Desvios padrão de repetitividade e reprodutibilidade para os sensores calibrados em campo

Sensor	Parâmetro	σ_r	σ_R	unidade
Angulo Horizontal de Boreste	Linha de base	0,1833	1,5587	°
Angulo Horizontal de Bombordo	Linha de base	0,1548	1,5451	°
Força de Boreste	Ganho	12,1237	14,3287	N/V
	Linha de base	0,0106	0,0357	V
Força de Bombordo	Ganho	22,5447	30,1820	N/V
	Linha de base	0,0238	0,0359	V
Posição de Tronco	Linha de base	0,9584	1,0723	cm
Posição de Carrinho	Linha de base	1,5642	1,8402	cm

5.3 Testes *In Situ*

Esta secção contém os registros no domínio do tempo dos sinais gravados pelo sistema. O atleta manteve uma voga de 16 remadas por minuto e completou o percurso de 2000 m em 9 minutos e 20 segundos, o que equivale a uma velocidade média de 3,59 m/s (6,94 nós). As Figuras 5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 apresentam, respectivamente, os registros de aceleração no eixo x, força, ângulos horizontal e vertical e posições de tronco e carrinho.

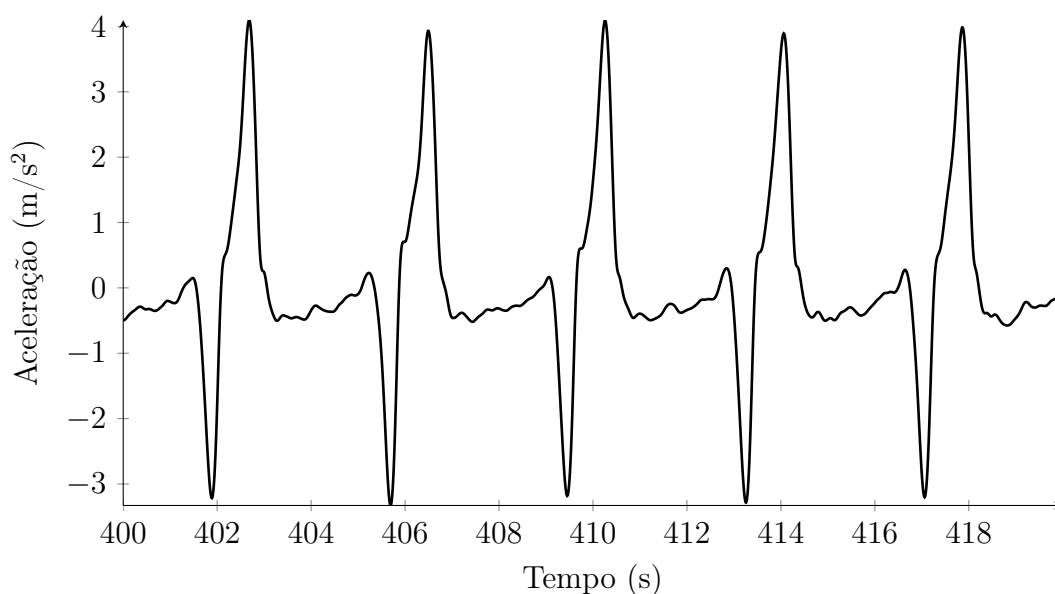


Figura 5.5: Registro da aceleração no eixo x.

Comparando a Figura 5.5 com a Figura 3.1 (Capítulo 3) proveniente da literatura é possível observar similaridades na morfologia, especificamente na presença de picos negativos e positivos seguidos por um platô ligeiramente negativo. O período do sinal é de cerca de 3,85 s que equivale a uma voga de aproximadamente 16 remadas por minuto. Diferenças no formato exato do sinal e da amplitude podem ser justificadas por diferenças de condicionamento e força dos atletas, voga e técnica empregada.

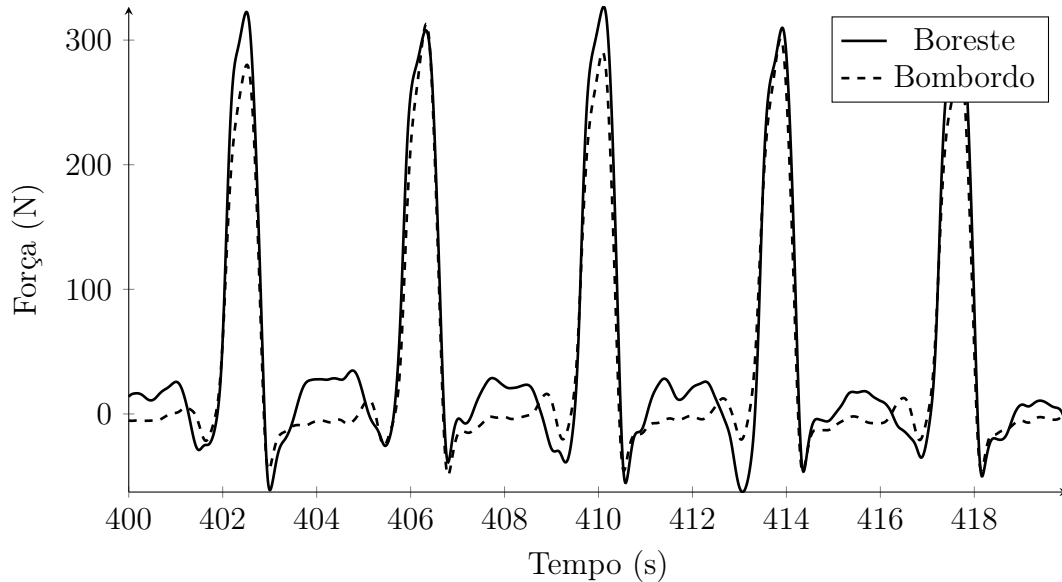


Figura 5.6: Registro de força.

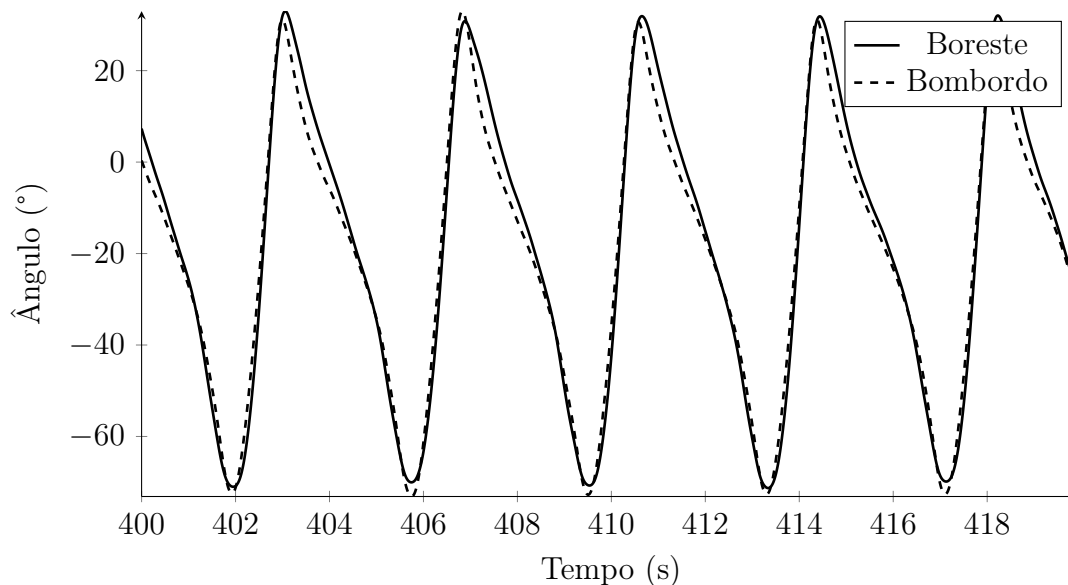


Figura 5.7: Registro de ângulos horizontais.

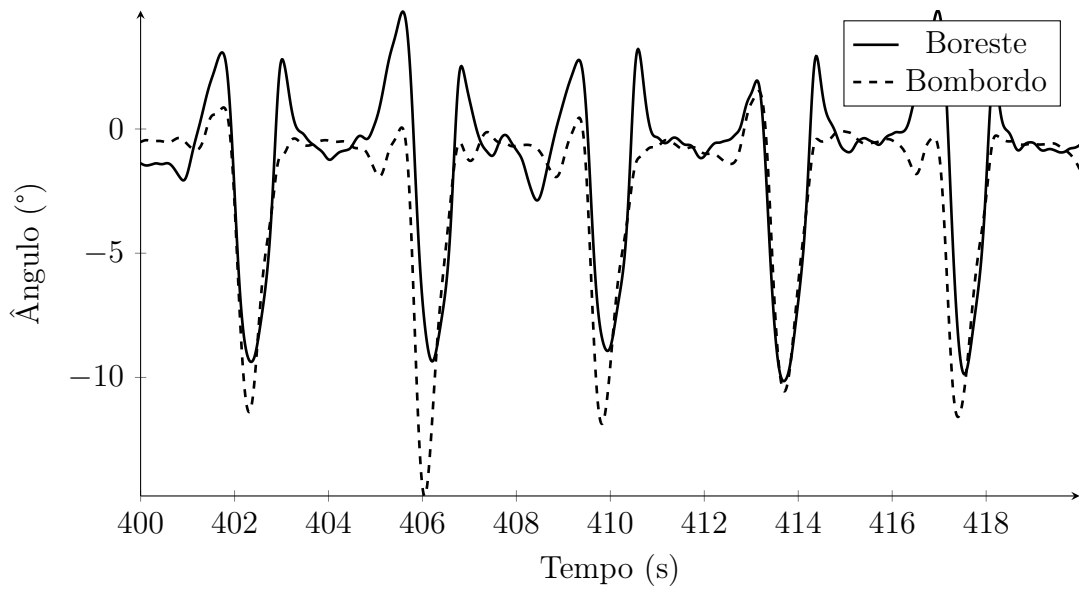


Figura 5.8: Registro de ângulos verticais.

