

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Departamento de Eletrônica e de Computação

Medidor de ângulos de remada

Autor:

Hudson Cabral Limeira

Orientador:

Prof. Alexandre Visintainer Pino, D. Sc.

Examinador:

Prof. Marcio Nogueira de Souza, D. Sc.

Examinador:

Prof. Carlos Julio Tierra Criollo, D. Sc.

DEL

Fevereiro de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Escola Politécnica – Departamento de Eletrônica e de Computação

Centro de Tecnologia, bloco H, sala H-217, Cidade Universitária

Rio de Janeiro – RJ CEP 21949-900

Este exemplar é de propriedade da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

*Aos meu pais, Francisco e Janeth,
e minha irmã, Érica.*

AGRADECIMENTO

Ao professor Alexandre Pino pelo apoio, orientação e tempo dedicado ao projeto.

Aos meu pais e irmã por todo apoio, incentivo e paciência.

À equipe de Remo do Clube de Regatas do Flamengo pela sua prestatividade.

RESUMO

Este trabalho consiste no projeto de um sistema capaz de medir os ângulos de remada (horizontal e vertical) que são efetuados por um atleta no esporte Remo. Esse sistema é composto por um transdutor, que possui um elemento sensor para cada eixo e um suporte, além de um *datalogger* responsável por fazer a aquisição dos dados. A fim de ajudar na análise dos dados obtidos, um GPS para medir a velocidade média e um acelerômetro medindo em 2 eixos para acompanhar os efeitos do remo na locomoção são instalados. O elemento sensor utilizado é o potenciômetro chamado, comercialmente, de Constanta. O suporte é feito em alumínio, material com boa facilidade de ser moldado em maquinário semi-profissional.

São realizados dois experimentos, no próprio barco, para o levantamento da relação entre a tensão do potenciômetro de cada eixo e o respectivo ângulo e para realizar o estudo das incertezas. Além desses dois experimentos, é feito um ensaio na qual o sistema de medição funciona por todo um treino de um atleta profissional do Clube de Regatas do Flamengo, na lagoa Rodrigo de Freitas – Rio de Janeiro - RJ.

Os resultados dos testes mostram que os sinais de aceleração, ângulo horizontal e ângulo vertical condizem com a literatura sobre o assunto. Também é concluído que o modelo do suporte se mostra adequado, não atrapalhando o remador e protegendo os potenciômetros. Observa-se que o elemento sensor apresenta durabilidade suficiente para um treino, e talvez mais, mas são propostas alternativas a eles que podem ser consideradas em trabalhos futuros. As incertezas do sistema são de $\pm 1,5^\circ$ no eixo vertical e de $\pm 1,2^\circ$ no eixo horizontal, com nível de confiança de 95%. O ângulo vertical obtido no ensaio variou de $+10^\circ$ a -5° , enquanto que o ângulo horizontal ficou entre $+60^\circ$ e -35° .

Palavras-Chave: Remo, remo, remada, sensor, ângulo, esporte.

ABSTRACT

This work consists of the design of a system capable of measuring the angles of stroke (horizontal and vertical) that are made by an athlete in the rowing sport. The system is composite of a transducer, which has a sensor element for each axis and a support, and a datalogger responsible for making the data acquisition. In order to assist in data analysis, a GPS to measure the average speed and a two axes accelerometer to follow the effects of rowing locomotion are installed. The sensor element used is a potentiometer called, commercially, Constanta. The support is made of aluminum, a material with a good ease of being shaped into semi-professional machinery.

Two experiments are conducted, at the boat itself, to survey the relationship between the voltage potentiometer of each axis and its angle. Besides these two experiments, an essay is made, which the measuring system ran for an entire training of a professional athlete's club Flamengo, at the Rodrigo de Freitas Lagoon - Rio de Janeiro – RJ.

The test results shows that the acceleration signals, horizontal angle and vertical angle are consistent with the literature about the subject. It is also concluded that the support model is adequate, not disturbing the rower and protecting the potentiometers. It is observed that the sensor element shows sufficient durability for one training, and maybe more, but are purposed alternatives for them that may be considered in futures works. The system uncertainties are $\pm 1.5^\circ$ in the vertical axis and $\pm 1.2^\circ$ in the horizontal axis, with a confidence level of 95%. The vertical angle obtained in the assay ranged from $+10^\circ$ to -5° , while the horizontal angle was between $+60^\circ$ and -35° .

Keywords: row, oar, rowing, sensor, angle, sport.

SIGLAS

UFRJ- Universidade Federal do Rio de Janeiro.

LIB- Laboratório de Instrumentação Biomédica.

COPPE- Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia.

COB- Comitê Olímpico Brasileiro.

COI- International Olympic Committee.

PEB- Programa de Engenharia Biomédica.

CBR- Confederação Brasileira de Remo.

Sumário

Capítulo 1 Introdução.....	10
1.1 Tema.....	10
1.2 Delimitação.....	10
1.3 Justificativa.....	11
1.4 Objetivos.....	13
1.5 Metodologia.....	13
1.6 Descrição.....	14
Capítulo 2 Revisão teórica.....	15
2.1 O início do Remo no cenário do Rio de Janeiro.....	15
2.2 O Remo.....	16
2.3 Sistemas Comerciais para Medida de Ângulo de Remada.....	23
2.4 Instrumentação em outros trabalhos.....	27
Capítulo 3 Materiais e métodos.....	32
3.1 O transdutor.....	32
3.2 O circuito do medidor de ângulos.....	42
3.2.1 Implementação.....	48
3.3 Modelo de medição.....	48
3.4 Métodos de medição.....	48
3.4.1 Levantamento do eixo vertical.....	49
3.4.2 Levantamento do eixo horizontal.....	51
3.5 Balanço de incerteza.....	52
3.6 Procedimento de teste.....	55
Capítulo 4 Resultados.....	56
4.1 Curvas de calibração.....	56
4.2 Ensaio no barco.....	63
Capítulo 5 Discussão.....	67

Capítulo 6 Conclusão.....71

Capítulo 1

Introdução

1.1 Tema

Neste trabalho, é proposto um sistema capaz de medir os ângulos vertical e horizontal do remo, com o intuito de ajudar na compreensão da técnica e no treinamento de atletas. Para alcançar esse objetivo, utilizam-se conhecimentos de instrumentação e ergonomia física (ciência que estuda a anatomia humana, antropometria, fisiologia e biomecânica).

Em especial, tópicos de aquisição de sinais, curvas de calibração, incertezas de medidas e análise de resultados são abordados no campo da instrumentação. Na aquisição de sinais, há a discussão de tipos de transdutores possíveis, para o dado problema; o projeto de um suporte que permita, de maneira satisfatória, o funcionamento desses transdutores; o uso de *datalogger* baseado em microcontrolador; e a utilização do software científico MATLAB. A extração da resposta do sensor, através de experimentos inéditos no próprio barco, combinada a técnicas de regressão, resulta nas curvas de calibração e nas incertezas do sistema. Já no ramo da ergonomia física, o foco é sobre a biomecânica, estudo das características mecânicas de um sistema biológico.

1.2 Delimitação

O Clube de Regatas do Flamengo expôs ao LIB/COPPE, em 2010, a necessidade de um sistema de apoio ao treinamento de sua equipe de Remo. Desde então, o tema é estudado por aquele laboratório, obtendo suas primeiras soluções (entre elas uma primeira versão de um medidor de ângulos de remada), que ainda não são definitivas devido a fatores dificultadores da medição.

Logo, a demanda do trabalho é do Laboratório de Instrumentação Biomédica/COPPE.

1.3 Justificativa

Desde 2009, quando o Brasil foi selecionado para sediar a primeira olimpíada da América do Sul, discussões sobre os preparativos do evento se multiplicam pelos meios de comunicação, governo e população. Pesados investimentos em infra-estrutura, e um

orçamento sem igual, na nossa história, para o treinamento de atletas têm sido feitos com a meta de, segundo o Comitê Olímpico Brasileiro (COB), incluir o país entre os dez com o maior número de medalhas no quadro geral dos jogos [10].

Pensava-se que parte dos frutos dessa preparação já seriam colhidos nas Olimpíadas de Londres (2012), mas não foi o que ocorreu. O Brasil conquistou 17 medalhas, apenas duas a mais que os jogos de Atlanta-1996 e Pequim-2008, ficando na 16ª posição. Como a décima posição foi da Itália, com 28 medalhas, o Brasil precisaria conquistar mais 11 medalhas, talvez 12 devido ao critério de desempate, para chegar ao lugar pretendido 4 anos mais tarde [11].

Para esse crescimento de vitórias, existem duas alternativas: poucas vitórias em diversos esportes diferentes, ou muitas vitórias em poucos deles. A segunda alternativa possui vantagens, pois permite o reaproveitamento de recursos e técnicas de determinada categoria para outra categoria do mesmo esporte. Mas nem todos os tipos de competições possuem muitas medalhas disponíveis, o futebol, por exemplo, possui apenas uma no masculino e uma no feminino. Assim, o Remo é estrategicamente interessante, pois é possível obter 14 medalhas, ao todo, nas suas diferentes variantes, quantidade mais que satisfatória.

Infelizmente, todo esse arsenal de medalhas nunca esteve ao alcance da comitiva brasileira, em nenhuma das três colocações do pódio, mostrando claramente a necessidade de iniciativas que ajudem a alavancar os resultados. O sensor tratado aqui vem ao encontro desse fato, pois, através dos dados apontados por ele, conclusões acerca do movimento de remada, fator preponderante para o desempenho do atleta, são tiradas. Atualmente, essas informações estão restritas às equipes do exterior, devido a falta de disponibilidade de um sistema nacional.

De fato, países com sistemas nacionais possuem participação mais vitoriosa nesse esporte. Esse é o caso de Austrália, Nova Zelândia, Grã-Bretanha, Estados Unidos e Alemanha, que juntos conquistaram 72% das medalhas de ouro em Londres [11]. Um caso interessante é o da Alemanha que utiliza um sistema, o qual inclui a medida de ângulos de maneira parecida com a mostrada aqui, em duas categorias da sua seleção, conquistando, em Londres, ouro somente nessas duas; segundo o próprio técnico, os remadores alemães não possuem a melhor técnica, mas foram otimizados. Assim, conclui-se que as equipes mais vencedoras utilizam esse sensoriamento, chegando muito provavelmente ao pódio.

Dois exemplos comerciais desses sistemas são o austríaco RowX Outdoor e o britânico PowerLine Rowing Instrumentation. Eles permitem a leitura de diversas variáveis envolvidas no movimento, possibilitando ao atleta a correção de sua técnica em diferentes campos, como: força aplicada ao remo, velocidade e aceleração do barco. A medição dos ângulos de remada também é feita por eles, com três pontos a se observar: um é a limitação de só mostrarem a leitura do ângulo horizontal, enquanto, no proposto aqui, o ângulo vertical também é lido; o segundo é o preço de U\$3012 para apenas a medição desse ângulo (e da força aplicada ao remo), em somente um dos remos, enquanto o custo previsto para somente a medição dos ângulos em um remo, neste trabalho, seja em torno de U\$100; e o outro é a impossibilidade de uso do equipamento habitual do atleta, por serem baseados na substituição de peças do barco, o que não ocorre no deste trabalho.

Embora o tipo de sensoriamento discutido aqui tenha se demonstrado um bom método em diferentes equipes pelo mundo, não é a única forma de se coletar informações do atleta. A geração e estudo de videogramas, sequências quadro a quadro geradas após a filmagem de um treino ou competição, também pode ser feita. A crescente capacidade de aumentar a taxa de quadros por segundo da gravação, junto com técnicas mais recentes de processamento de imagens, confere poder a esse método mais antigo; mas o desconhecimento da melhor colocação dos marcadores, pontos de referência fixados no atleta, e a possibilidade de alteração da posição deles, durante a execução dos movimentos, são fontes comuns de erros. Portanto, o método deste trabalho possui vantagens em relação a outras técnicas usadas, já que as suas limitações, como o incômodo que poderia vir a causar ao remador e o erro da medida, são amenizados.

Ao passo que a tecnologia avança, o esporte, como um todo, ganha novas ferramentas de apoio para alcançar melhores resultados. Essas ferramentas podem ser desde o campo da medicina esportiva até o melhoramento das técnicas utilizadas. Aqui trataremos de um sensor que visará à medição de ângulos de remada, permitindo ao atleta obter mais informações sobre a execução dos seus movimentos e, assim, melhorar sua performance. Geralmente o único retorno que eles possuem é o do técnico, mas, como o mesmo realiza um acompanhamento visual e a certa distância, alguns detalhes passam despercebidos. Além do apoio direto ao atleta, ele proporcionará aos técnicos a possibilidade de montar equipes com perfis considerados mais adequados, já que o tipo de remada é parte fundamental para a maneira na qual o barco é deslocado.

1.4 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é propor um sistema capaz de medir os ângulos vertical e horizontal realizados na remada do esporte Remo, auxiliando os atletas a obterem melhores desempenhos.

Os objetivos específicos desse projeto de fim de curso podem ser resumidos em:

- Desenvolvimento de um modelo que permita bom encaixe, sem atrapalhar o movimento realizado;
- Levantamento das curvas de calibração (tensão-ângulo) do sensor;
- Instalação no barco e análise dos resultados obtidos durante um treino do remador.

1.5 Metodologia

Para alcançar os objetivos do trabalho, um levantamento das alternativas de sensores e transdutores é feito, buscando-se aliar preço, durabilidade e confiança. A solução adotada é aperfeiçoar um modelo usado no LIB/COPPE, que media apenas ângulos horizontais (utilizando potenciômetro). São feitas mudanças no seu projeto para solucionar problemas existentes e adicionar a medição do ângulo vertical. A aquisição de dados é feita por um microcontrolador que já era usado pelo antigo modelo, e o processamento de sinais é feito através do *software* Mecânica, feito em MATLAB e desenvolvido no LIB/COPPE.

1.6 Descrição

No capítulo 2, é feita uma revisão geral para situar o leitor no assunto abordado. O capítulo 3 apresenta os métodos de levantamento das curvas e o método de ensaio. Os resultados dos levantamentos e do ensaio são mostrados no capítulo 4 para serem analisados no capítulo 5. Por fim, as conclusões estão no capítulo 6.

Capítulo 2

Revisão teórica

2.1 O início do Remo no cenário do Rio de Janeiro.

O Remo brasileiro está intimamente ligado ao Rio de Janeiro. Foi aqui, em 1851, que foi fundado o Grupo dos Mareantes, o primeiro clube de Remo do Brasil. O clube se localizava em Niterói, mas foi na cidade do Rio de Janeiro que foi realizada a primeira regata, no dia 1 de novembro de 1851, na enseada de Botafogo. A segunda regata foi realizada poucos dias depois, em Niterói, em 3 de dezembro do mesmo ano. O clube duraria apenas um ano, devido a um incidente que levou o remador Américo Silva à morte após o naufrágio de uma embarcação. Mesmo assim, o Remo se tornaria um dos principais esportes do Rio de Janeiro com um crescimento de participantes e de público sem igual para a época.

Entre 1874 e 1898 foram criados em torno de 15 clubes de regatas só no Rio de Janeiro. Foi nesta época que surgiram clubes como o Club de Regatas Botafogo (1894), o Club de Regatas do Flamengo (1897) e o Clube de Regatas Vasco da Gama (1898). Hoje os três clubes são mais conhecidos pelos seus times de futebol, mas, até o começo dos anos de 1930, o Remo era o esporte mais importante para estes clubes.

Com todo esse crescimento em menos de 50 anos, já surgiam grupos pensando em organizar o esporte nos estados e no país. A primeira instituição deste tipo foi o Comitê de Regatas do Rio Grande do Sul, criado em 1894, hoje Federação de Remo do Rio Grande do Sul. Apenas um ano depois, com o maciço apoio dos clubes Fluminenses, foi criada a União de Regatas Fluminense, cujo código para regatas só foi aprovado em 1897, quando foi oficialmente instalada. Com o passar do tempo esta entidade foi evoluindo, mudando de nome, e representando cada vez mais clubes.

A União de regatas Fluminense organizou o primeiro Campeonato Náutico Brasileiro em 1898, na enseada de Botafogo, com uma raia formada pelo aproveitamento máximo da profundidade da enseada (Figura 1). Em 1902, já com o nome de Federação Brasileira das Sociedades de Remo, a entidade começou a organizar os campeonatos brasileiros de remo. Em 1903, mesmo representando principalmente os clubes do Rio de Janeiro, esta entidade passou a ser reconhecida pela FISA (*Fédération Internationale des Sociétés d’Aviron*) como a representante oficial do Remo brasileiro. Aliado a este fato, a presença de importantes figuras da sociedade brasileira nas

competições contribuiu para que o Remo no Rio de Janeiro se tornasse referência para o Remo nacional. De 1902 até 1990, por exemplo, o Rio de Janeiro venceu 173 de 231 provas disputadas nos campeonatos brasileiros [1].