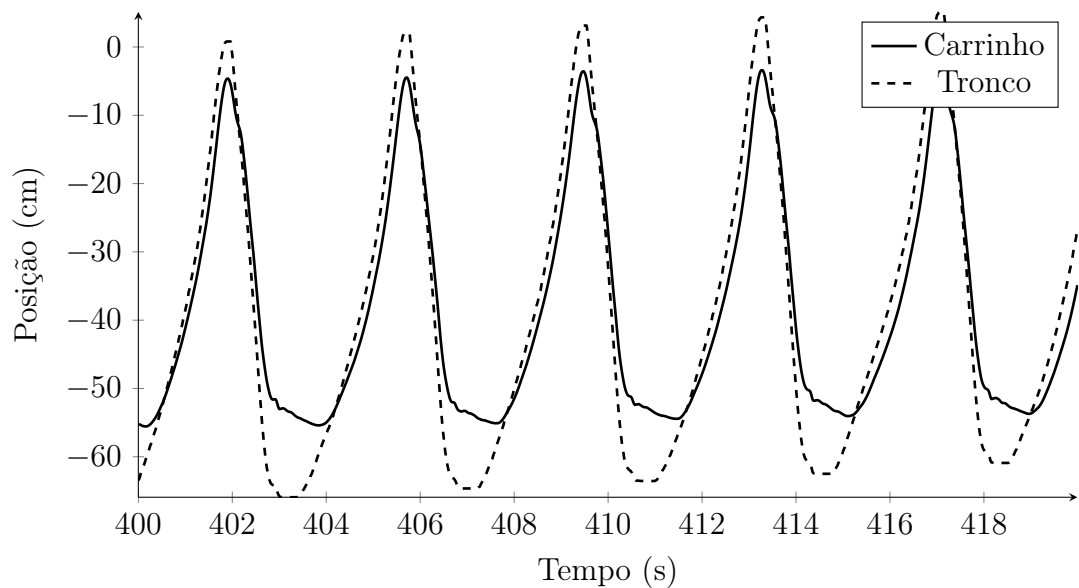


Figura 5.9: Registro de posições lineares.

As Figuras 5.10 5.11 apresentam, respectivamente, os registros de força e ângulo vertical, ambos em função do ângulo horizontal.

Nota-se que o registro de força da literatura (Figura 3.2) tem cerca de duas vezes a força (pico de 600 N) e uma amplitude angular menor (cerca de 80°) se comparado com o sinal obtido pelo sistema proposto. Isso se deve ao sinal da literatura ser obtido de um barco de palamenta simples, e portanto a força dos dois braços é aplicada em um único remo. A amplitude do sinal de ângulo horizontal para barcos de palamenta simples é cerca de 25° do que aqueles observados para palamenta

dupla [31]. É interessante observar também o laço com força ligeiramente negativa em cerca de -30° presente em ambos os sinais.

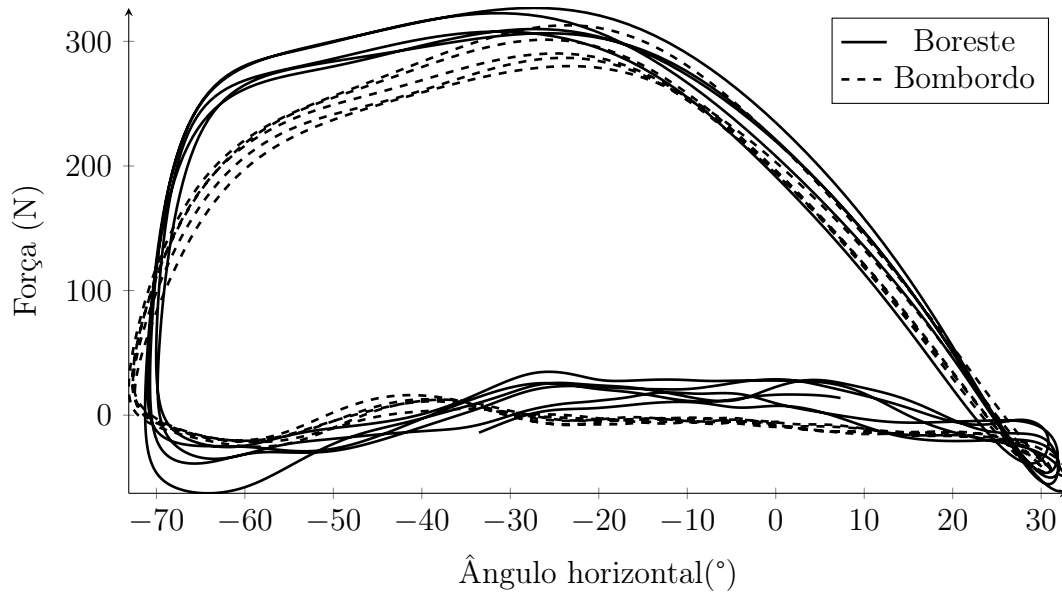


Figura 5.10: Registro da força em função do ângulo horizontal.

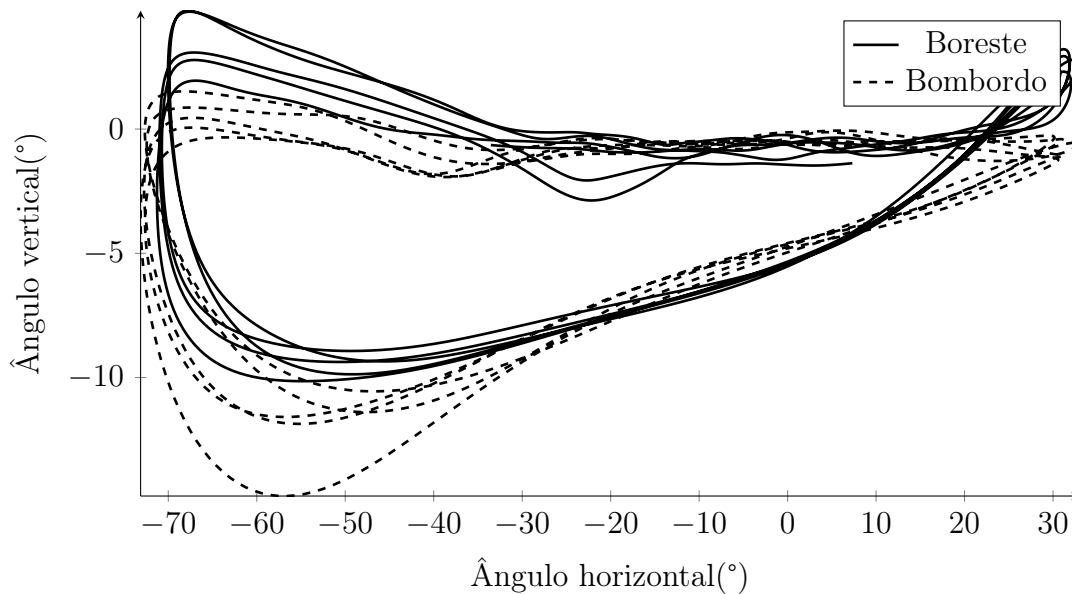


Figura 5.11: Registro do ângulo vertical em função do ângulo horizontal.

5.4 Fusão de dados

Os resultados exibidos a seguir (Figuras 5.12, 5.13, 5.14, , 5.18 e 5.19) foram obtidas aplicando o algoritmo descrito na Seção 4.3. Na Figura 5.12 é possível observar que os sinais de aceleração provenientes do filtro de Kalman e do algoritmo de correção

de linha de base estão praticamente sobrepostos. Esse comportamento é esperado dado que esses sinais não foram integrados nenhuma vez.

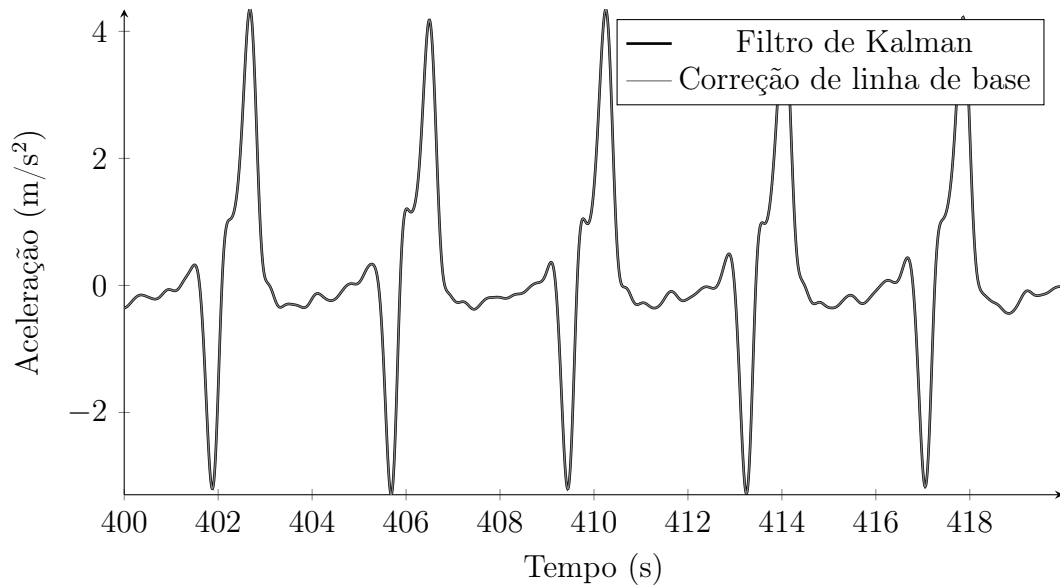


Figura 5.12: Registro do aceleração no eixo x.

As Figuras 5.13, 5.14 apresentam os sinais de velocidade provenientes dos algoritmos de filtro de Kalman e correção de linha de base com escalas horizontais de 400 a 420 segundos e a duração completa da prova. O sinal de velocidade obtido por meio da correção de linha de base apresenta um sinal espúrio sobreposto ao sinal de velocidade que equivale ao polinômio de linha de base ajustado (Figura 5.15). Os sinais de velocidade obtidos pelo filtro de Kalman tem mesma velocidade média (3,59 m/s) obtida pelo sinal de GPS.

A velocidade obtida pelo filtro de Kalman também apresentou uma flutuação, que poderia ser causada pelo algoritmo ou pelo método de interpolação usando spline cúbica. Para descartar essa hipóteses foi calculada a derivada do sinal de posição proveniente do GPS reamostrado por spline e interpolação linear, e filtrado em 0.1 Hz para eliminar a variação de velocidade devido a cada ciclo de remada, deixando apenas a envoltória (Figura 5.16). Observa se que a flutuação na velocidade obtida pelo filtro de Kalman também pode ser observada na derivada do sinal de GPS (que não é utilizada pelo filtro de Kalman), e que ambas as técnicas empregadas para reamostragem obtiveram o mesmo resultado.

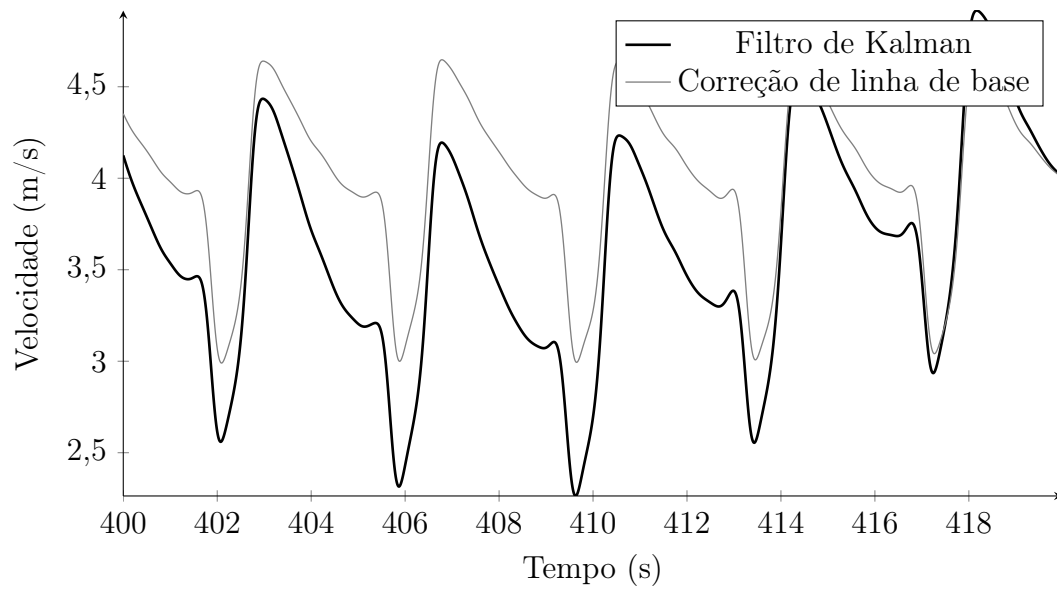


Figura 5.13: Velocidade no trecho entre os segundos 400 e 420.

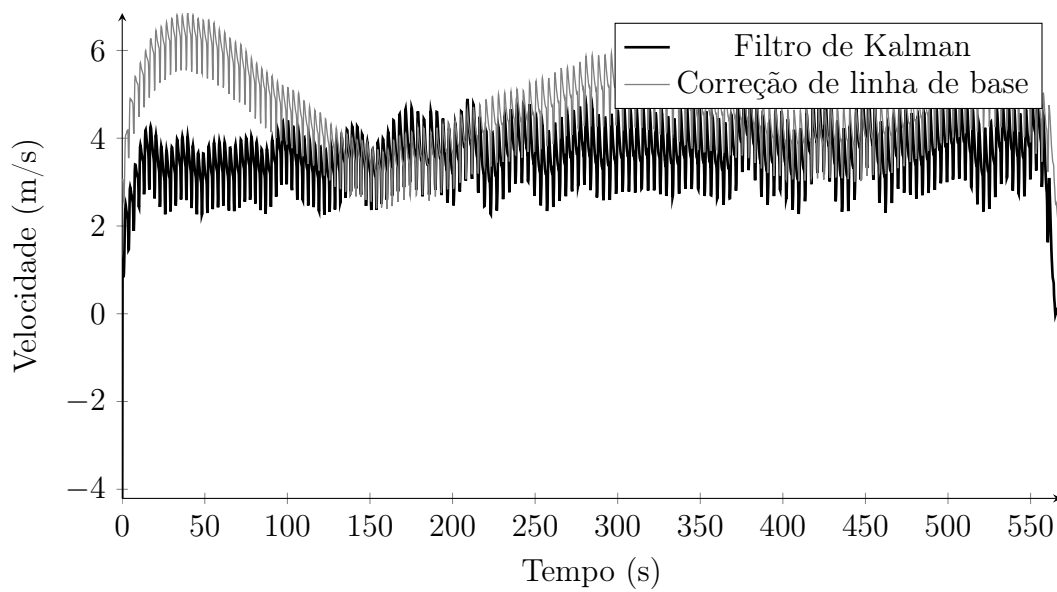


Figura 5.14: Velocidade duranteo percurso de 2000m.

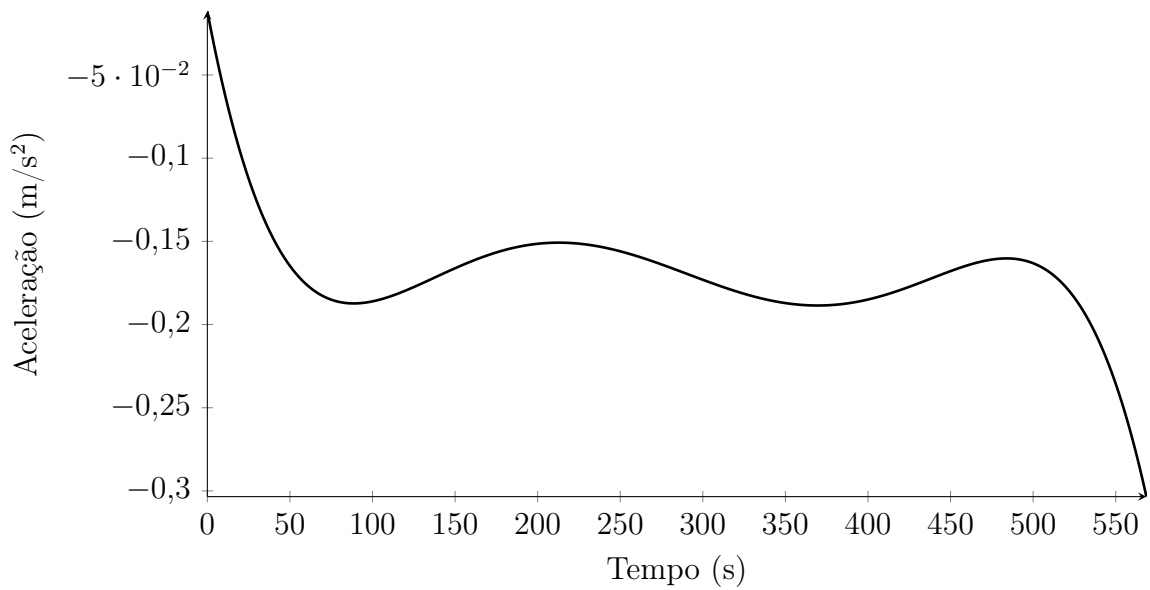


Figura 5.15: Polinômio de linha de base subtraído da aceleração.