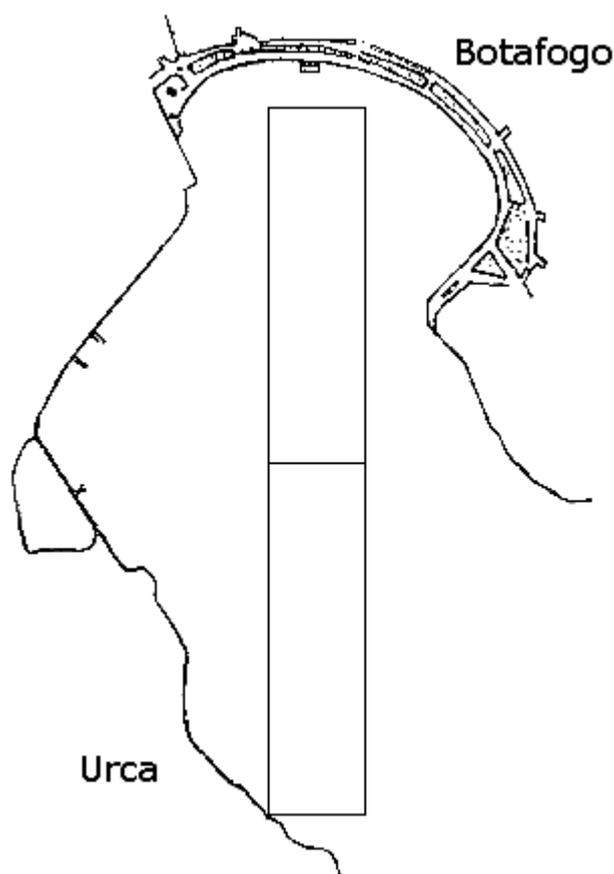


Figura 1 - Raias dos primeiros Campeonatos Náuticos Brasileiros. Fonte: Confederação Brasileira de Remo [1].

2.2 O Remo

No ramo da navegação, há denominações específicas para as partes do barco. A parte da frente, coincidente com o sentido do deslocamento, é chamada de proa; já a de trás é a popa (ou ré); a esquerda, onde se realizou a implementação e o teste do sensor, é o bombordo; restando a direita, que é chamada de estibordo. Para auxiliar este texto, também são denominadas 3 direções, os eixos X, Y e Z (Figura 2).

Para haver a locomoção do barco, é feito um movimento de alavanca pelo atleta. Assim, como em todo movimento desse tipo, há a necessidade de um ponto de apoio. Nesse esporte, a alavanca se chama remo e o ponto de apoio é chamado de forqueta, a qual está instalada em um eixo chamado de pino, objetos que serão muito mencionados ao longo do texto (Figura 3a e 3b). A estrutura que prende a forqueta ao barco possui diferentes geometrias, arrumações e número de braços (tubos que servem como suporte

da forqueta); como o sistema deve funcionar para todos esses tipos, o projeto é pensado, instalado e ensaiado em um barco com as características da Figura 3c, pois, por possuir maiores restrições quanto a espaço e movimentação, torna fácil a instalação dele em outros modelos.

Nessa locomoção, outros componentes estão presentes e , ainda que não sejam o foco do nosso estudo, o entendimento deles contribui para o esclarecimento da mecânica envolvida. Um deles é o finca-pé, local destinado a servir de apoio para os pés, que, ao receber a impulsão das pernas do atleta, provoca o deslocamento do carrinho, nome dado ao componente sobre o qual ele se senta, ao longo do trilho. A utilização de todo o trilho é característica de um bom remador por ela ajudar a alcançar uma remada de maior amplitude, o que permite alcançar maiores velocidades (Figura 4).

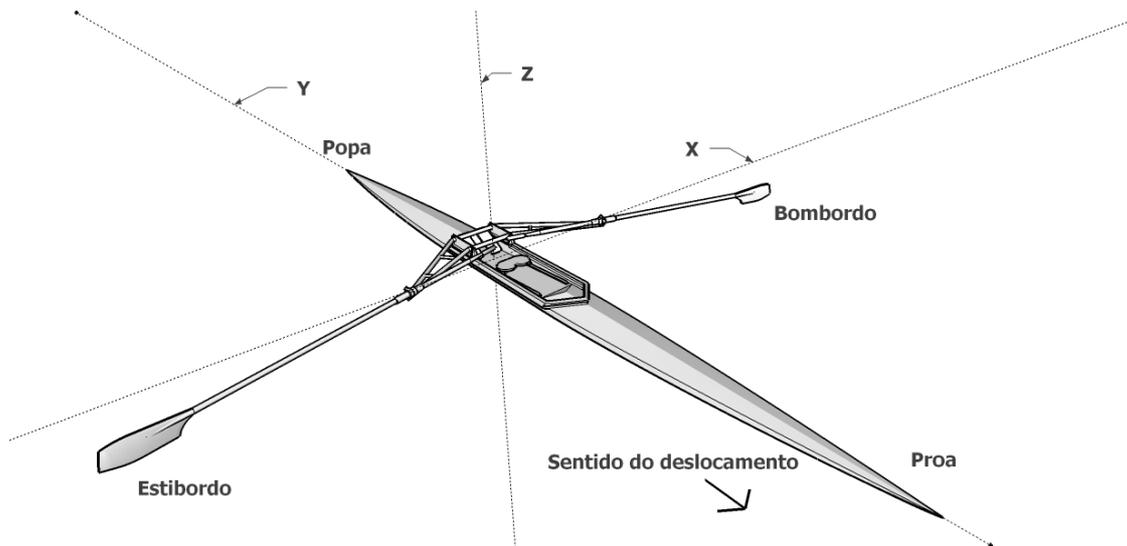


Figura 2 - Termos usados para as diferentes partes do barco, e eixos usados para auxiliar o texto.

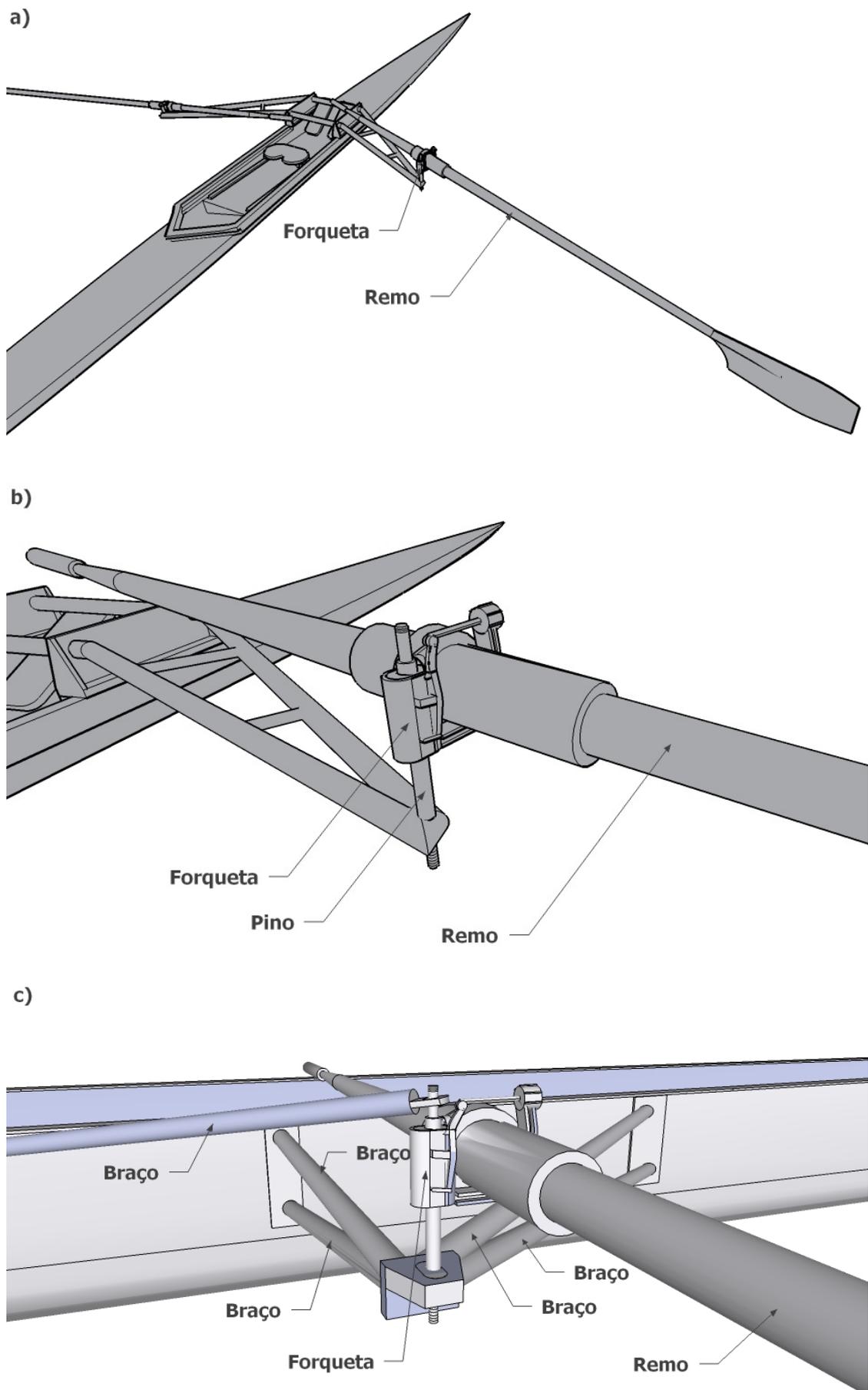


Figura 3 - a) Localização do remo e da forqueta. b) Detalhe do encaixe entre remo e forqueta. c) Detalhe do encaixe entre remo e forqueta em um barco com cinco braços.

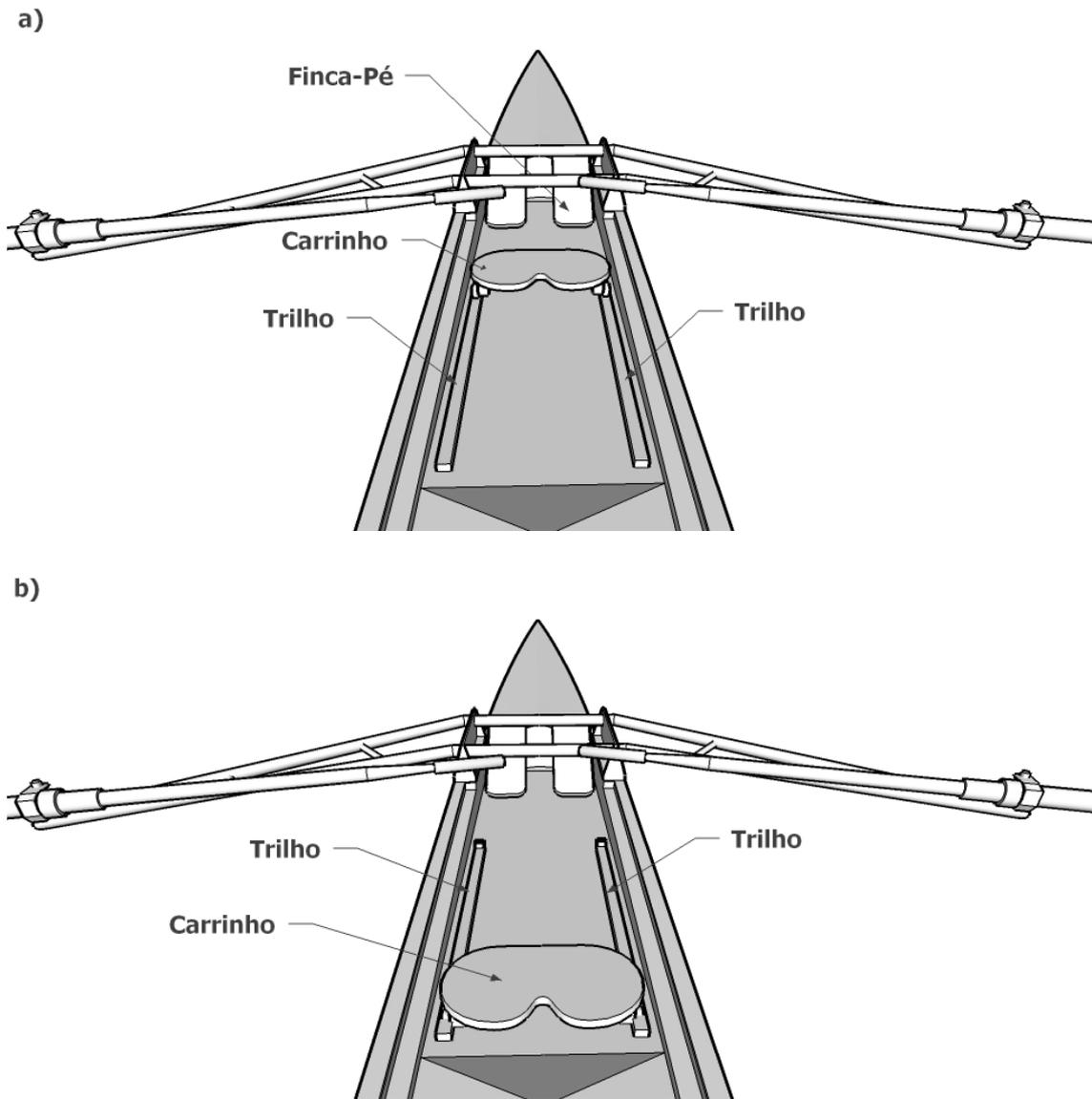


Figura 4 - a) Outros componentes do barco. b) Carrinho em diferente posição no trilho.

Durante o movimento realizado pelo remador, o remo movimenta-se tanto na direção horizontal, quanto na direção vertical. O deslocamento angular horizontal é evidenciado pelo giro da forqueta em torno do pino, sendo expressado por um ângulo horizontal (γ_H) positivo em relação ao eixo X –quando a pá do remo está próxima à proa– ou negativo –quando a pá está próxima à popa–, no plano XY (Figura 5). Já o deslocamento angular vertical é evidenciado pela retirada e colocação da pá do remo na água, expressado por um ângulo vertical (γ_V) positivo em relação ao eixo X –quando a pá do remo está longe da água– ou negativo –quando a pá está próxima à água–, no plano XZ (Figura 6).

Atento a esses deslocamentos, percebem-se as diferentes posições do remo durante a remada (Figura 7). A comparação da etapa 1 com a etapa 5 exemplifica o deslocamento horizontal, pois, na primeira, a pá do remo aponta para a proa e, na segunda, aponta para a popa do barco. O deslocamento vertical pode ser observado ao se comparar a etapa 3, quando a pá se encontra abaixo da linha da água, com a etapa 6, quando a pá está totalmente fora da água.

O atleta tem objetivos a cumprir em cada uma destas etapas, sendo sua técnica a forma que ele os cumpre. Logo, o entendimento desses objetivos ajuda na análise posterior dos dados. As etapas são (Figura 7):

- *Catch* (Ataque): etapa na qual as pernas estão totalmente dobradas, os braços completamente estendidos e o tronco maximamente inclinado para frente (etapa 1).
- *Drive* (Propulsão): momento que o remador utiliza a força dos braços e a força das pernas sobre o finca-pés para impulsionar o barco (etapas 2;3;4).
- *Finish* (Extração da Pá): quando o atleta retira as pás da água, preparando-se para a fase seguinte (etapa 5).
- *Recovery* (Recuperação): Fase na qual o remador se coloca pronto para um novo *catch* – flexionando os joelhos, estendendo os braços e inclinando o tronco para frente novamente (etapa 6).