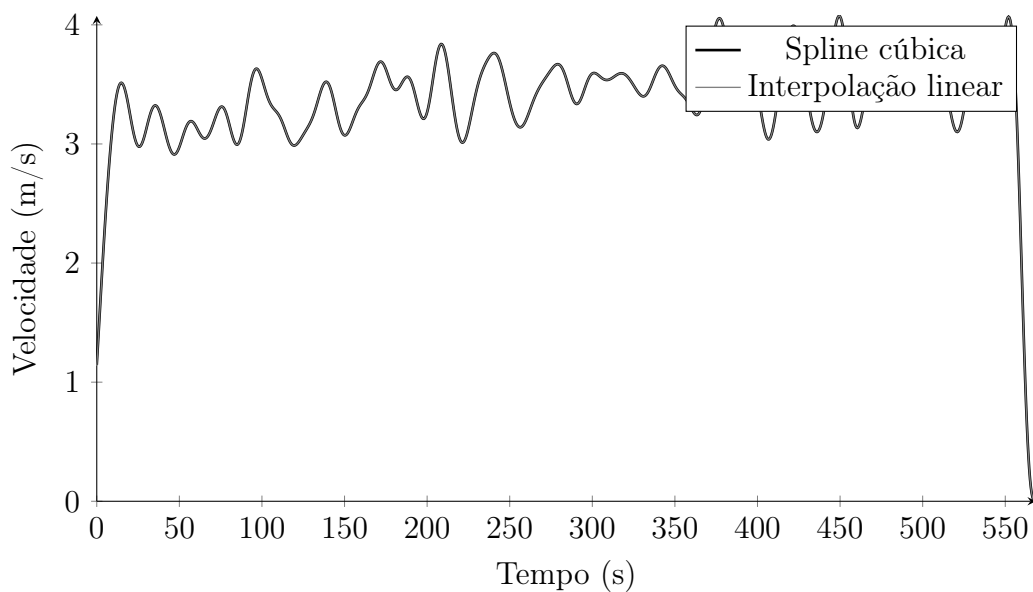


Figura 5.16: Derivada do sinal de GPS reamostrado e filtrado.

As Figuras 5.17, e 5.19 apresentam os dados de posição provenientes dos algoritmos de filtro de Kalman e correção de linha de base, bem como o sinal de GPS registrado. São apresentadas três escalas horizontais, 400 a 402 segundos, 400 a 420 segundos e a duração completa. Observa-se que os sinais de posição do filtro de Kalman se aproximam mais do sinal de GPS do que o sinal de posição obtido por correção de linha de base.

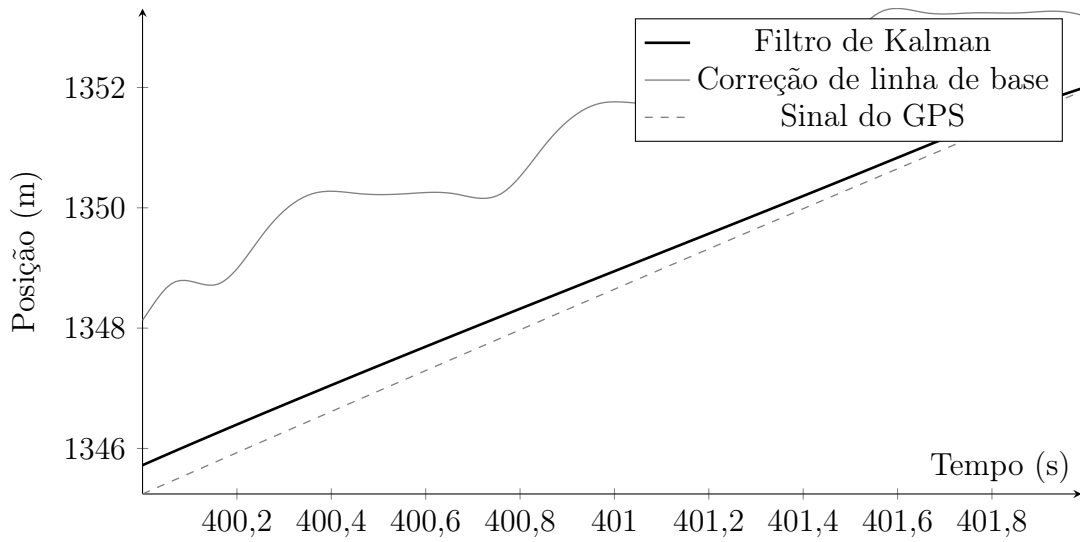


Figura 5.17: Posição do barco no trecho entre os segundos 400 e 402.

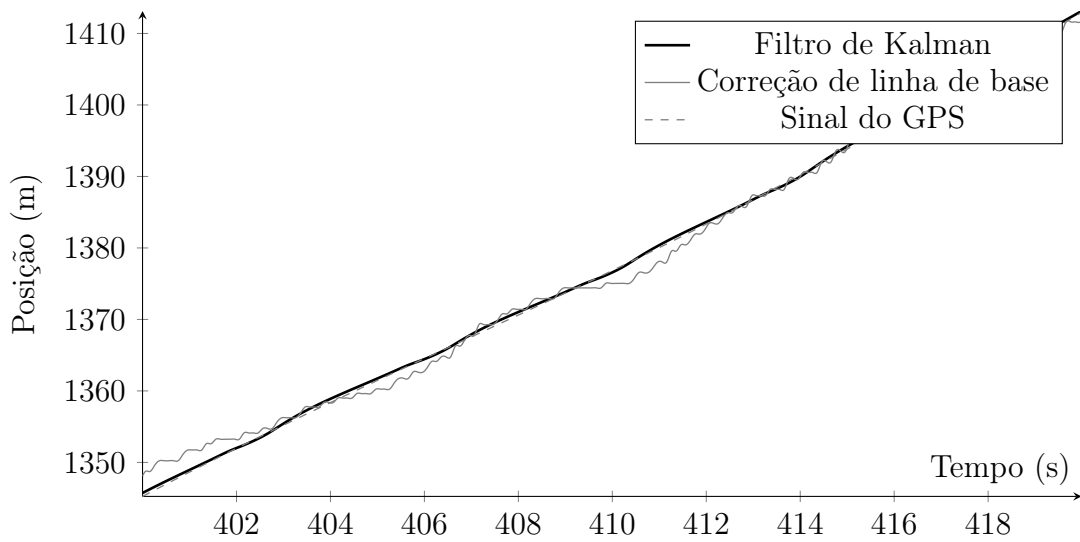


Figura 5.18: Posição do barco no trecho entre os segundos 400 e 420.

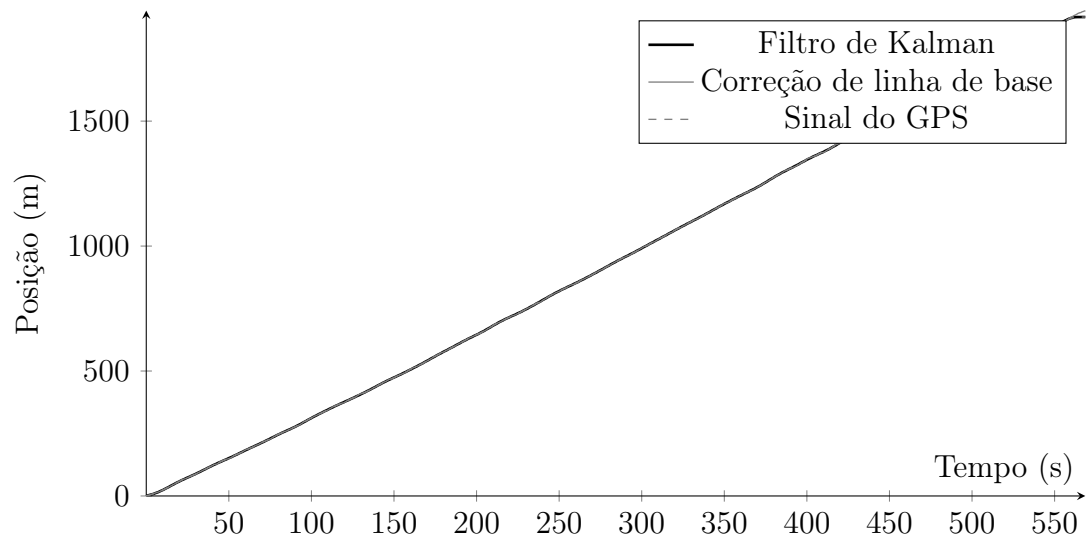


Figura 5.19: Posição do barco durante o percurso de 2000m.

Capítulo 6

Discussão e Conclusão

O sistema de aquisição se mostrou adequado para registrar os sinais para análise posterior, e resistiu ao ambiente agressivo durante a realização dos ensaios apresentados neste trabalho. Se necessário, ensaios adicionais, como testes de imersão e em câmara climática com névoa salina, podem ser realizados no intuito de avaliar essa resistência.

Os testes realizados com o sistema de telemetria indicaram que o *modem* utilizado é adequado para transmitir os sinais em distâncias de até 200m permitindo transmiti-los até a lancha do treinador, de forma similar à maioria dos sistemas comerciais, no entanto não foi realizado nenhum ensaio sobre a água para validar esse resultado. Não se conseguiu reproduzir o alcance encontrado por Simões *et al.* [29], que utilizaram um rádio com 10 vezes mais potência. Conforme apresentado na Seção 2.3.2, mesmo que se utilizasse um rádio com a máxima potência permitida pela legislação brasileira não seria possível alcançar os 2000 m necessários para cobrir todo percurso de uma prova de remo olímpico. Uma possível alternativa é transmitir os dados pela rede de telefonia celular, utilizando para tanto uma placa dedicada ou um telefone móvel conectado ao sistema de aquisição por ou Bluetooth.

Os sinais provenientes dos sensores inerciais são afetados pelo desalinhamento entre os sensores e entre a IMU e o corpo do sistema de aquisição. A impossibilidade de se poder usar uma calibração tridimensional resultou em uma não linearidade em torno de 4% em relação ao fundo de escala (1 *g*). No entanto a não linearidade da aceleração no eixo x, quando calibrada como uma combinação linear dos sinais dos 3 acelerômetros, é reduzida para 0,3 %. O registro de aceleração no eixo x apresentou um sinal com morfologia comparável à descrita na literatura [28]. Algumas diferenças podem ser justificadas por questões de técnica e antropometria do atleta, bem como a regulação do barco.

A não linearidade dos sensores de ângulos medida é aproximadamente igual ao descrito pelo fabricante dos potenciômetros (2% do fundo de escala). Não foram encontrados potenciômetros ou outros sensores angulares com grau de proteção IP67

com menor não linearidade. No caso do sensor de ângulo horizontal a não linearidade resulta em um erro em torno de 2 ° ao longo de toda faixa de operação. Dessa forma é possível estimar diferenças de ângulos, e dessa forma identificar a amplitude angular horizontal total durante um ciclo de remada. A exatidão para medição de ângulos é limitada pela acuidade visual durante o procedimento de calibração da linha de base dos sensores, e os testes com a equipe indicaram um desvio padrão de reprodutibilidade inferior a 2°.

Os sensores de ângulo vertical têm a mesma não linearidade, resultado de erro da ordem de 0,8° ao longo de faixa de operação de 40°. Os resultados do registros de força e ângulo apresentam morfologia comparável à descrita na literatura [31]. Algumas diferenças podem ser justificadas por serem dados de modalidades diferentes, além de questões de técnica e antropometria do atleta, bem como a regulação do barco. Os resultados de ângulo horizontal e vertical são similares aos obtidos por Limeira [36].

Os testes dos sensores de força, realizados tanto no teste estático de bancada quanto no teste dinâmico com os treinadores mostraram que os mesmos, depois do processo de calibração, apresentam uma não linearidade de até 10% em relação ao fundo de escala. Como o calibrador e o sensor de força sem o remo são bastante lineares (0,3 e 0,5% do fundo de escala respectivamente) conclui-se que essa não linearidade é estática e é causada pelo comportamento não linear (histerese) do próprio remo. Essa não linearidade comprometeu a reprodutibilidade dos sensores, resultando em um desvio padrão de reprodutibilidade da ordem de 7,5% do valor de ganho dos sensores. Essa não linearidade não foi relatada em outros trabalhos que utilizaram sensores instalados no remo [25, 31]. São necessários mais estudos com a finalidade de minimizar ou compensar esse problema. A metodologia de projeto utilizada nos sensores de força de remo pode ser empregada para construir sensores de força aplicada ao finca pé, de forma similar a outros trabalhos [6, 24, 31].

Os sensores de posição obtiveram resultados similares aos obtidos pela versão anterior do sensor [37], com não linearidades inferiores a 1% em relação ao fundo de escala, no entanto a força de tração do mesmo é desconfortável para o atleta e apresentou sinais de desgaste, sendo necessário reprojeter a mecânica do sensor e usar uma mola espiral com menor constante elástica. Outra opção é utilizar potenciômetros de fio industriais à prova d'água.

O Quadro 6.1 apresenta a comparação os as variáveis medidas pelo sistema desenvolvido e seus similares descritos na literatura. É importante notar que a maioria dos autores não apresentam informações referentes ao desempenho dos sensores empregados, uma vez que não possuíam ênfase em instrumentação e metrologia.

A metodologia empregada para calibração dos sensores em campo, apesar de utilizar procedimentos simples de forma a permitir que o sistema seja rapidamente

instalado por diferentes operadores, apresentou resultados aceitáveis para os sensores de ângulo horizontal e posição de tronco e carrinho. O desvio padrão de reprodutibilidade para linha de base dos mesmos é de 1 a 2% do fundo escala. A calibração de ganho do sensor de força foi comprometida pelo comportamento não linear do remo.

A técnica de fusão de dados, apesar de simples, forneceu uma velocidade com nível médio similar à velocidade média registrada no percurso e morfologia similar à indicada na literatura. Comparando com a técnica utilizada por Borges [35] produz um sinal de velocidade sem os artefatos introduzidos devido ao ajuste do polinômio de linha de base do sinal de aceleração. O algoritmo empregado permite ainda a fusão de dados em tempo real, sendo possível implementá-lo no microcontrolador de modo a transmitir dados processados.

A falta de sincronia entre gravação dos sinais analógicos e do sinal de GPS pode resultar em um erro temporal (*jitter*) da ordem de 10 ms, equivalente a um período de amostragem dos canais analógicos. Outras possíveis melhorias na técnica de fusão de dados incluem utilizar um modelo mais complexo: utilizar informações dos demais acelerômetros e giroscópios para correção de atitude; modelar as acelerações decorrentes das forças de propulsão e arrasto hidrodinâmico; utilizar informações de HDOP para alimentar a matriz de covariância e utilizar um algoritmo capaz de fundir dados provenientes da IMU e do GPS com taxas de amostragem diferentes sem necessidade de reamostragem. Outras possibilidades são utilizar uma turbina magnética para medição de velocidade e técnicas como DGPS e GPS RKT podem ser empregadas para geração desses de posição com alta precisão.

Grande parte dos recursos de *hardware* do microcontrolador não foram utilizados, incluindo três canais de A/D e dois de *encoder*. Outros sinais, como força no finca pé e ECG podem ser adquiridos nesses canais com modificações mínimas no sistema.

Em conclusão, o sistema proposto é capaz de mensurar as grandezas envolvidas na análise biomecânica durante as sessões de treinamento, podendo ser prontamente utilizado para fornecer dados valiosos para uma equipe de remo olímpico. O desempenho do protótipo desenvolvido é comparável aos sistemas acadêmicos e comerciais avaliados. Esse trabalho também estabeleceu métricas para avaliação do sistema e seus componentes, assim como sistemas similares. As limitações do sistema desenvolvido foram investigadas, de forma a serem corrigidas em desenvolvimentos futuros.

Quadro 6.1: Comparação do desempenho dos sensores com a literatura

Trabalho	Sensores	Observação
Este trabalho	Aceleração	NL < 4%
	Velocidade Angular	NL < 1%
	Ângulo horizontal	NL < 2%
	Ângulo vertical	NL < 2%
	Força	NL < 10%
	Posição de tronco	NL < 1%
	Posição de carrinho	NL < 0,5%
Monteiro <i>et al.</i> [37]	Posição de tronco	NL < 0,5%
	Posição de carrinho	NL < 0,5%
Borges [35]	Aceleração	
Limeira [36]	Ângulo horizontal	$\pm 1,5^\circ$
	Ângulo vertical	$\pm 1,2^\circ$
Bettinelli <i>et al.</i> [6]	Aceleração, Velocidade angular, Ângulo horizontal, Força, Posição de carrinho	
Smith e Loschner [24]	Aceleração, Velocidade angular, Ângulo horizontal e vertical, Força, Posição de carrinho	
Pilgeram e Delwiche [25]	Ângulo horizontal e Força	
Simoes <i>et al.</i> [29]	Posição (GPS)	
Magee e Denys [30]	Posição (GPS RTK)	
Mattes e Schaffert [28]	Aceleração	
Llosa <i>et al.</i> [26]	Cinemática do barco e dos remos	
Kleshnev [31]	Aceleração, Velocidade angular, Ângulo horizontal e vertical, Força, Posição de tronco e carrinho	
McBride e Elliott [27]	Velocidade do barco e do carrinho	
Krumm <i>et al.</i> [32]	Forças e torques no finca pé	NL < 1%

Referências Bibliográficas

- [1] LICHT, H. **O remo através dos tempos**. 2. ed. Porto Alegre: Corag, 1986. 238 p.
- [2] CONFEDERAÇÃO BRASILEIRA DE REMO. **Regras de remo**. Rio de Janeiro. 2014. Disponível em : <http://www.remobrasil.com/attachments/article/14/2014_regras_remo.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2014.
- [3] SMITH, R. M.; LOSCHNER, C. Biomechanics feedback for rowing. **Journal of Sports Sciences**, Taylor & Francis, v. 20, n. 10, p. 783–791, 2002. DOI: 10.1080/026404102320675639.
- [4] MCLEAN, J. The london regatta centre and powered rowing tank. **ARUP JOURNAL**, OVE ARUP PARTNERSHIP, v. 37, n. 1, p. 19–23, 2002.
- [5] HOLSGAARD-LARSEN, A.; JENSEN, K. Ergometer rowing with and without slides. **International journal of sports medicine**, v. 31, n. 12, p. 870–874, 2010. DOI: 10.1055/s-0030-1265148.
- [6] BETTINELLI, S. et al. An integrated data acquisition system for on-water measurement of performance in rowing. **Strain**, Wiley Online Library, v. 46, n. 5, p. 493–509, 2010. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00690.x.
- [7] HOFFMAN, K. **An introduction to Measurements using Strain Gauges**. Alsbach: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.
- [8] GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration**. 1. ed. New York: Wiley-Interscience, 2001.
- [9] LAWRENCE, A. **Modern Inertial Technology**. 2. ed. New York: Springer Verlag, 1998.
- [10] TITTERTON, D. H.; WESTON, J. L. **Strapdown Inertial Navigation Technology**. 2. ed. Stevenage: Institution of Electrical Engineers, 2004.