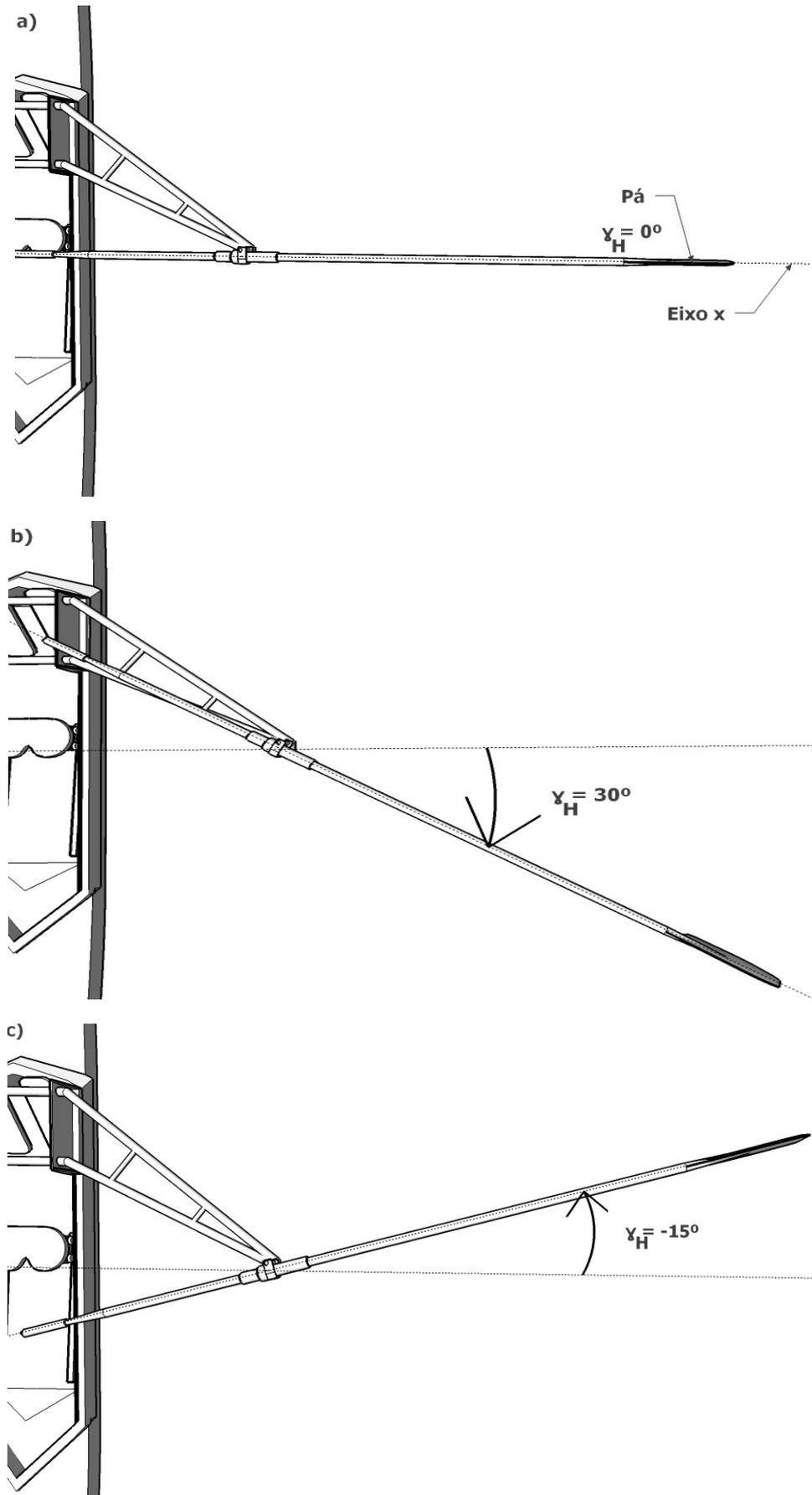
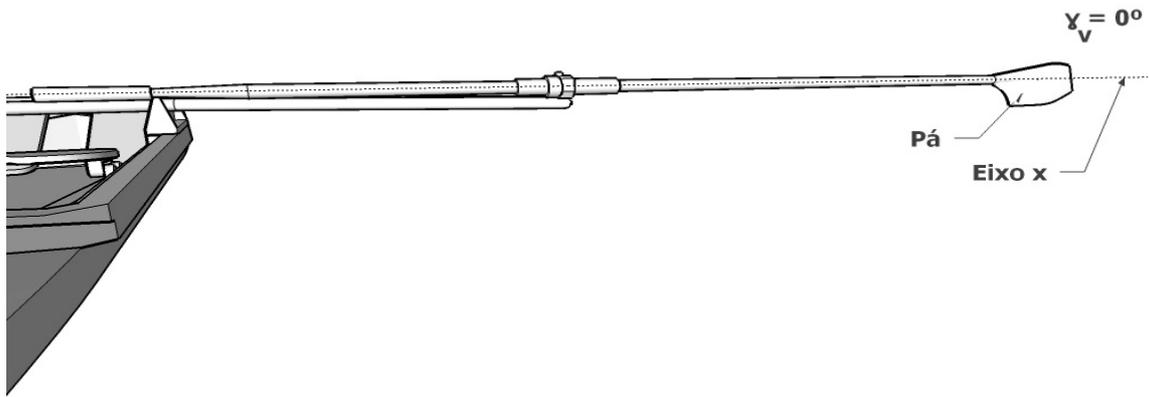
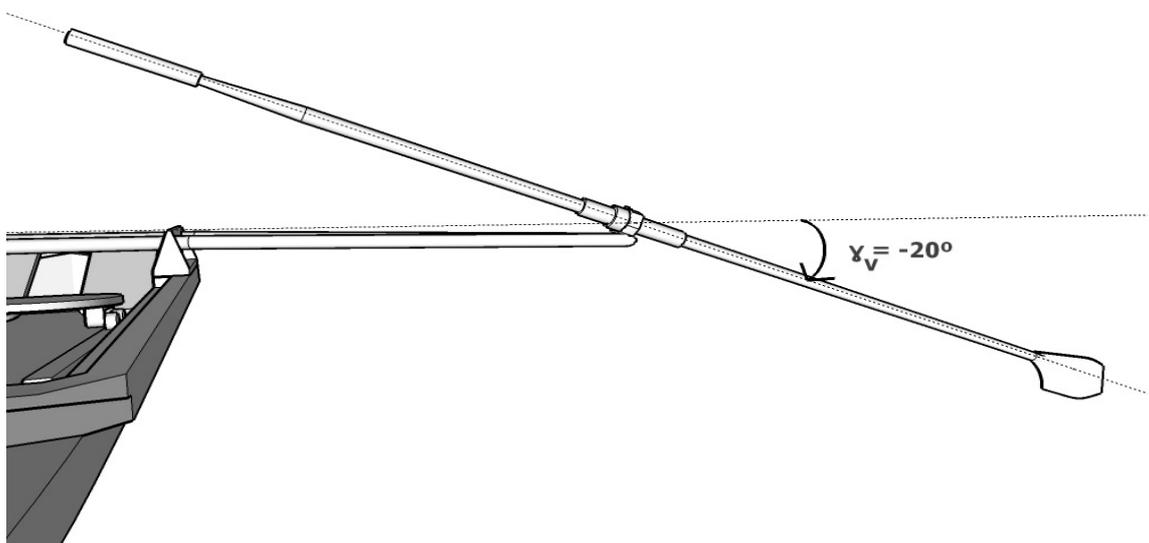


Figura 5 - Vistas superiores do barco. a) Posição horizontal de 0° . b) Exemplo de deslocamento angular horizontal positivo. c) Exemplo de deslocamento angular horizontal negativo.

a)



b)



c)

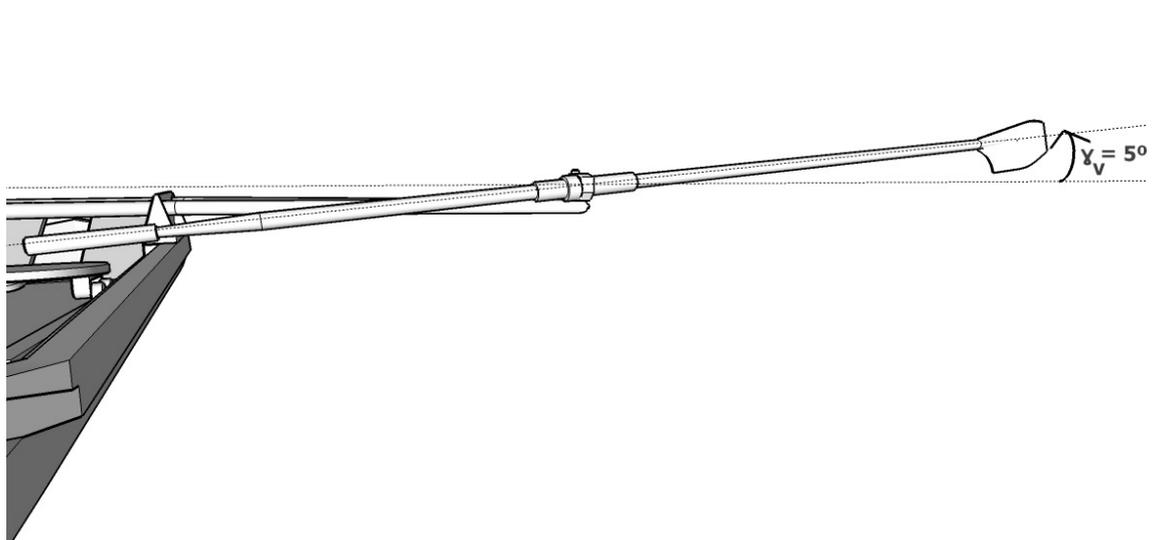


Figura 6 - Vista da proa do barco. a) Posição vertical de 0° . b) Deslocamento vertical negativo (início da remada). c) Deslocamento vertical positivo (fim da remada).

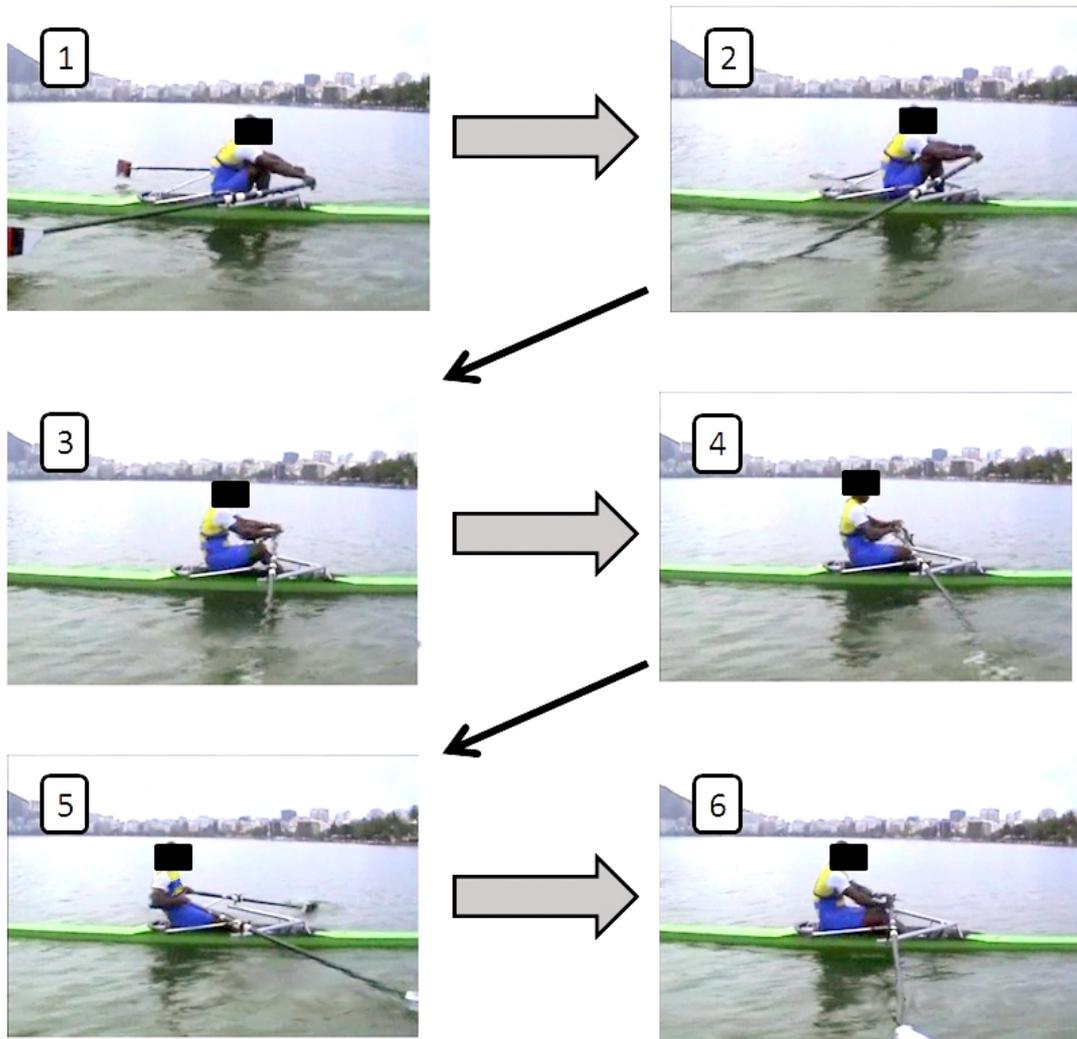


Figura 7 - Fases da remada: 1) Catch. 2) , 3) , 4) Drive. 5) Finish. 6) Recovery. Fonte: LIB/COPPE [12]

2.3 Sistemas Comerciais para Medida de Ângulo de Remada

Existem alternativas ao sistema deste trabalho, podem ser tanto o aperfeiçoamento do projeto, tratado no capítulo seguinte, quanto a sua total substituição, tratada nesta seção. Essa substituição se dá por sistemas comerciais já destinados à tarefa de medição dos ângulos de remada, que, embora sejam de qualidade profissional e bem acabados, apresentam limitações.

O *PowerLine Rowing Instrumentation* é um desses sistemas (Figura 8). Para a medição do ângulo, a forqueta do barco é substituída por uma forqueta com um sensor acoplado. A informação desse sensor é captada por um *logger*, equipamento que realiza a aquisição e guarda dos dados da remada. Após a aquisição, esses dados podem ser enviados ao computador através de uma porta USB, permitindo a visualização (usando um software disponibilizado por eles) de gráficos no tempo, além de uma sincronização

das informações com uma filmagem do treino, na qual é reproduzida a filmagem e o momento correspondente nos gráficos. O auxílio dos gráficos e da sincronização, junto com a baixa incerteza de $\pm 0.5^\circ$, pode acusar diferenças entre os atletas e entre o funcionamento dos braços direito e esquerdo de um deles. Utilizando um visor de interface no próprio *logger*, o usuário pode configurar diferentes maneiras de obter os dados, como sessões de treino divididas em intervalos de 10 minutos ou em intervalos de 250m.

Na forqueta modificada, também está incluído um sensor capaz de medir a força aplicada no pino pelo remo. Além disso, outro componente pode ser instalado no casco do barco a fim de obter a velocidade e aceleração alcançadas, embora aumente o preço do produto. Os dois incrementam o poder de análise da biomecânica.

O preço para somente um remo, incluindo todo o necessário para a medida e análise de ângulo e força, é de U\$3012. Adicionando-se U\$771 para o segundo remo, totalizando U\$3783, sem impostos e taxas de importação, para um single skiff (barco com um remador).

Entre as desvantagens desse sistema estão: a medição do ângulo horizontal apenas, ignorando a importante informação vertical que contribui para entender o desempenho; a inclinação fixa de 4° da forqueta em direção a popa, que pode não ser a configuração habitual do remador, acarretando uma remada diferente da realmente feita; e o alto custo.

Outro sistema é o *RowX Outdoor* (Figura 9). Uma maneira dele medir o ângulo horizontal e força é, parecida com o *PowerLine Rowing Instrumentation*, através da substituição da forqueta original do barco por uma modificada. Outras semelhanças são a possibilidade de medição da velocidade e da aceleração através da instalação de um componente no casco do barco e o envio dos dados para um computador, usando um cabo serial ligado ao display, para análise das informações em um software disponibilizado pelo fabricante.

A diferenciação do *RowX Outdoor* para o *PowerLine Rowing Instrumentation* vem da alternativa de ligação do sensor de força no próprio remo, medindo a dobra sofrida por ele, forma não disponível no anterior; de um display com capacidade de mostrar gráficos dos dados em tempo real, o que pode facilitar a leitura deles durante as remadas; da opção de medição da frequência cardíaca, conectando um fio entre o atleta e uma peça auxiliar; e da viabilidade de configurar a inclinação da forqueta na angulação preferida do atleta, gerando menos mudanças na remada.

Uma desvantagem, em especial, desse sistema é que ele não caberia nos modelos da Figura 3c, largamente empregados no esporte. Essa dificuldade de adaptação foi superada neste trabalho.

a)



b)



Figura 8 - a) Forqueta modificada do Power Line Instrumentation. b) Power Line Instrumentation instalado no barco. Fonte: Peach Innovations [9]

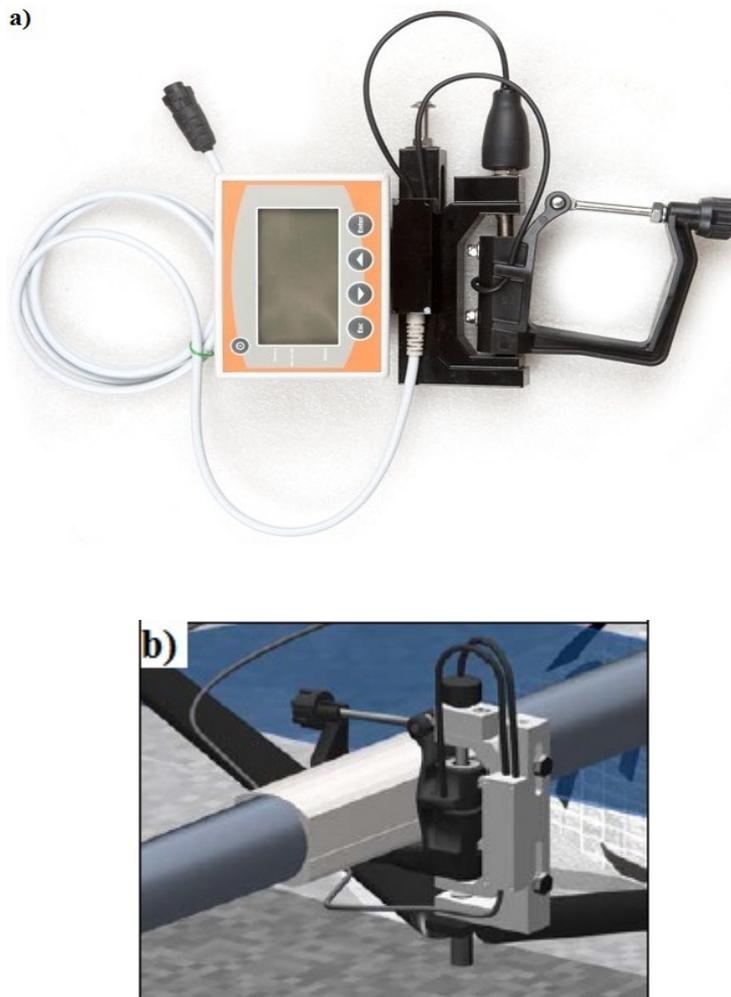


Figura 9 - a) RowX Outdoor. b) RowX Outdoor instalado no barco. Fonte: Weba Sport [8]

2.4 Instrumentação em outros trabalhos

A iniciativa de criar um sistema para a medição de ângulos de remada, sem a utilização de alternativas comerciais, não é exclusiva desse trabalho. Observando os erros, acertos e conclusões já chegadas por outros estudos, obtêm-se importantes informações para a especificação deste projeto.

Como mostrado na Figura 5 e Figura 7, existe um deslocamento angular horizontal do remo, evidenciado pelas diferentes posições da pá ao longo da remada. Esse deslocamento angular é expresso em um ângulo formado pelo remo e o eixo perpendicular ao barco. Segundo Llosa *et al.* [12], o remo deve chegar a 55° na posição ideal de *catch*, e -35° no *finish* ideal, totalizando 90° de amplitude máxima (Figura 10). Ambos podem ser lidos neste trabalho.