- [11] BARBOUR, N.; SCHMIDT, G. Inertial sensor technology trends. **Sensors Journal**, **IEEE**, v. 1, n. 4, p. 332–339, Dec 2001. DOI: 10.1109/7361.983473.
- [12] BROWN, R. G.; HWANG, P. Y. C. **Introduction to random signals and applied Kalman filtering**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons New York, 1997.
- [13] GREWAL, M. S.; ANDREWS, A. P. **Kalman filtering: theory and practice using MATLAB**. 2. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2001.
- [14] BRASIL. Lei nº 9.472, de 16 de Julho de 1997. Dispõe sobre a organização dos serviços de telecomunicações, a criação e funcionamento de um órgão regulador e outros aspectos institucionais, nos termos da Emenda Constitucional nº 8, de 1995. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 jul. 1997. Seção 1, p. 15081.
- [15] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. Resolução nº 506, de 1º de julho de 2008. Republica o regulamento sobre equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 7 jul. 2008. Seção 1, p. 86-91.
- [16] SEYBOLD, J. S. **Introduction do RF Propagation**. 1. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005.
- [17] FREEWAVE. **FGR2 Series - FGR2 900 MHz Industrial Radio**. Boulder: [s.n.], 2009.
- [18] DIGI INTERNATIONAL. **XBee-PRO® 900 - Point-to-Multipoint Embedded RF Modules for OEMs**: Product datasheet. Minnetonka: [s.n.], 2008.
- [19] INGHAM, S. et al. Determinants of 2,000m rowing ergometer performance in elite rowers. **European Journal of Applied Physiology**, Springer-Verlag, v. 88, n. 3, p. 243–246, 2002. DOI: 10.1007/s00421-002-0699-9.
- [20] HAWKINS, D. A new instrumentation system for training rowers. **Journal of Biomechanics**, Elsevier, v. 33, n. 2, p. 241–245, 2000. DOI: 10.1016/S0021-9290(99)00139-6.
- [21] BACA, A.; KORNFELD, P. In: **The Engineering of Sport 7**. [S.l.]: Springer Paris, 2008. p. 659–668. DOI: 10.1007/978-2-287-99054-0_77.

- [22] ČERNE, T.; KAMNIK, R.; MUNIH, M. The measurement setup for real-time biomechanical analysis of rowing on an ergometer. **Measurement**, v. 44, n. 10, p. 1819 – 1827, 2011. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.09.006.
- [23] KING, R. C. et al. Body sensor networks for monitoring rowing technique. **Wearable and Implantable Body Sensor Networks, 2009. BSN 2009. Sixth International Workshop on**. p. 251–255, 2009. DOI: 10.1109/BSN.2009.60.
- [24] SMITH, R. M.; LOSCHNER, C. Biomechanics feedback for rowing. **Journal of Sports Sciences**, v. 20, n. 10, p. 783–791, 2002. DOI: 10.1080/026404102320675639.
- [25] PILGERAM, K. C.; DELWICHE, M. J. Device for on-the-water measurement of rowing output. **Sports Engineering**, Springer-Verlag, v. 9, n. 3, p. 165–174, 2006. DOI: 10.1007/BF02844118.
- [26] LLOSA, J. et al. Remote, a wireless sensor network based system to monitor rowing performance. **Sensors**, Molecular Diversity Preservation International, v. 9, n. 9, p. 7069–7082, 2009. DOI: 10.3390/s90907069.
- [27] MCBRIDE, M.; ELLIOTT, B. Use of real-time telemetry to monitor instantaneous seat and boat velocity in pair oared rowing. **ISBS-Conference Proceedings Archive**. v. 1, n. 1, 1999.
- [28] MATTES, K.; SCHAFFERT, N. New measuring and on water coaching device for rowing. **Journal of Human Sport & Exercise**, v. 5, n. 2, 2010. DOI: 10.4100/jhse.2010.52.11.
- [29] SIMOES, N. et al. Zigbee/gps tracking system for rowing races. **EUROCON - International Conference on Computer as a Tool**. p. 1–4, April 2011. DOI: 10.1109/EUROCON.2011.5929248.
- [30] MAGEE, B.; DENYS, P. Dynamics of a rowing skiff: evaluating the leica gps 1200 series. 2004. Disponível em : <http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/gps/gps1200/tech_paper/Evaluating_Leica_GPS1200_en.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2014.
- [31] KLESHNEV, V. Rowing biomechanics: technology and technique. 2004. Disponível em : <http://www.biorow.com/Papers_files/2004%20Rowing%20Technology%20and%20Technique.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2014.

- [32] KRUMM, D. et al. High-fidelity device for online recording of foot-stretcher forces during rowing. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 2, n. 2, p. 2721–2726, 2010. DOI: 10.1016/j.proeng.2010.04.057.
- [33] WANG, P.-Y.; QU, A.-I.; RANG, H.-G. A multiparameter telemetering system used in shell rowing study. **Engineering in Medicine and Biology Society, 1992 14th Annual International Conference of the IEEE**. v. 3, p. 1287–1288, Oct 1992. DOI: 10.1109/IEMBS.1992.5761786.
- [34] HUNTSMAN, H. D. et al. Development of a valid rowing-specific vo2max field test: 3043: board# 146 june 5 9: 30 am-11: 00 am. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, LWW, v. 42, n. 5, p. 838, 2010.
- [35] BORGES, A. C. S. **Instrumentação para remo olímpico**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) — COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- [36] LIMEIRA, H. C. **Medidor de ângulos de remada**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Computação) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- [37] MONTEIRO, F. S. P. et al. Sensores de posição linear para análise biomecânica do remo olímpico. **Anais...** p. 1429–1432, 2012. Apresentado a 23. Congresso Brasileiro de Engenharia BIOMÉDICA, Porto de Galinhas, 2012.
- [38] KLESHNEV, V. Temporal analysis of stroke cycle in rowing. **Proceeding of XXVI Symposium on biomechanics in sport**. 2007. Disponível em : <http://biorow.org/publ/2007_temporal_analysis_of_stroke_cycle_in_rowing/1-1-0-22>. Acesso em: 3 jun. 2014.
- [39] BIOROW. **telemetry system BiorowTel v. 2012**: Develop your ideal rowing technique with biorow lab. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em : <<http://biorow.ucoz.com/rtr/1-1-1>>. Acesso em: 2 jun. 2014.
- [40] PEACH INOVATIONS. **Peach Inovations Hardware Manual 2013**. [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em : <<http://www.peachinnovations.com/download.php?f=v4/MANUAL2013.pdf>>. Acesso em: 2 jun. 2014.
- [41] NIELSEN-KELLERMAN. **NK Rowing Paddling Catalog**. [S.l.: s.n.]. Disponível em : <http://www.nkhome.com/pdfs/NK_RowingCatalog_lowRes.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2014.
- [42] SMARTOAR TECHNOLOGIES. **SmartOar Self-Recording**. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em : <http://smartoar.com/yahoo_site_

admin/assets/docs/SelfRecording_Users_Guide_June_21st_2012.172120305.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2014.

- [43] ARONDIGHTH. **Digital Data Aquisition Oar**. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em : <http://www.rowingsa.asn.au/uploaded_files/document_uploads/e-News/10_10_12ArondightBrochure_to_EMAIL.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2014.
- [44] BURR-BROWN CORPORATION. **INA118 Datasheet**. Tucson: [s.n.], 1998. Disponível em : <<http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?literatureNumber=sbos027>>. Acesso em: 10 mar. 2014.
- [45] VINCENTY, T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. **Survey review**, Maney Publishing Suite 1C, Joseph's Well, Hanover Walk, Leeds LS3 1AB, UK, v. 23, n. 176, p. 88–93, 1975.
- [46] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions**. Genève: [s.n.], 1994.

Apêndice A

Diagramas Esquemáticos

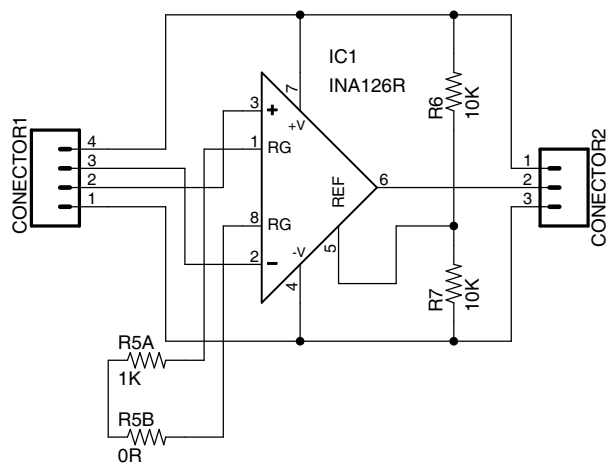
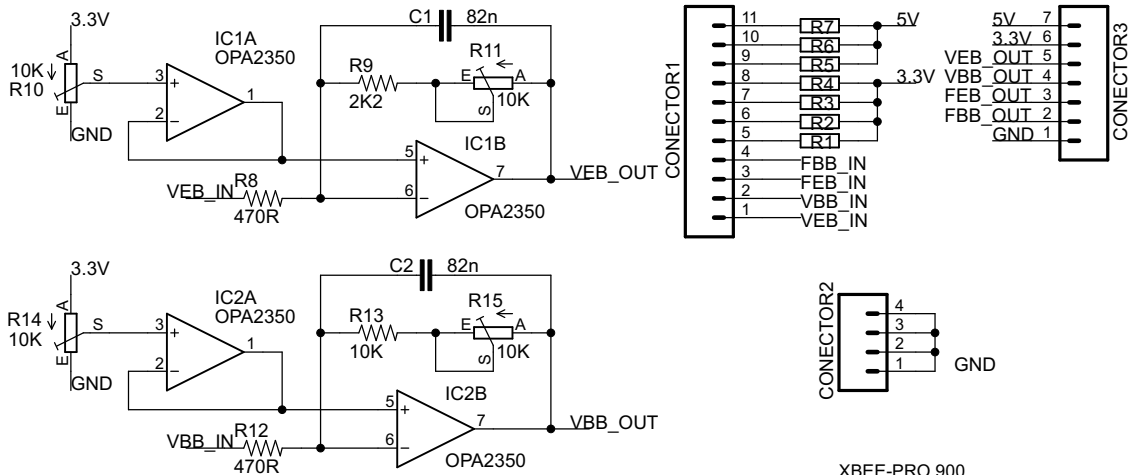


Figura A.1: Diagrama esquemático do primeiro estágio de amplificação do sensor de força.