A medida desse ângulo horizontal já foi feita de maneira bem-sucedida empregando potenciômetros. Esses são os casos de Pilgeram e Delwiche [15] e Bettinelli *et al.* [14], que realizaram a fixação do eixo do potenciômetro ao pino do barco e a fixação do corpo dele à forqueta através um suporte metálico, idéia usada neste trabalho para esse ângulo (Figura 11).

Trabalhos como o de Kleshnev [13] e Smith e Loschner [16] foram mais além, alcançando êxito na medição do ângulo vertical com o uso, também, de potenciômetros. Neles, a medição horizontal foi feita como em Pilgeram e Delwiche [15] e Bettinelli *et al.* [14], já a vertical foi feita por meio de uma haste metálica presa ao eixo do potenciômetro vertical e ao remo, método no qual este trabalho se baseia.

Quanto à repetição, estima-se que o atleta realize 200 remadas por prova, o que significa que são 400 ciclos de ida e volta. Embora uma primeira versão desenvolvida pelo LIB/COPPE tenha chegado ao êxito na medição horizontal com estas condições, ela apresentou alto desgaste dos potenciômetros. Como se supôs que isso era devido ao estresse mecânico, provocado pelo visível desalinhamento dos eixos dos potenciômetros no local de fixação em razão do modelo do suporte, o modelo deste trabalho é feito com foco em diminuí-lo, propondo um suporte com melhor acomodação para eles. Um maior respeito às configurações de regulagem escolhidas pelo atleta e a mudança de transdutor relativo para absoluto também são implementados.

Outra característica do movimento realizado no esporte é a duração da remada. Usando imagens gravadas em um treino do Clube de Regatas do Flamengo, descobre-se que a remada completa de um bom atleta pode chegar a algo em torno de 1,5 s (0,67 Hz). Seguindo os estudos do LIB/COPPE, os sinais adquiridos aqui foram filtrados em 10 Hz após a aquisição para melhor análise das informações, excluindo assim componentes de maiores frequências do espectro. Já que o *datalogger* deste projeto faz a aquisição em 100 Hz, o critério de Nyquist (20 Hz) é plenamente satisfeito.

De posse dos deslocamentos angulares medidos, maneiras distintas de visualizá-los podem ser aplicadas. Gráficos no tempo são o modo adotado por Llosa *et al.* [12] e Kleshnev [13], sendo também o adotado aqui por permitir acompanhar as diferentes fases de remada e suas durações. No entanto, Bettinelli *et al.* [14] prefere traçar o gráfico do deslocamento do remo esquerdo versus deslocamento do remo direito, por permitir verificar a diferença de sincronia entre eles, maneira não utilizada aqui porque

apenas um remo é instrumentado. Gráficos que mostram o deslocamento angular versus força aplicada também são úteis, mas não cabem a esse trabalho porque a força não é uma grandeza medida aqui [15] (Figura 12).

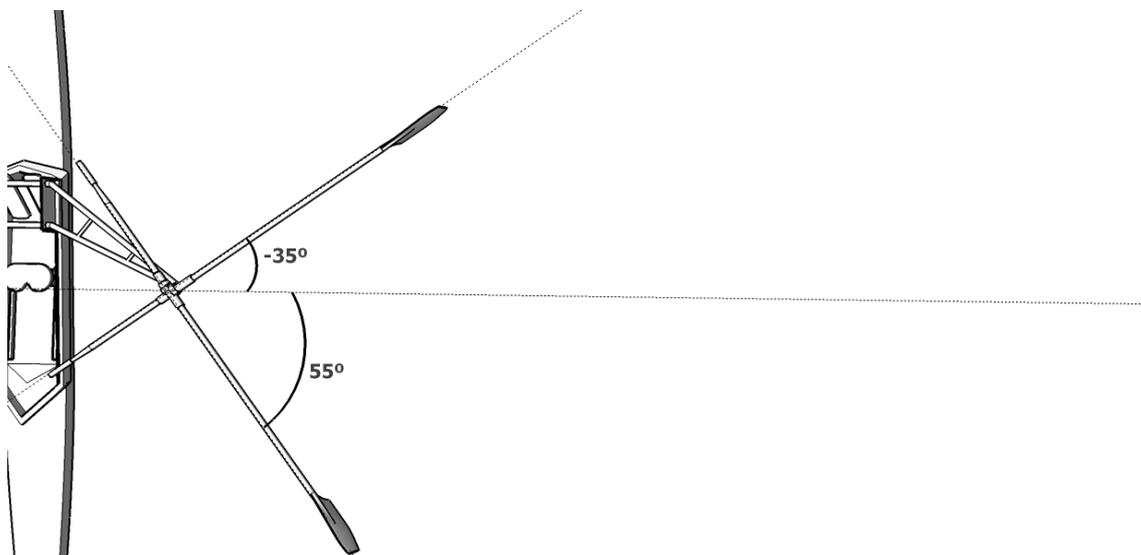


Figura 10 - Posição de *catch* ideal (55°) e de *finish* ideal (-35°).

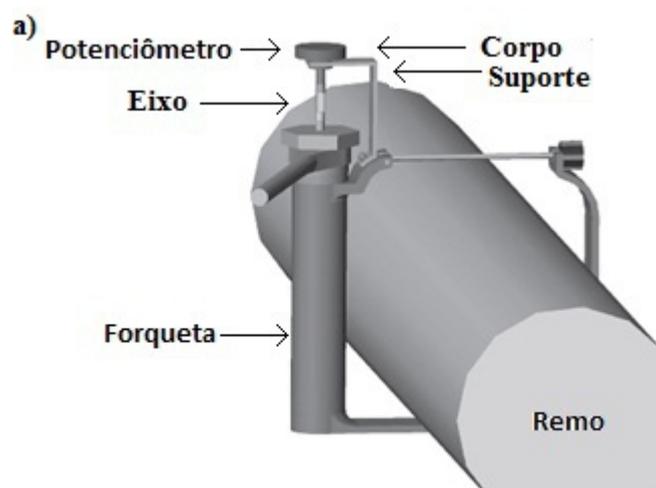


Figura 11 - a) Sistema de Pilgeram e Delwiche. b) Sistema de Bettinelli. Fonte: adaptado de Pilgeram e Delwiche [15] e Bettinelli [14].

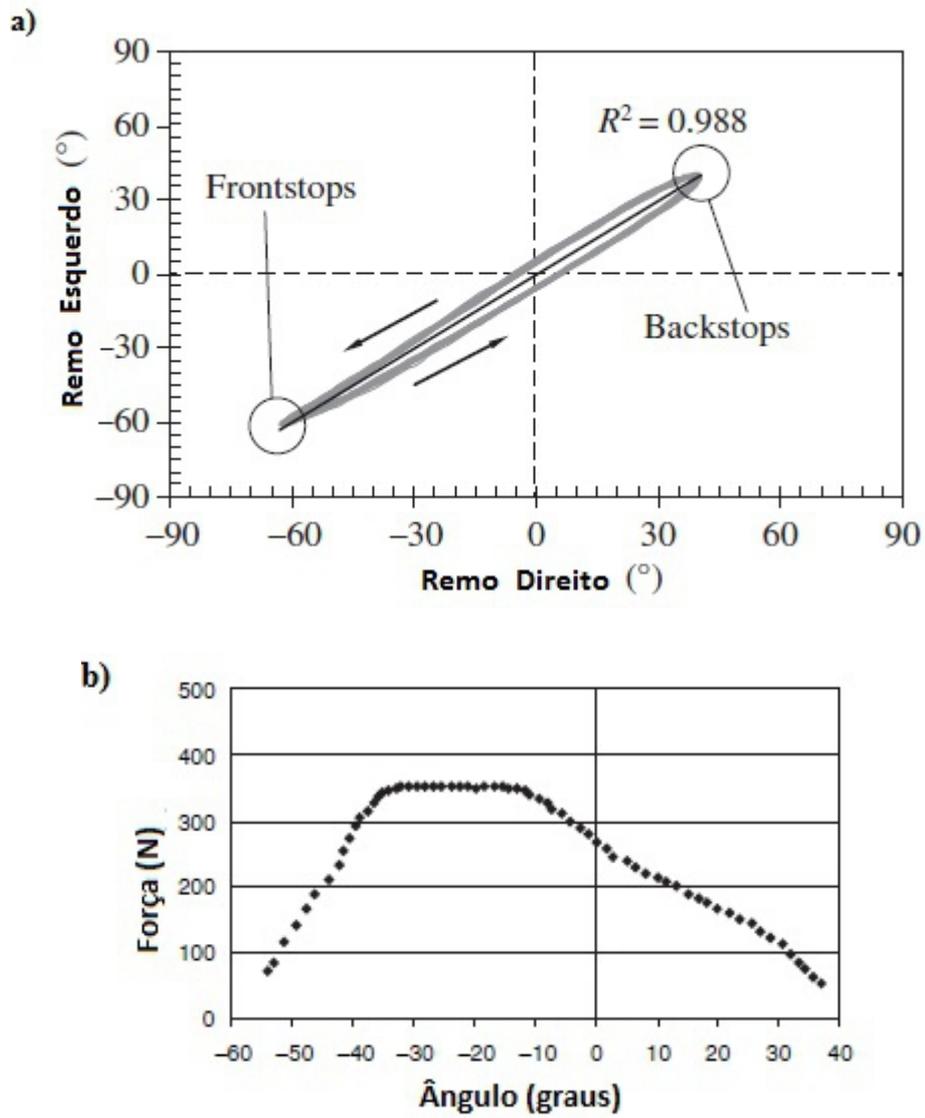


Figura 12 - a) Gráfico do deslocamento angular do remo direito versus deslocamento angular do remo esquerdo. b) Gráfico de força aplicada versus ângulo horizontal. Fonte: adaptado de Bettinelli [14] e Pilgeram e Delwiche [15].

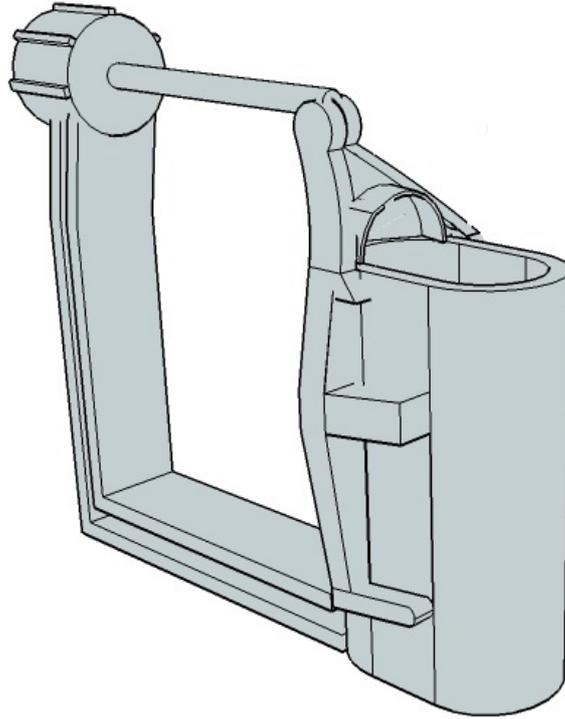
Capítulo 3

Materiais e métodos

3.1 O transdutor

Semelhante aos trabalhos de Bettinelli *et al.* [14], Pilgeram e Delwiche [15] e LIB/COPPE, o transdutor de ângulos desenvolvido neste trabalho é colocado sobre cada forqueta. O transdutor proposto, por outro lado, é capaz de medir tanto ângulos horizontais quanto ângulos verticais e não exige a troca da forqueta nem a remoção de qualquer outra peça existente no barco. Adicionalmente é possível instalar o transdutor em barcos que possuam ou não o quinto braço. Para que isto seja possível, o transdutor é previamente montado sobre um suporte que se encaixe sobre as forquetas, colocando os sensores nos locais apropriados. Existem diferentes modelos de forqueta, sendo o da Figura 13a o utilizado como referência para adaptar o transdutor. Este é o modelo mais utilizado no Brasil e no Clube de Regatas do Flamengo, onde este trabalho foi avaliado. Não há motivos que venham a gerar dificuldades para o uso em outros modelos, bastando adaptar o encaixe da base do transdutor ao formato da nova forqueta (Figura 13b).

a)



b)

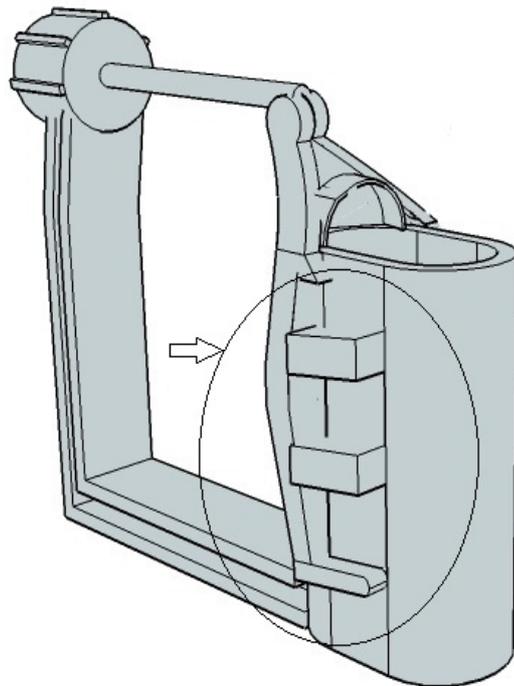


Figura 13 - a) Modelo da forqueta utilizada. b) Outro modelo de forqueta comumente encontrado. No detalhe, a diferença para a forqueta da Figura 13a.

O transdutor é composto por uma haste, um suporte vertical (Figura 14a) e por um suporte horizontal (Figura 14b), todos feitos em alumínio. Em cada um dos suportes está preso um potenciômetro, elemento responsável por responder aos estímulos do movimento angular vertical e horizontal. A haste é quem transmite a movimentação do remo para o potenciômetro vertical (Figura 15), enquanto que o giro feito pela forqueta é que mudará o valor do potenciômetro horizontal. Os parafusos do suporte horizontal prendem um suporte ao outro e também prendem todo o transdutor à forqueta. Por fim, uma junção metálica fixa o pino do potenciômetro vertical ao pino do barco.

Como o transdutor deste trabalho é uma versão aprimorada do já existente no LIB/COPPE, busca-se sanar os problemas daquela versão. Um deles, já citado no capítulo 2, é a visível falta de alinhamento entre o potenciômetro horizontal e o pino do barco. Esse desalinhamento provoca torção no pino do eixo do potenciômetro, consequentemente, uma folga no eixo que causava variação no valor da resistência; possibilidade de quebra do eixo; e possíveis desgastes excessivos, que diminuem a vida útil do componente. Então, aqui é pensada uma certa liberdade para a acomodação dos sensores. Ela consiste na instalação do suporte horizontal primeiramente, no posterior aperto dos parafusos do suporte horizontal até prender o suporte vertical à forqueta e, por fim, no aperto das porcas e borboletas dos parafusos do suporte horizontal, respeitando a não-torção do eixo (Figura 16).

Outro problema é que a versão anterior não permite a regulação da altura da forqueta, pois o potenciômetro horizontal, após a fixação no pino, tem uma posição fixa em relação à forqueta, o que não ocorre neste projeto, já que ao permitir a acomodação mencionada, respeita a configuração preferida do atleta através do vão do suporte horizontal (Figura 17).

Diferente do primeiro modelo do LIB/COPPE, na qual o transdutor é do tipo relativo (os coeficientes que descrevem seu funcionamento mudam em cada instalação), o modelo deste projeto é absoluto, ou seja, conhece-se previamente todos os coeficientes de sua curva, facilitando seu uso, entre eles o coeficiente independente (*offset*). Para esse *offset* vertical (b_V) e horizontal (b_H) fixos, um método de instalação é estabelecido. Primeiro, ambos os potenciômetros são colocados em 0Ω , a junção é instalada, e o restante do transdutor é colocado sem realizar nenhum tipo de aperto. Depois, o barco é colocado em paralelo com a terra utilizando o auxílio de dois níveis de bolha (BAMBU, Brasil) (Figura 18a e 18b), procedimento comum no Remo, no qual, para alcançar a inclinação desejada, cada suporte colocado sob barco pode o

subir ou o descer (Figura 18c). Após, as forquetas são ligadas uma a outra, colocando-as na direção do eixo X do barco, com $\gamma_H = -90^\circ$, esticando uma linha de nylon presa a duas abraçadeiras tal que cada uma está envolvida em uma das forquetas, quando então há o aperto do potenciômetro horizontal na junção (Figura 19). Por fim, a haste é encaixada no potenciômetro vertical de maneira livre, coincidindo com a direção do eixo Z do barco, com $\gamma_V = -90^\circ$ (Figura 20), para então ser presa nele. Dessa maneira, a leitura do ângulo de -90° no dois eixos se refere à tensão de 0 V.

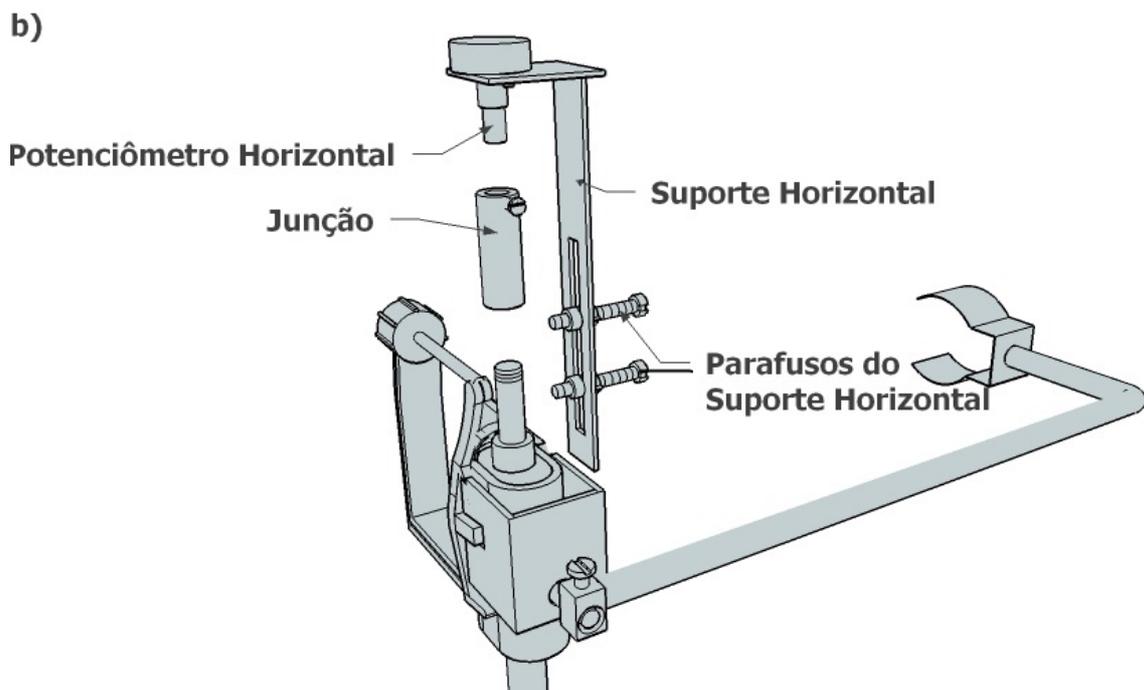
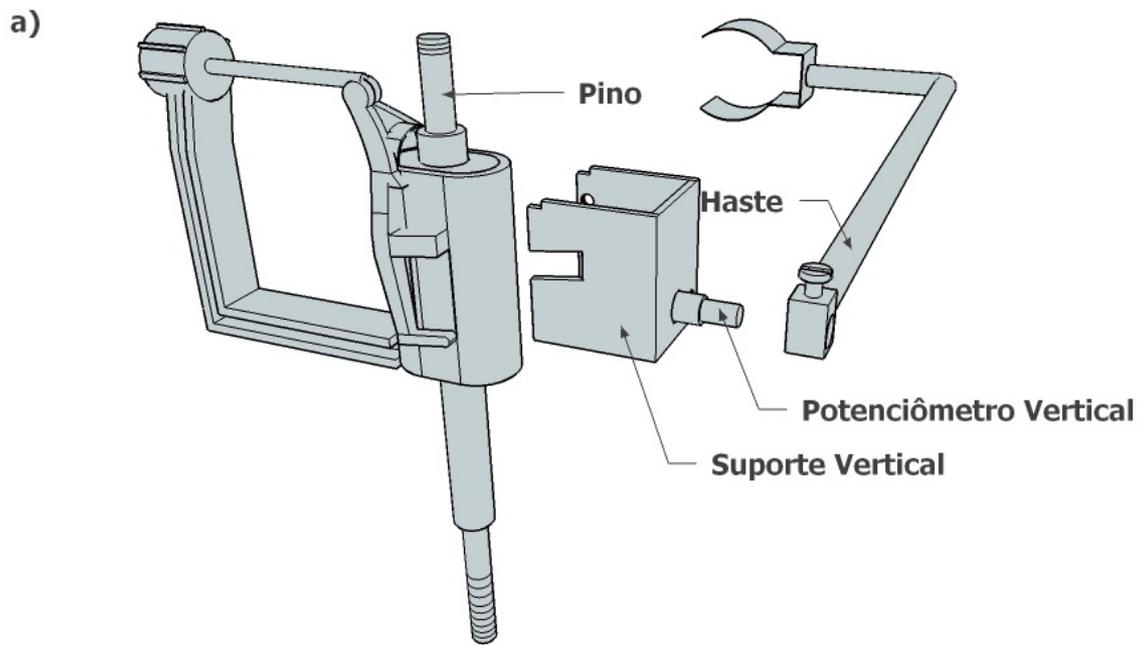


Figura 14 - Peças do transdutor. a) Vista explodida do conjunto vertical. b) Vista explodida do conjunto horizontal.

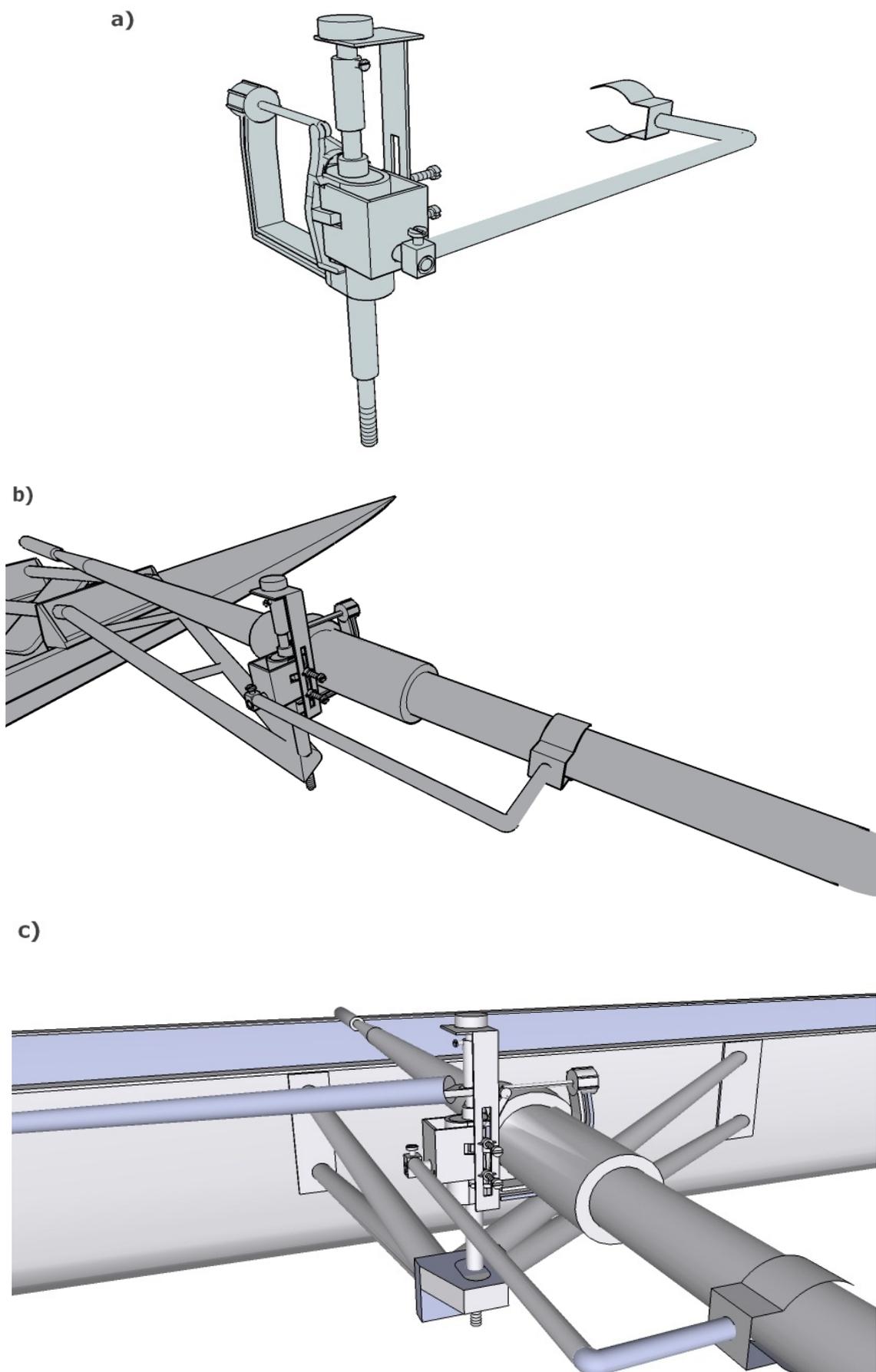


Figura 15 - a) Sensor totalmente montado na forqueta. b) Sensor instalado em um barco sem quinto braço. c) Sensor instalado em um barco com quinto braço.

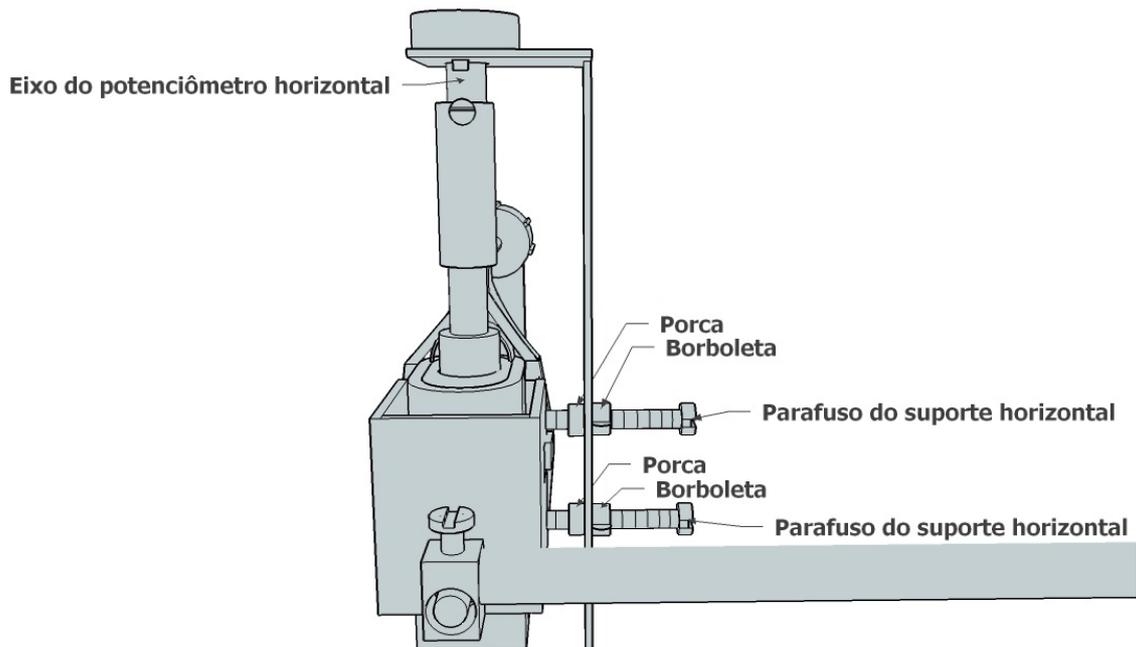


Figura 16 - Acomodação do potenciômetro horizontal.

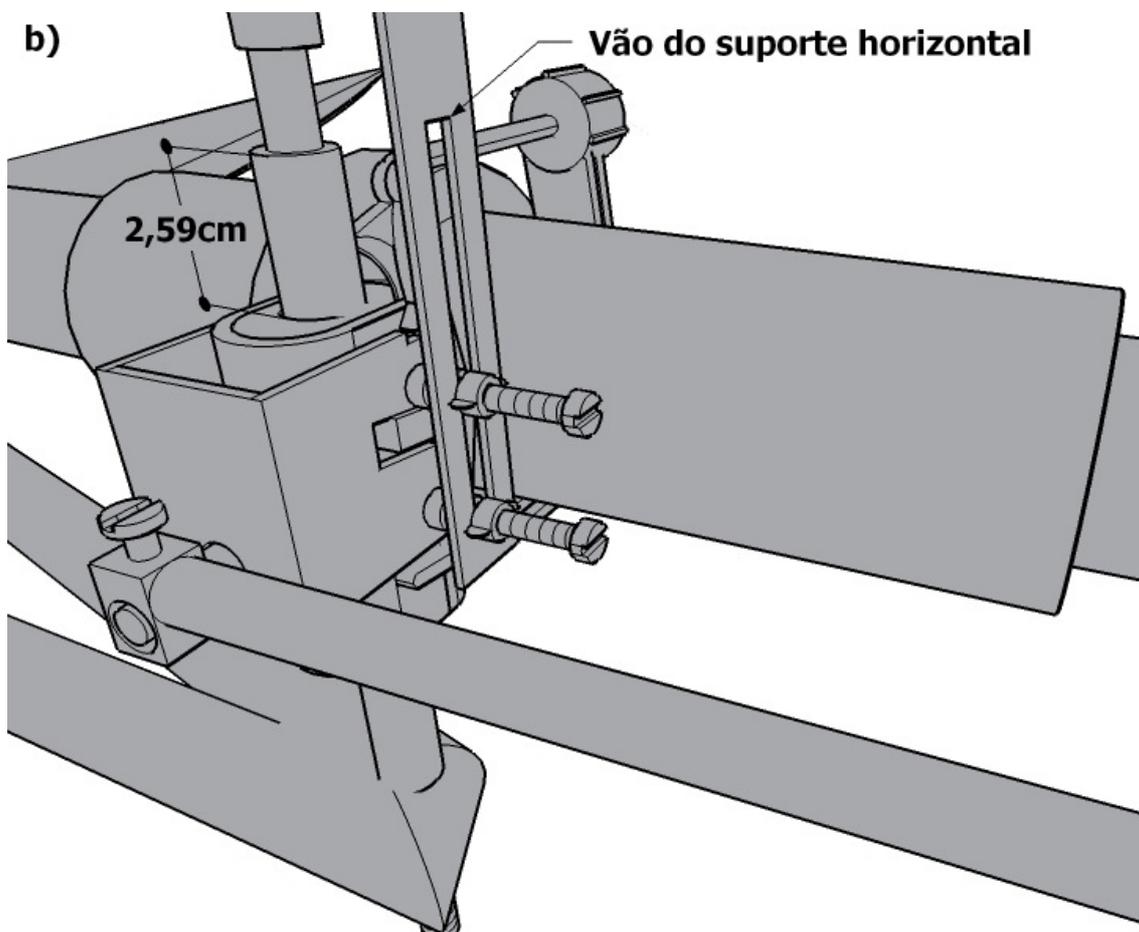
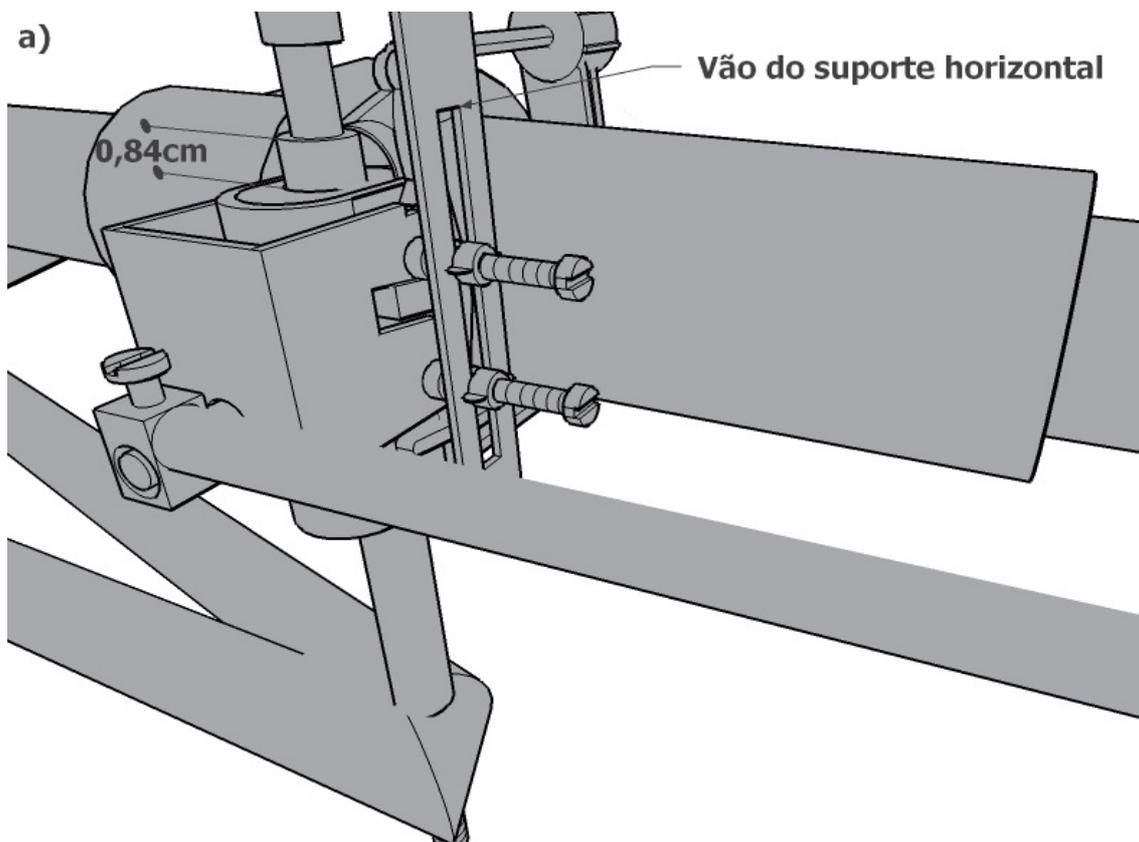


Figura 17 - Transdutor permitindo diferentes configurações de altura da forqueta.