AMPLIFICADORES - SENSORES DE ÂNGULO VERTICAL



AMPLIFICADORES - SENSORES DE FORÇA

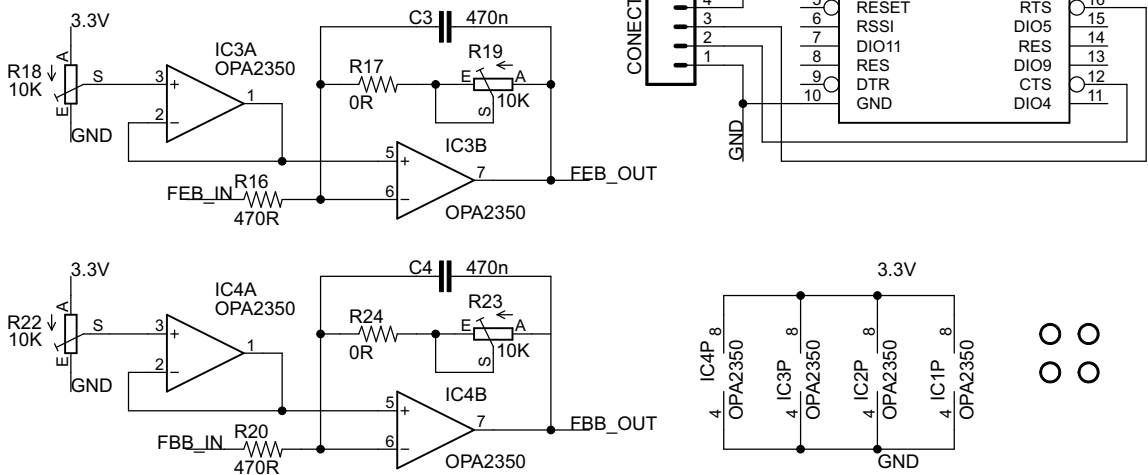


Figura A.3: Diagrama esquemático da placa de condicionamento de sinais e *modem* de rádio.

Tabela A.2: Mapa das conexões dos sensores

hline Microcontrolador	Função	Função	Cor	Descrição
AN0	RB0	VEB	Amarelo	Ângulo Vertical do remo de boreste
AN1	RB1	HEB	Verde	Ângulo Horizontal do remo de boreste
AN2	RB2	FEB	Azul	Força no remo de boreste
AN3	RB3	ACZ	-	Aceleração no eixo Z - Afundamento
AN4	RB4	RPI	-	Velocidade angular no eixo Y - Arfagem
AN5	RB5	RRO	-	Velocidade angular no eixo X - Rolagem
AN6	RB6	CAL	Azul	Calibrador de força
AN7	RB7	-	-	Reservado
AN8	RB8	ACY	-	Aceleração no eixo Y - Deriva
AN9	RB9	ACX	-	Aceleração no eixo X - Avanço
AN10	RB10	-	-	Reservado
AN11	RB11	-	-	Reservado
AN12	RB12	BAT	Vermelho	Tensão da bateria
AN13	RB13	VBB	Amarelo	Ângulo Vertical do remo de boreste
AN14	RB14	HBB	Azul	Ângulo Horizontal do remo de boreste
AN15	RB15	FBB	Azul	Força no remo de boreste
RC14	ENC0	PPC	Branco	Posição do carrinho
RC13	ENC1	PPT	Amarelo	Posição do tronco
RD4	ENC2	-	Verde	-
RD5	ENC3	-	Azul	-
RD6			-	Reservado
RD7			-	Reservado
RD14			-	Reservado
RD15			-	Reservado

Tabela A.3: Mapa das conexões entre microcontrolador e recptor de GPS

GPS	Microcontrolador
TX0	U2RX/RF4
RX0	U2TX/RF5

Tabela A.4: Mapa das conexões entre microcontrolador e o *modem* de rádio

GPS	Microcontrolador
DOUT	U1RX/RF2
DIN	U1TX/RF8
$\overline{\text{RTS}}$	U2CTS/RF12

Apêndice B

Desenhos das Placas de Circuito Impresso

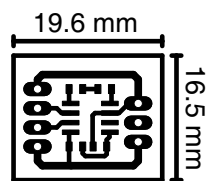
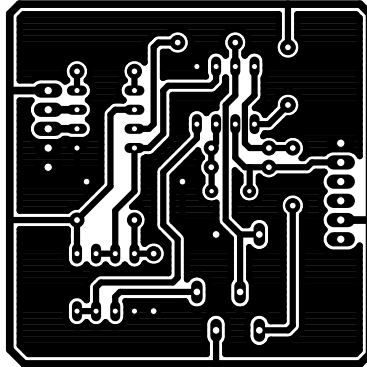
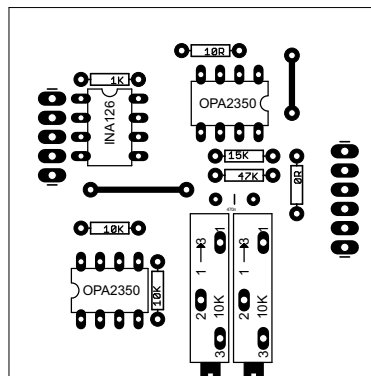


Figura B.1: Placa de circuito impresso do primeiro estágio de amplificação do sensor de força.



(a) Camada de cobre inferior



(b) Posicionamento dos componentes

Figura B.2: Placa de circuito impresso circuito de condicionamento do calibrador do sensor de força.

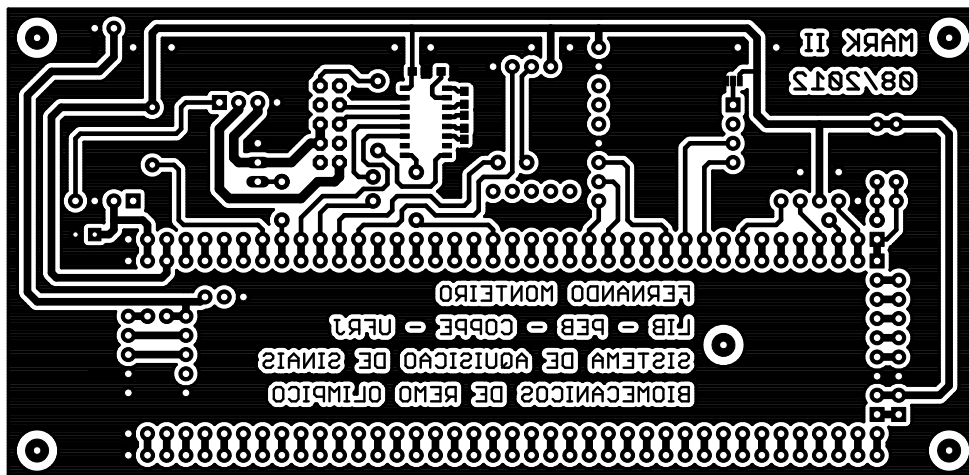
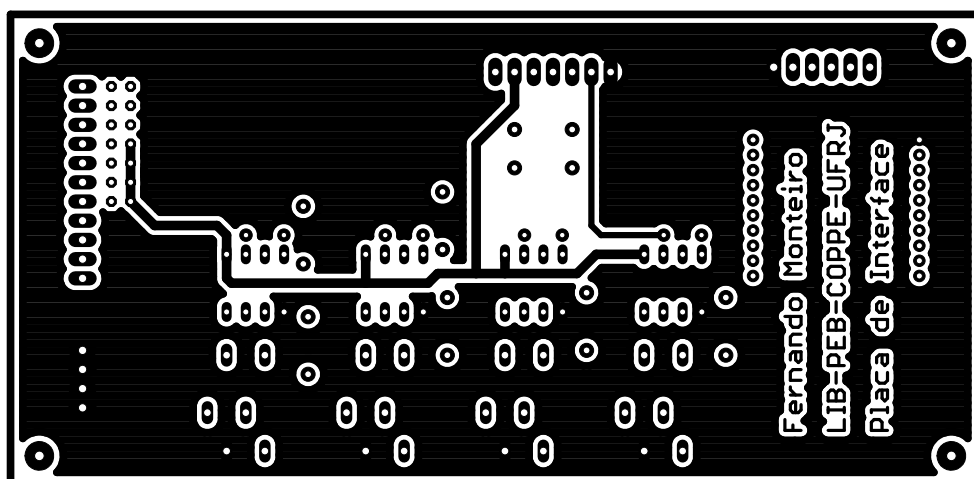
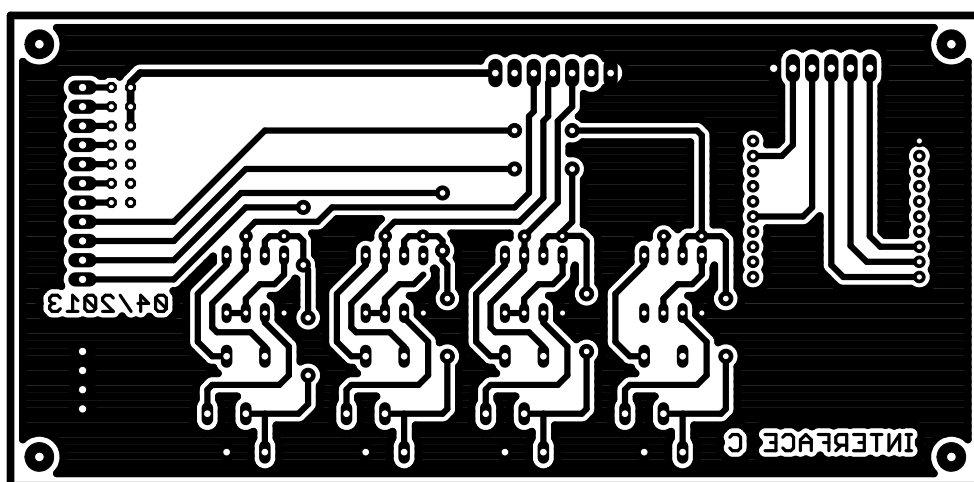