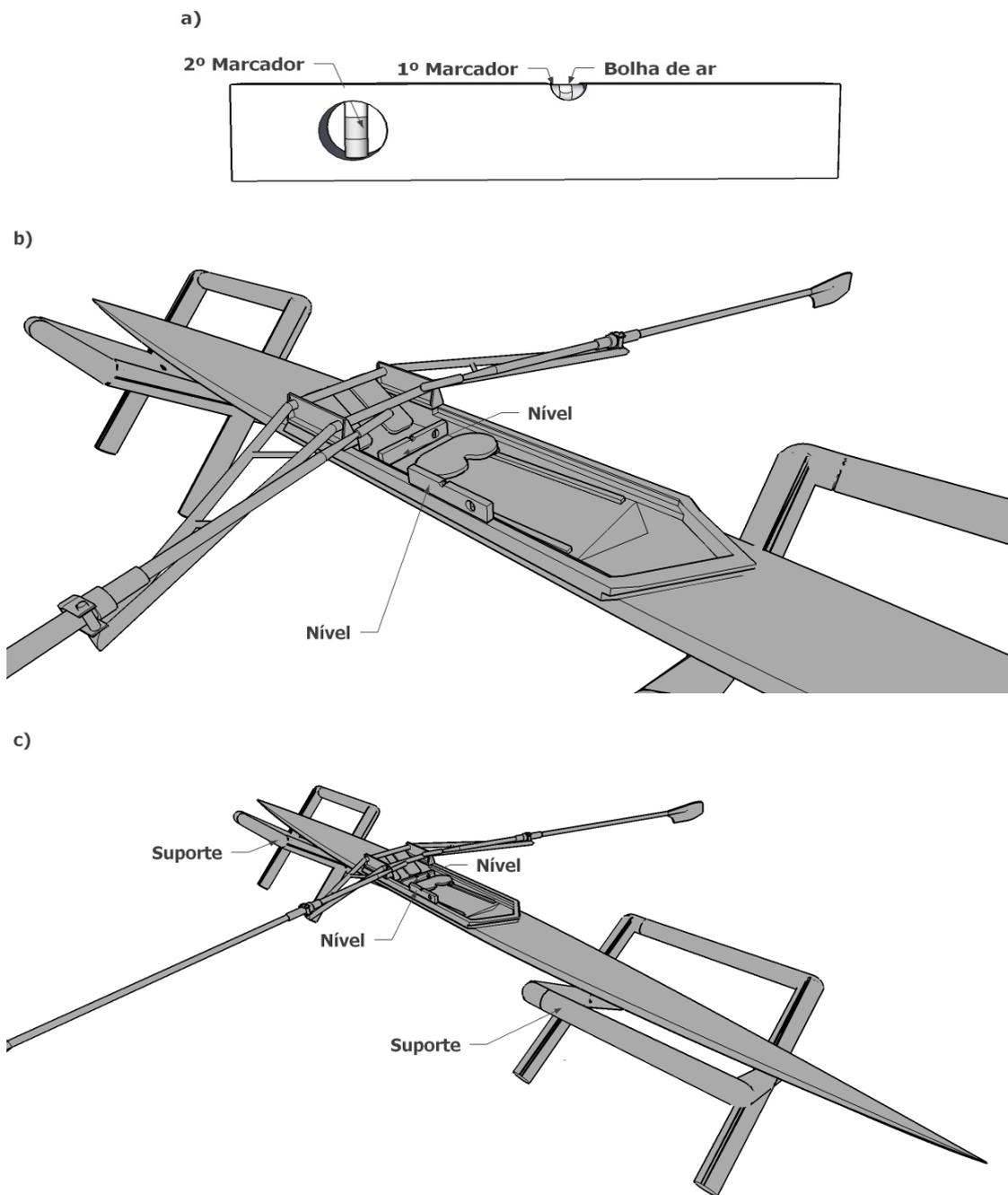


Figura 18 - a) Nível de bolha. b) Barco nivelado com o auxílio do nível de bolha. c) O barco e os suportes colocados sob ele.

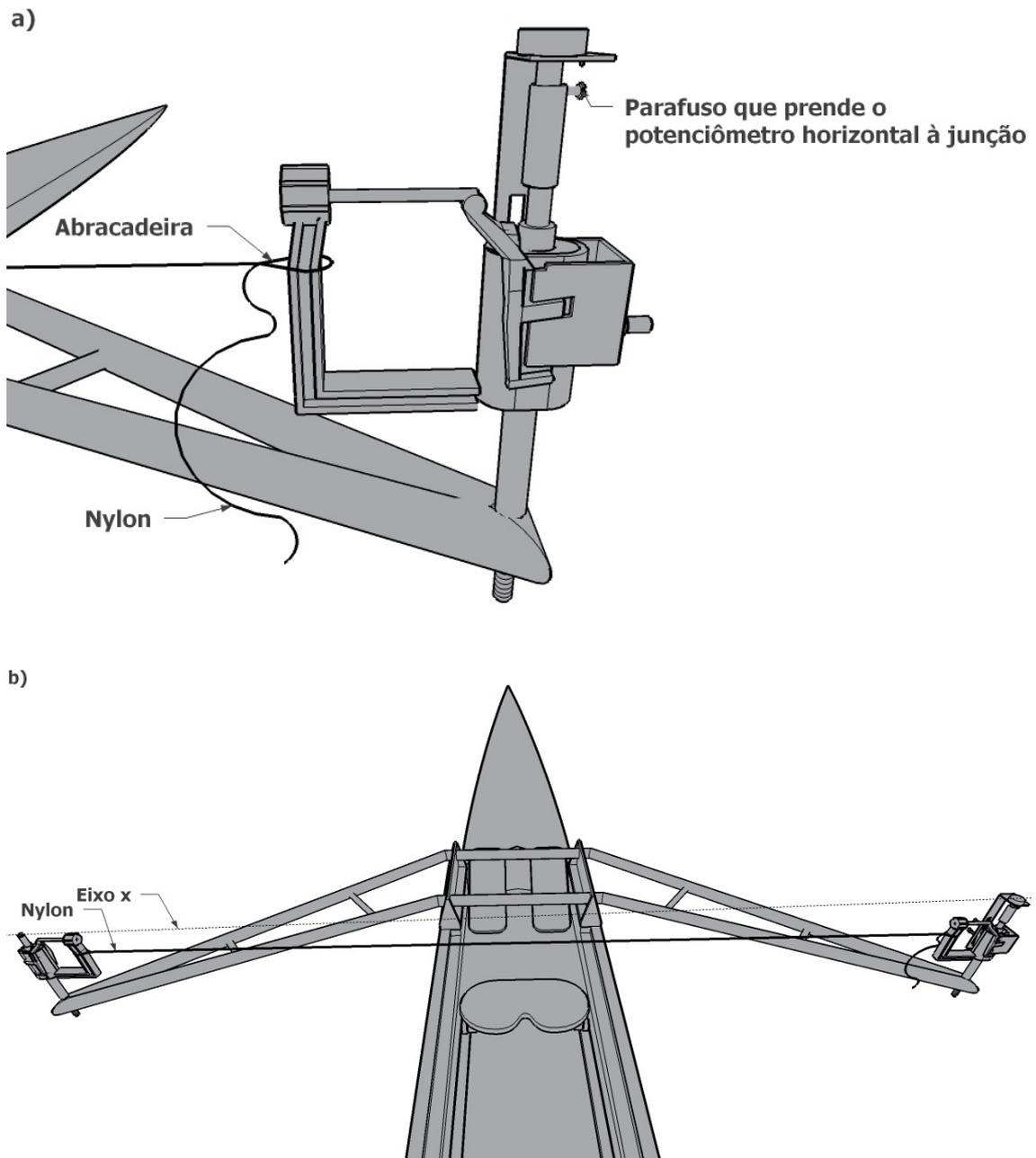


Figura 19 - a) Método da instalação horizontal. b) Forquetas ligadas uma a outra durante a instalação horizontal.

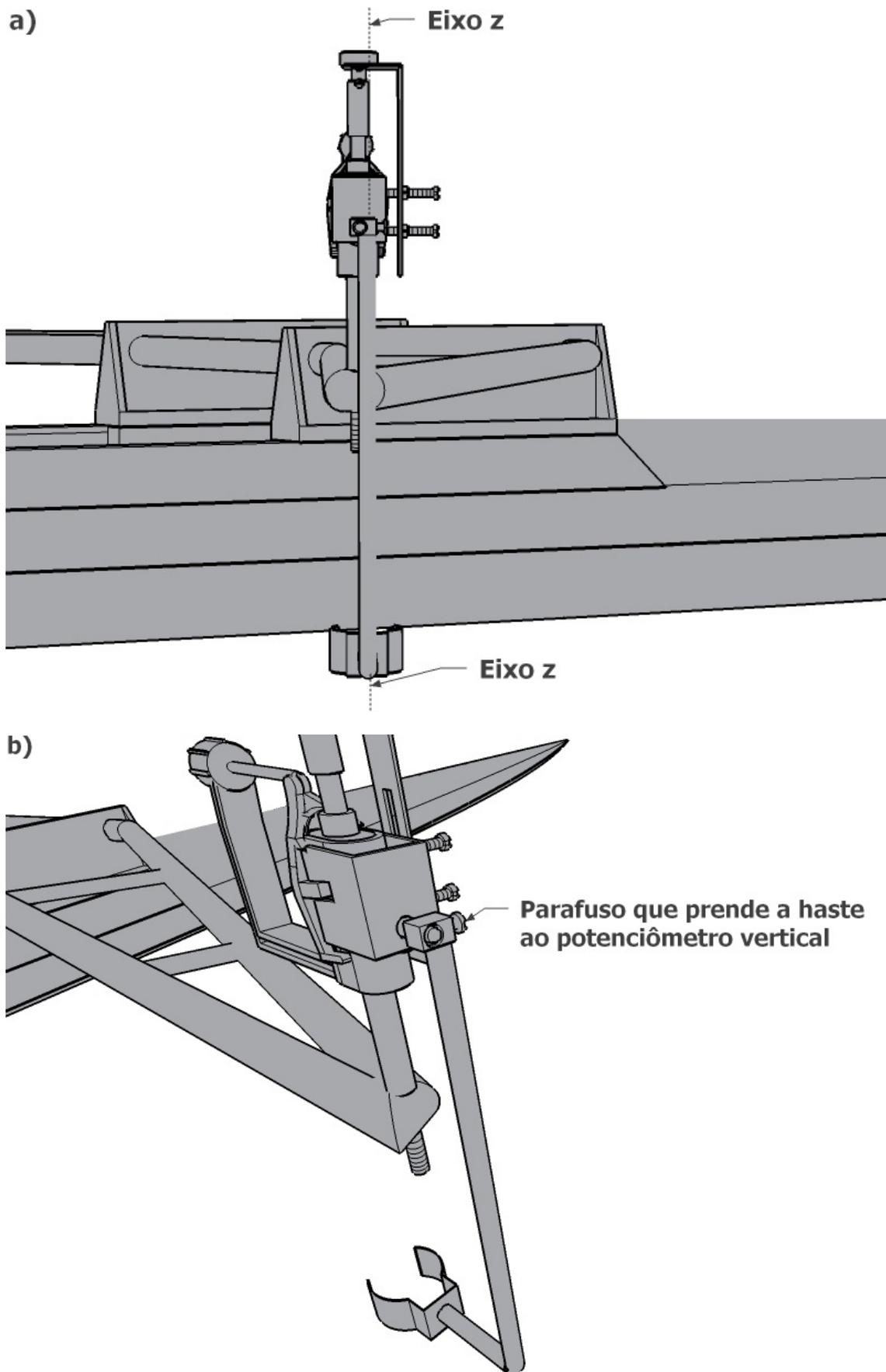


Figura 20 - a) Haste livre na direção do eixo Z durante a instalação vertical (Vista lateral do barco).
b) Parafuso que prende a haste ao potenciômetro vertical.

3.2 O circuito do medidor de ângulos

O circuito do medidor de ângulos é formado pelo *datalogger* Sparkfun Logomatic v2 Serial SD (Sparkfun, EUA), pelos potenciômetros (sensores) e por uma bateria de 3,7 V.

O *datalogger* (Figura 21) é o circuito responsável por fazer a aquisição dos sinais, durante a remada no barco, para posterior análise, exercendo, basicamente, a função de digitalizá-los e salvá-los em um cartão de memória. Já vem sendo usado para medidas de aceleração do barco pelo LIB/COPPE, e está, juntamente com a bateria, hermeticamente acondicionado em uma caixa a prova de água. Ele é capaz de fornecer tensão de 3,3 V destinada à alimentação de periféricos, os quais, somados, podem consumir até 80 mA. Para proteção contra curto-circuito, conectou-se um resistor de 1 k Ω a um desses pinos de alimentação; após, são conectados em paralelo os dois potenciômetros (Figura 22). Outro dado importante é a resistência máxima permitida para a fonte de sinal no conversor A/D (R_{vsi}) que é de 40 k Ω [17]. A bateria de 3,7 V que o alimenta respeita o intervalo de 3,3 V a 8,9 V imposto pelo fabricante.

O dimensionamento dos potenciômetros é definido por dois fatores de compromisso, um é garantir uma corrente que não consumisse toda a bateria durante 2h de funcionamento (normalmente o tempo de um treino), o outro é não apresentar alta impedância para o conversor A/D do *datalogger*.

Uma corrente total de 40 mA, fornecida pela bateria de 2000 mAh, proporcionaria uma duração de 5,4h; tempo maior que o estipulado. Como se estima, já que a informação não é disponibilizada no seu *datasheet*, que o *datalogger* precisaria de uma corrente de 10 mA, sobriariam os outros 30 mA para os potenciômetros, valor mais baixo que os 80 mA de limite para os periféricos. Mas, para ajudar na análise de dados, um acelerômetro de três eixos, tal que o eixo Z não foi utilizado nesse trabalho, modelo A7260 (Freescale Semiconductor, EUA) [19] e um GPS modelo Venus 634FLPx (Sparkfun, EUA) também são conectados, assim, descontando suas correntes de 500 μ A e 28 mA, os potenciômetros em paralelo poderiam ter uma corrente de até 0,75 mA, imaginando que dois transdutores, um para cada remo, precisariam do dobro. No pino usado como alimentação, temos:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_{cc}}{R_{C-C} + R_{Pot}} = \frac{3.3 V}{1 k\Omega + R_{Pot//}} < 0,75 mA$$
$$R_{Pot//} > 3,4 k\Omega$$

Mas pela condição imposta pelo *datalogger*:

$$(R_{vsi})_{max} = \left(\frac{R_{Pot}}{2}\right) // \left(\frac{R_{Pot}}{2}\right) < 40 k\Omega$$

Como os potenciômetros de 10 k Ω em paralelo equivalem a um de 5 k Ω , e a $(R_{vsi})_{max}$ vale 2,5 k Ω com eles, o valor de 10 k Ω cumpre com os dois compromissos.

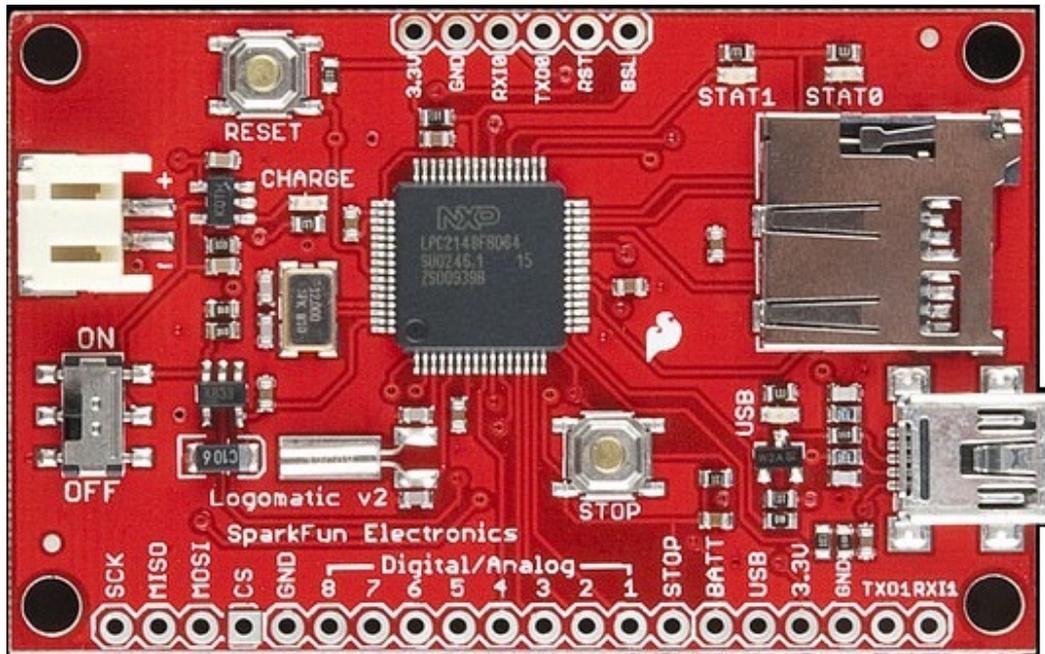


Figura 21 - Sparkfun Logomatic v2 Serial SD Datalogger. Fonte: Sparfun Eletronics [18]

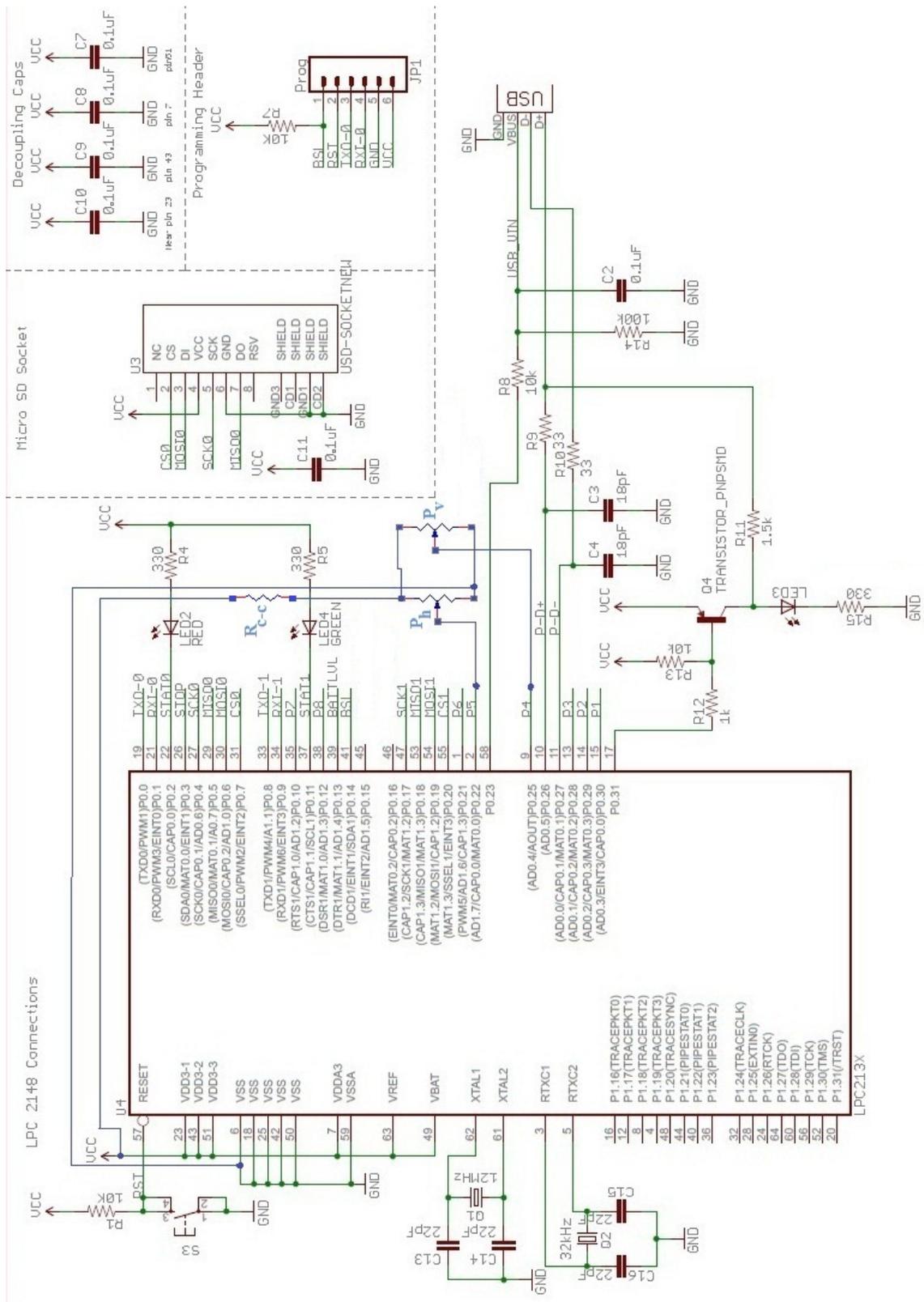


Figura 22 - Esquema de parte do *datalogger* mostrando a ligação dos potenciômetros e do resistor contra curto-circuito.

Por estarem presos à forqueta do barco os potenciômetros utilizados precisam ser protegidos da água. Existe um padrão industrial que indica o grau de proteção do invólucro de componentes, ele se chama Código de Proteção IP (Tabela 1), um número

formado por dois dígitos, no qual o primeiro se refere à proteção contra partículas sólidas, não nos interessando neste trabalho, e o segundo contra contatos com a água [5].

Tabela 1 - Tabela com o significado dos dígitos do Código de Proteção IP.

Fonte: NBR IEC 60529 [5]

Primeiro dígito do código IP	Descrição do grau de proteção	Segundo dígito do código IP	Descrição do grau de proteção
0	Não protegido	0	Não protegido
1	Protegido contra objetos sólidos de Ø 50 mm e maior	1	Protegido contra gotas d'água caindo verticalmente
2	Protegido contra objetos sólidos de Ø 12 mm e maior	2	Protegido contra gotas d'água caindo verticalmente com invólucro inclinado até 15°
3	Protegido contra objetos sólidos de Ø 2,5 mm e maior	3	Protegido contra aspersão d'água
4	Protegido contra objetos sólidos de Ø 1,0 mm e maior	4	Protegido contra projeção d'água
5	Protegido contra poeira	5	Protegido contra jatos d'água
6	Totalmente protegido contra poeira	6	Protegido contra jatos potentes d'água
		7	Protegido contra efeitos de imersão temporária em água
		8	Protegido contra efeitos de imersão contínua em água

Ø representa o diâmetro dos objetos

O potenciômetro modelo 284TBCF103A26A1 (CTS, EUA) [6] possui proteção à água (IP67) e, segundo o fabricante, 2 milhões de ciclos de vida, significando que não seria necessário o repor por 13 anos caso um atleta percorresse um trecho de 200 remadas todos os dias, tornando-o uma boa escolha como sensor (Figura 23a). Aliado a essas qualidades, também possui um preço convidativo, em torno de US\$11.00.

Com o projeto mecânico apresentado também é possível trocar os potenciômetros por encoders, reduzindo atrito e riscos de curto-circuito. Uma possibilidade é o 505Q-0256-S010 (Electroswitch, EUA) [7], um encoder magnético com durabilidade de 10 milhões de ciclos e com proteção à imersão em água – IP57 – (Figura 23b). Esse encoder reúne todas as especificações necessárias para um ótimo sistema, a ressalva é a sua resolução¹ de 1.4°, valor quase 3 vezes maior que a acurácia dos sistemas comerciais (+- 0.5°). Um modelo com maior resolução poderia ser escolhido para sanar esse problema mas dificilmente apresenta outras necessidades do projeto, como, acabamento *round* ou *flatted* (parecendo-se com o formato de um potenciômetro), pelo menos código IPx7 e alimentação de 3.3 V. Uma das alternativas mais viáveis encontrada seria o encoder magnético modelo EMS22D51-B28-LS5 (BOURNS, EUA) [20] (Figura 23c) cuja resolução é de 0.7° e a durabilidade é de 100 milhões de ciclos, porém uma alimentação de 5 V e maior reforço na sua proteção IP65 precisariam ser providenciados. O preço do modelo da Electroswitch é de U\$42.50, enquanto o da Bourns é de U\$37.81.

¹ Menor variação da **grandeza** medida que causa uma variação perceptível na **indicação** correspondente [21].



Figura 23 - a) Potenciômetro 284TBCF103A26A1 [6], sugerido para este projeto. b) Encoder magnético 505Q-0256-S010 [7], uma alternativa ao potenciômetro. c) EMS22D51-B28-LS5 [20], outra alternativa ao potenciômetro.

3.2.1 Implementação

Apesar da especificação dos potenciômetros incluírem uma proteção IP e um número de ciclos mínimo, a disponibilidade de componentes determinou o modelo utilizado para testes. São utilizados neste projeto potenciômetros de uso geral, costumeiramente encontrados no mercado, conhecidos como Constanta [4], devido ao nome da empresa que o fabrica. O valor nominal foi mantido em 10 k Ω . Como os potenciômetros utilizados possuem aberturas por onde a água poderia entrar quando instalados no barco, ajudando a danificá-lo, eles são vedados com fita isolante e posteriormente com cola quente. Esse método garante proteção contra imersão total por 1 minuto (tempos maiores não foram testados). Para permitir o uso do potenciômetro Constanta com o projeto mecânico anterior, o seu eixo é serrado e os seus terminais dobrados. Na forma final, o projeto apresenta as dimensões necessárias para uso com o potenciômetro 284TBCF103A26A1 ou o encoder magnético 505Q-0256-S010 ou o encoder magnético EMS22D51-B28-LS5.

3.3 Correção²

O ângulo horizontal é aquele formado entre o remo e o eixo X no plano XY, enquanto o ângulo vertical, também formado entre o remo e o eixo X, situa-se no plano XZ, conforme mostrado no capítulo 2. Para facilitar a medição, são adotadas montagens nas quais ângulos diretamente relacionados ao γ_V e γ_H são facilmente obtidos. Assim, na seção seguinte, os ângulos θ medidos nos experimentos para levantamento das curvas dos sensores obedecem às seguintes relações:

$$\gamma_V = \theta_V - 90^\circ \quad (1)$$

$$\gamma_H = \theta_H - 90^\circ \quad (2)$$

3.4 Métodos de medição³

Antes de se levantar as curvas de calibração⁴, que possuem a relação tensão-ângulo de cada um dos sensores, o barco é nivelado (Seção 3.1), coincidindo seu eixo Z com a vertical à terra. Para obter os pontos dessas curvas, são feitos dois experimentos com cada eixo, o Experimento 1 e o Experimento 2.

² Compensação de um efeito sistemático estimado [21].

³ Descrição genérica de uma organização lógica de operações utilizadas na realização de uma medição [21].

⁴ Expressão da relação entre uma indicação e o valor medido correspondente [21].

O experimento 1 mede as tensões referentes a cada ângulo, incrementalmente do ângulo inicial até o final, depois no sentido inverso (do fim ao começo do intervalo angular). São realizados três ciclos, com ida e volta. Ele proporciona as curvas usadas como representativas do transdutor, aqui chamadas de curvas de calibração típicas, as quais possuem os coeficientes angulares utilizados em cada eixo e são formadas por todos os pontos (ida e volta), além da possibilidade de evidenciar comportamentos de histerese, caso existissem.

O experimento 2 mede a tensão de cada ângulo retornando ao ângulo inicial antes de cada nova medida. Este procedimento é repetido 3 vezes para cada sensor. Ele serve para ajudar a avaliar outras possíveis não-linearidades do sensor, como múltiplos caminhos.

Nos dois experimentos, o espaçamento dos ângulos é de 5° para o eixo vertical e de 10° para o eixo horizontal, adquirindo-se a tensão através de um multímetro ET - 1100 (Minipa, Brasil), após a aplicação de 5 volts em cada potenciômetro por uma fonte regulada. Mais tarde, na obtenção das curvas, um fator de $2,74/5$ é multiplicado no eixo da tensão para adequá-la aos 2,74 V que efetivamente estão sobre cada potenciômetro, devido à divisão de tensão, que ocorre no pino de alimentação do *datalogger*, entre o resistor de curto circuito e os potenciômetros em paralelo.

Após esses experimentos, como a curva escolhida para tratar o transdutor é uma reta, em virtude da pressuposta resposta linear dos sensores, o procedimento da regressão linear é utilizado nos dados do experimento 1 para extrair o coeficiente angular vertical (a_V) e o coeficiente angular horizontal (a_H) da curva de calibração típica, por meio da função “regress” do MATLAB 7.1 (MathWorks, EUA). O coeficiente linear já é conhecido previamente, pois os potenciômetros são instalados sempre da mesma maneira (Seção 3.1).

Para avaliar a semelhança entre as curvas do experimento 1 na ida e na volta, a qual pode caracterizar ou não uma histerese, são feitos gráficos das diferenças entre as médias dos pontos obtidos nesses dois sentidos. Com o propósito de avaliar outros efeitos não-lineares, um gráfico das diferenças entre as médias de todos os pontos obtidos no experimento 1 e os pontos do experimento 2 também é traçado.

3.4.1 Levantamento do eixo vertical

No levantamento do eixo vertical, é utilizado um instrumento chamado goniômetro (Figura 24). Ele é composto por duas barras que podem ser abertas em diferentes posições. O ângulo entre elas é mostrado por um transferidor.

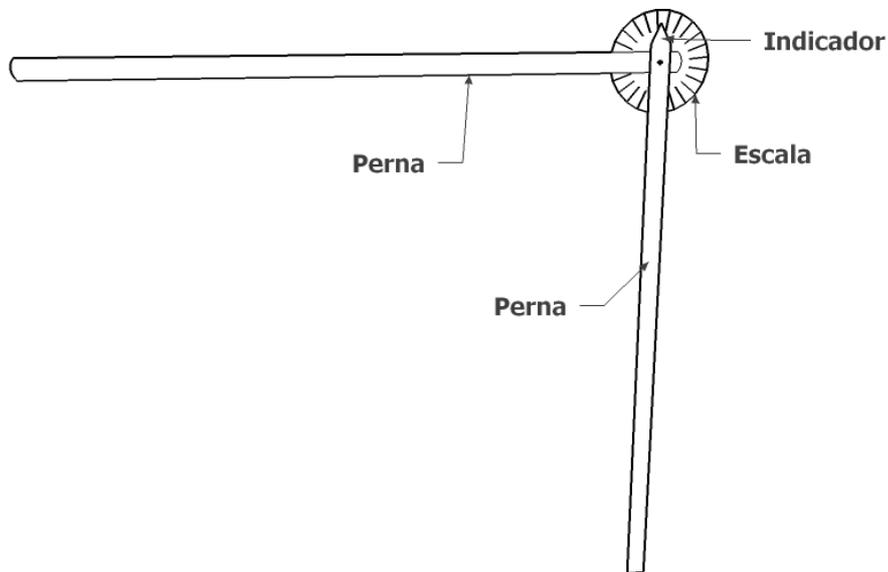


Figura 24 - Goniômetro.

Para realizar o levantamento, uma das barras do goniômetro é presa por fita ao nível, e a outra presa ao remo (Figura 25). A cada medida, a barra presa ao nível é ajustada até que o nível acuse (pelo 2º marcador) que ela está perpendicular à terra, portanto perpendicular ao barco, mostrando, assim, o (γ_V) (Equação 1). Para mudar o ângulo, basta subir ou descer o remo.

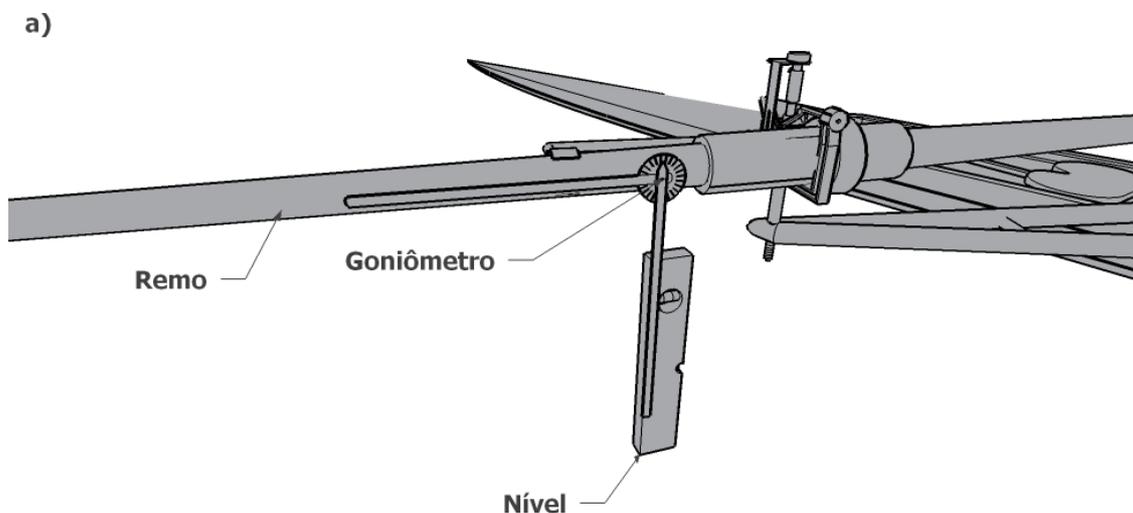


Figura 25 - Montagem para o levantamento do eixo vertical.

3.4.2 Levantamento do eixo horizontal

Para realizar o levantamento do eixo horizontal, um transferidor com uma curvatura para encaixe no pino é colocado logo abaixo da forqueta (Figura 26) e alinhado pela linha de guia (Figura 27a). A linha de simetria da forqueta é usada para determinar o (γ_H) (Equação 2) (Figura 27b).