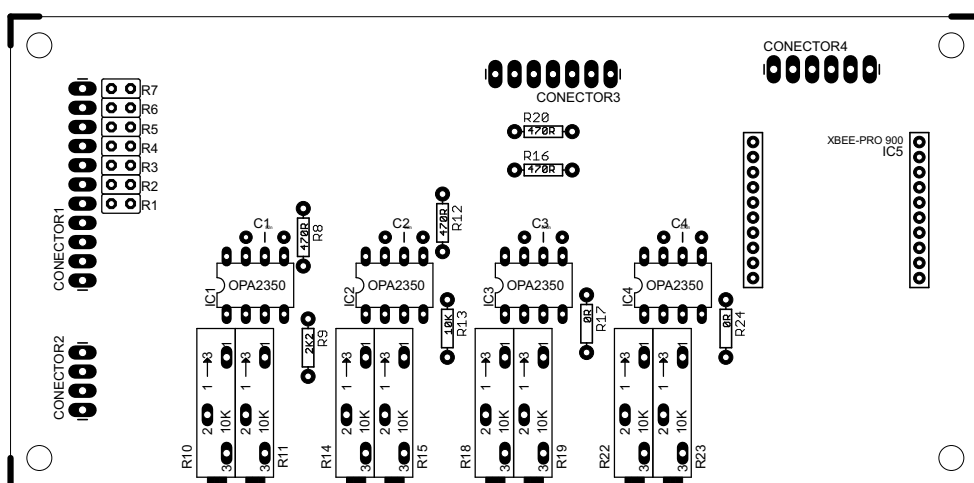
Figura B.3: Placa adaptadora do sistema de aquisição.



(a) Camada de cobre superior



(b) Camada de cobre inferior



(c) posicionamento dos componentes

Figura B.4: Placa de circuito impresso de condicionamento de sinais e *modem* de rádio.

Apêndice C

Códigos de Componentes

Tabela C.1: Códigos dos componentes comprados na Sparkfun

Componente	Código
USB 32-Bit Whacker - PIC32MX795 Development Board	DEV-09713
IMU Analog Combo Board - 5 Degrees of Freedom IDG500/ADXL335	SEN-11072 ¹
Power Cell - LiPo Charger/Booster	PRT-11231
Venus GPS with SMA Connector	GPS-11058
Antenna GPS Embedded SMA	GPS-00177
Breakout Board for microSD Transflash	BOB-00544
Polymer Lithium Ion Battery - 2000mAh	PRT-08483
XBee Pro 900 RPSMA	WRL-09099
XBee Explorer USB	WRL-08687
Rotary Encoder - 200 P/R (Quadrature)	COM-10932

¹Essa placa não é mais fabricada. Mais detalhes no apêndice D.2.1

Tabela C.2: Códigos dos componentes comprados na Digikey

Componente	Fabricante	Cod. Fabricante	Cod. Digikey
Potenciômetro IP67	CTS Electrocomponents	248TBCF103A26A1	CT3033-ND
Conector SMA de antepara	Amphenol Connex	132170RP	ACX1245-ND
Conector IP67 Macho	Hirose Electric Co Ltd	HR30-6R-6P(71)	HR588-ND
Conector IP67 Fêmea	Hirose Electric Co Ltd	HR30-6P-6S(71)	HR579-ND
Tampa do conector IP67 Macho	Hirose Electric Co Ltd	HR30-6R-C(71)	HR601-ND
Tampa do conector IP67 Fêmea	Hirose Electric Co Ltd	HR30-6P-C(71)	HR598-ND
Conector USB IP68	Bulgin	PX0843/B	708-1023-ND
Tampa do conector USB IP68	Bulgin	PX0733	708-1180-ND
Caixa IP67	Bud Industries	PN-1324-C	377-1123-ND
Chave IP67	Apem Inc.	IPR1SAD2	679-1099-ND
Chave Momentânea IP67	C&K Components	AP4E200TZBE	CKN9995-ND
INA118U 8-SOIC	Texas Instruments	INA118U	INA118U-ND
OPA2350PA-ND 8-PDIP	Texas Instruments	OPA2350PA	OPA2350PA-ND
Fusível térmico rearmável 0.05A	TE Connectivity	RXEF005-2	RXEF005-ND

Apêndice D

Lista de Problemas Conhecidos

D.1 Sistema de Aquisição

D.1.1 Gravação no cartão SD

Da forma que o *firmware* foi escrito qualquer arquivo que não for fechado corretamente tem grande probabilidade de ser corrompido. O sistema é protegido contra desligamento e paradas provocados por acionamento acidental dos botões liga/desliga e iniciar-terminar, no entanto outras condições podem levar o sistema a um desligamento acidental, por exemplo descarga da bateria ou falha na alimentação devido à perda de estanqueidade. É desejável que os arquivos possam ser recuperados.

Uma possível solução consiste em gravar múltiplos arquivos (por exemplo um a cada 5 minutos) para um único registro, de forma que somente o último seja comprometido.

Outra limitação do sistema está relacionada com o sistema de alocação de arquivos do cartão micro-SD. Da forma que o *firmware* está escrito somente cartões com sistema de alocação FAT16 limitando a capacidade de armazenamento a 2 GB, o que é suficiente para centenas de horas de gravação contínua, no entanto cartões de 2 GB estão obsoletos, e sua obtenção é cada vez mais cara e difícil. Algumas possibilidades são modificar o software para permitir cartões que usem FAT32 ou formatar todos os cartões em FAT16, subaproveitando a capacidade de armazenamento de cartões de maior capacidade.

D.1.2 GPS

Apesar da resolução temporal do GPS utilizado ser de um milésimo de segundo, a resolução final é limitada pela comunicação serial, resultando em uma resolução maior que o intervalo de amostragem do conversor A/D.

O sistema de aquisição e o GPS possuem relógios não sincronizados, dificultando o processamento.

O uso de um sinal de uma única referência de relógio para aquisição, proveniente do GPS, resolveria esse problema. O GPS utilizado no projeto possui apenas uma saída de sincronismo (1PPS - 1 pulso por segundo) que pode ser utilizada para esse fim. Outra solução consiste em usar receptores de GPS possuem saídas de sincronismo com frequência programável.

D.2 Sensores

D.2.1 Sensores Inerciais

Os sensores inerciais utilizados possuem saída analógica e são amostrados por um conversor A/D de 10 bits, resultando em uma enorme degradação dos sinais e consequentemente da solução de navegação inercial. Uma possível solução é amplificar os sinais antes de aplicá-los no conversor A/D, no entanto o giroscópio biaxial IDG500 não é mais produzido e existem atualmente poucos modelos de giroscópio MEMS com saídas analógicas disponíveis.

Sugere-se que nas próximas versões se utilize uma unidade de medição inercial de 6 graus de liberdade, com um erro RMS inferior a $0.05^\circ/\text{s}$ e 5 mg , que utilize um canal de comunicação digital (SPI, I2C) com o microcontrolador. O uso de um magnetômetro triaxial em conjunto com a central inercial também é desejável.

D.2.1.1 Sensores de Posição de Carrinho e Tronco

Apesar da interrupção de leitura de encoder funcionar adequadamente, ela consome recursos computacionais do microcontrolador. É possível um circuito integrado dedicado HCTL-2020 ou LS7366R (preferencialmente o último, dado que este utiliza comunicação SPI), ou ainda um microcontrolador dedicado, para totalizar os pulsos provenientes do encoder, de modo a liberar recursos computacionais que podem ser necessários em futuras versões.

D.3 Processamento de Dados

O software para processamento dos sinais de biomecânicos não permite operação com dois ou mais arquivos simultâneos, impossibilitando utilizar um arquivo (com dados do calibrador de força) para calibrar o outro arquivo.

O sistema de calibração incorporado não permite calibrar um sinal por meio de uma combinação linear de vários canais. a calibração típica de uma IMU utiliza

uma matriz de calibração para corrigir o desalinhamento entre os eixos da IMU e da plataforma.

Apêndice E

Permissão de Uso de Figuras

As Figuras 4.1, 4.18, 4.19, 4.20a, 4.20a, 4.21a, 4.21b, 4.22a e 4.22b são de autoria de SparkFun Electronics (EUA) e tem seu uso permitido previamente para fins acadêmicos ou não comerciais (Disponível em: <https://www.sparkfun.com/static/contact#photos>).

As demais Figuras são de autoria própria.