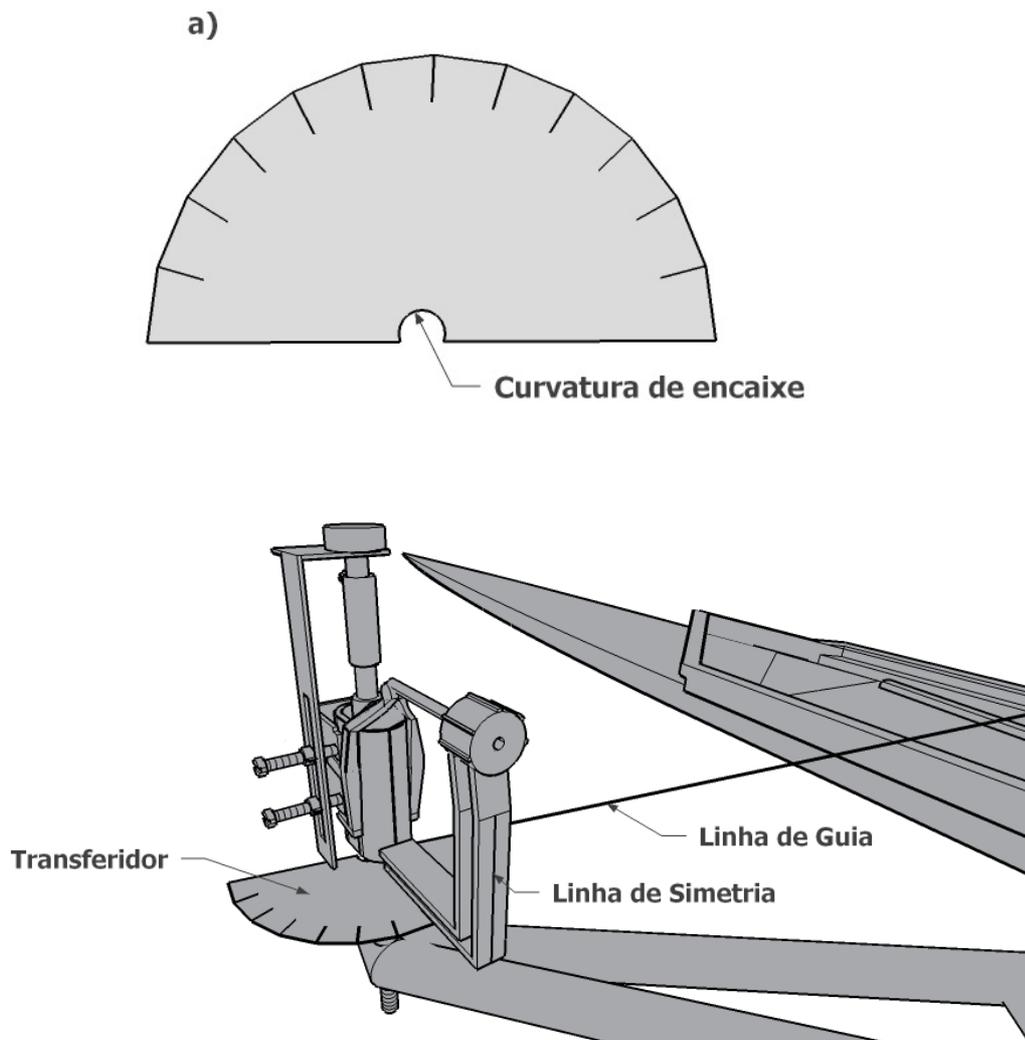


Figura 26 - a) Transferidor. b) Montagem para o levantamento do eixo horizontal.

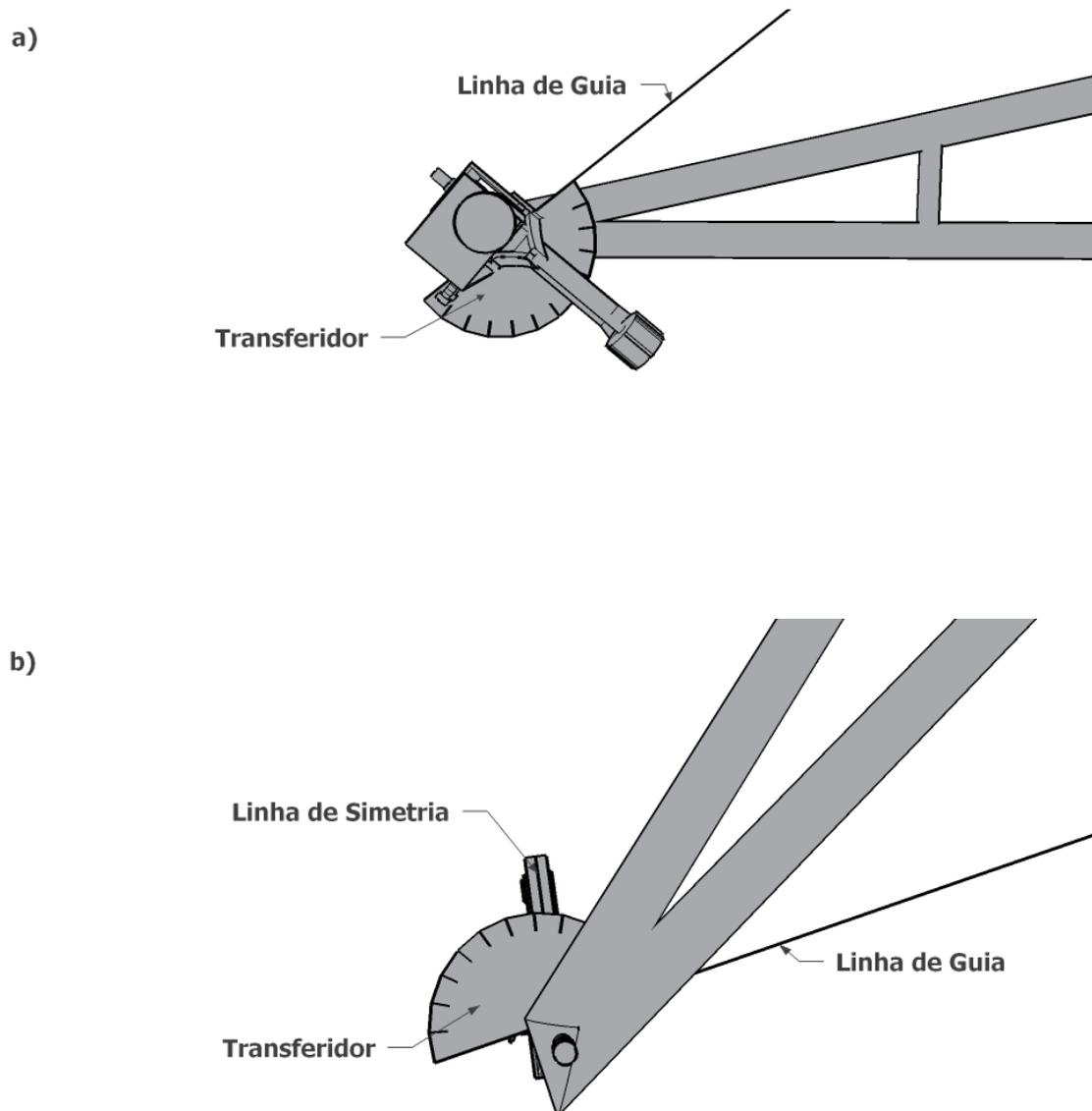


Figura 27 - a) Vista superior da montagem, notando-se a linha de guia coincidindo com o 0° do transferidor. b) Vista inferior da montagem, notando-se o apontamento feito pela linha de simetria.

3.5 Balanço de incerteza⁵

Existe a incerteza⁶ provocada pela não-adequação perfeita da curva de calibração típica a todos os pontos medidos experimentalmente (um gráfico dos resíduos é gerado para visualizar esse fato). Assim, o desvio-padrão dos pontos em torno de cada curva é calculado, sendo definido para cada eixo da seguinte forma:

$$\delta_{\text{pontos}} = \sqrt{\left(\frac{n-1}{n-2}\right)(\delta_y^2 - a^2 \cdot \delta_v^2)} \quad (3)$$

5 **Formulação e apresentação duma incerteza de medição e de suas componentes, assim como** de seu cálculo e combinação [21].

6 Parâmetro que caracteriza a dispersão dos **valores** atribuídos a um **mensurando**, com base nas informações utilizadas [21]. Neste texto, poderá ter valor negativo, o que não é permitido na sua definição em [21].

Tal que “ δ_y ” é o desvio-padrão dos ângulos “ γ ” medidos, “ δ_v ” é o desvio-padrão das tensões medidas, “ a ” é o coeficiente angular do eixo e “ n ” é o número de pontos ($V; \gamma$). Com esse desvio (Equação 3), será então calculada a incerteza, em graus, para tensões entre 0 V e 2,74 V (espaçadas de 0,1 V); escolhendo-se o maior valor de incerteza calculado como o representativo desse intervalo. A incerteza é dada por:

$$u_{1\delta} = \pm \delta_{\text{pontos}} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(v - \bar{v})^2}{(n-1)\delta_x^2}} \quad (4)$$

Essa incerteza é para o nível de confiança de um desvio-padrão. Para um nível de confiança maior, ela é multiplicada por um fator de abrangência⁷:

$$u_{2\delta} = 2 \cdot u_{1\delta} \quad (5)$$

Tal que, para uma distribuição normal, $u_{2\delta}$ representa uma incerteza com nível de confiança de 95%.

3.6 Procedimento de teste⁸

O sistema precisa ser testado em assuntos distintos: durabilidade, sendo capaz de resistir a esforço físico, número de ciclos de um treino, imersão em água e tempo de funcionamento de um treino; adequação do projeto mecânico, sendo capaz de não prejudicar a remada do atleta; medição dos ângulos, a realização da medição dos ângulos em condições reais de funcionamento.

Para testar o sistema, um ensaio⁹ na qual o transdutor é instalado no barco de um atleta durante seu treino é executado. Ao todo, dois períodos de 30 minutos, intercalados com 5 minutos de descanso, em voga 18 (18 remadas/minuto), precedida de 25 minutos de aquecimento, são analisados e os resultados são comparados com outros sinais da literatura.

7 Número maior do que um pelo qual uma **incerteza-padrão combinada** é multiplicada para se obter uma **incerteza de medição expandida** [21].

8 Adaptação do termo utilizado pelo INMETRO [22] ao seguir a norma NBR IEC 60601 para designar procedimentos que visam a levantar a utilização de um produto.

9 Adaptação do termo utilizado pelo INMETRO [22] ao seguir a norma NBR IEC 60601 para designar a execução dos procedimentos de teste.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Curvas de calibração

Após a execução do método de medição descrito no capítulo anterior (Seção 3.4), ocorrem os resultados de medição¹⁰, os quais são mostrados aqui.

Observando os gráficos dos dois eixos (Figura 28), percebe-se que o experimento 1 produz curvas bem semelhantes tanto com o incremento dos ângulos quanto com o seu decremento. De fato, a diferença entre as médias dos pontos obtidos na ida e na volta se mostra menor que a resolução de 0,01 V do multímetro (Figura 29). Os coeficientes angulares das curvas de calibração típicas são:

$$a_V = 99,4480 \text{ (}^\circ/V\text{)} \quad (6)$$

$$a_H = 100,916 \text{ (}^\circ/V\text{)} \quad (7)$$

Aliados a esses coeficientes angulares, os coeficientes lineares descrevem as duas curvas. Conforme já explicado anteriormente (Seção 3.1), eles valem:

$$b_V = b_H = -90^\circ \quad (8)$$

Percebe-se que as curvas de calibração típicas não se adequam perfeitamente aos pontos experimentais, fato comprovado pela existência de resíduos (Figura 30). A incerteza da curva de regressão (Equação 5) é de:

$$u_{2\delta_V} = \pm 1,5^\circ \quad (9)$$

$$u_{2\delta_H} = \pm 1,2^\circ \quad (10)$$

A curva de calibração do experimento 2 é muito próxima à curva de calibração típica (Figura 31). Fato comprovado pela pequena diferença entre as médias dos pontos do experimento 1 e as médias dos pontos do experimento 2 (Figura 32).

¹⁰ Conjunto de **valores** atribuídos a um **mensurando**, juntamente com toda outra informação pertinente disponível [21].

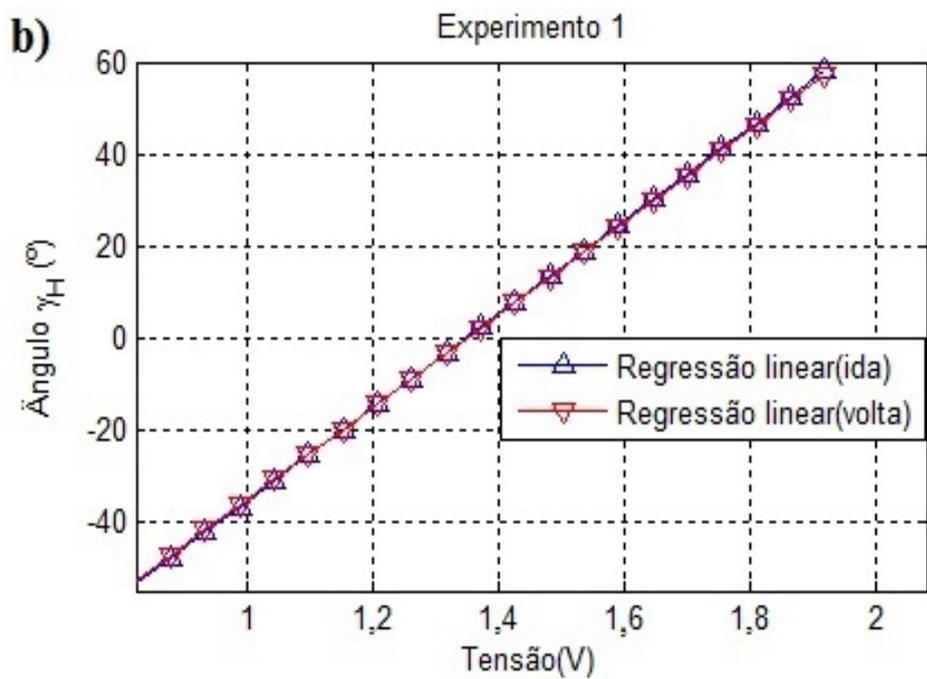
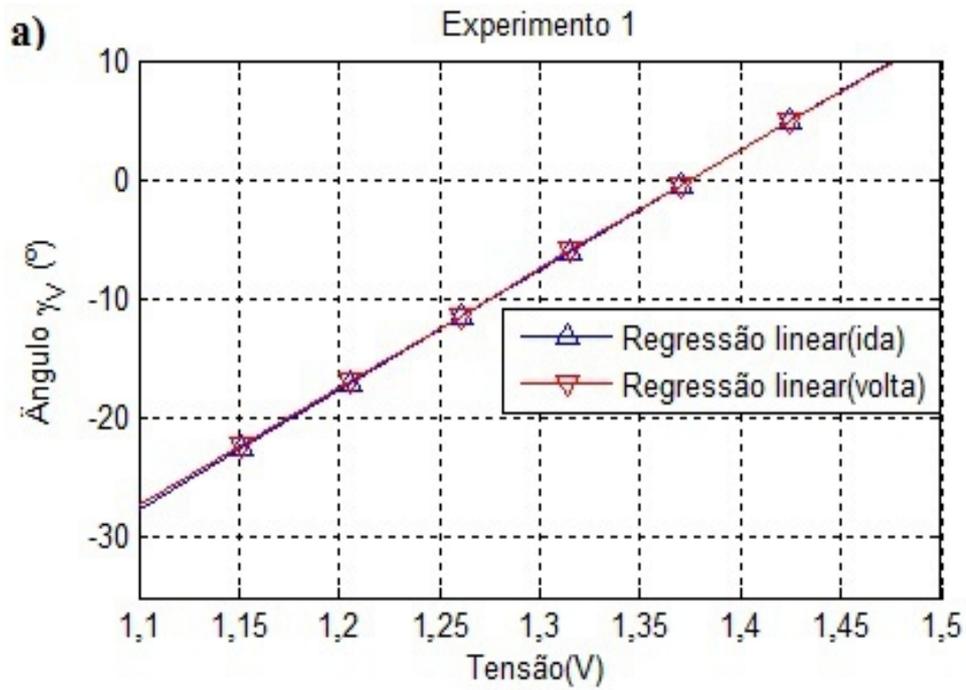


Figura 28 - Curvas de calibração do experimento 1 para o eixo vertical. b) Curvas de calibração do experimento 1 para o eixo horizontal.

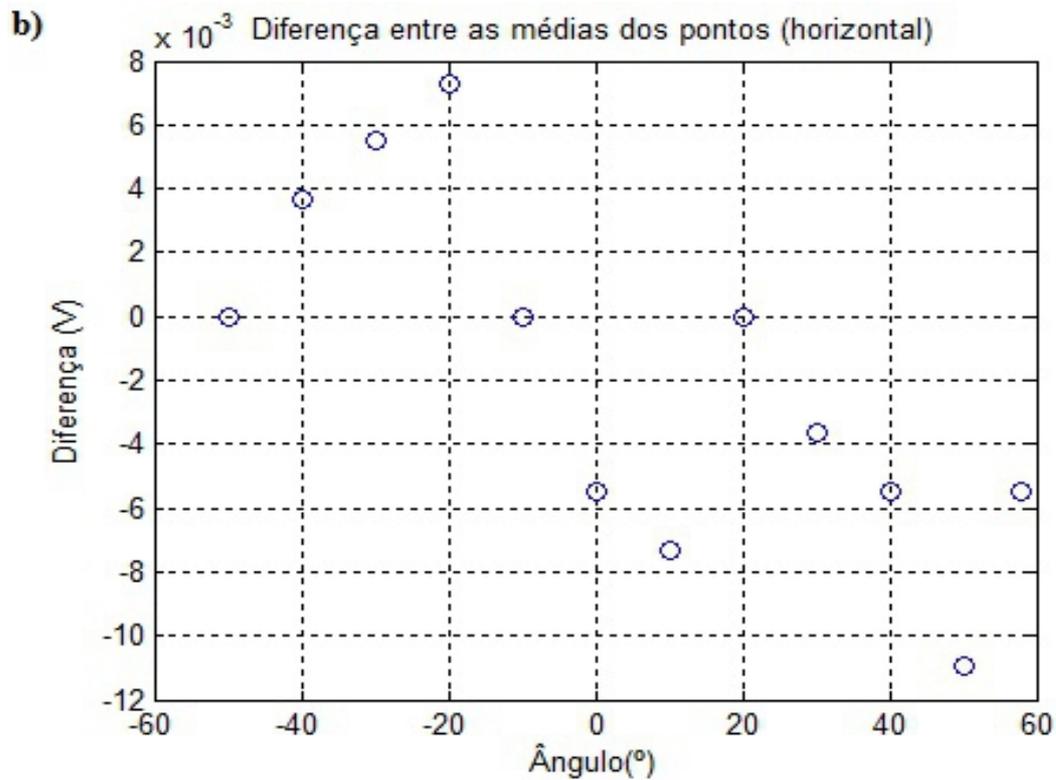
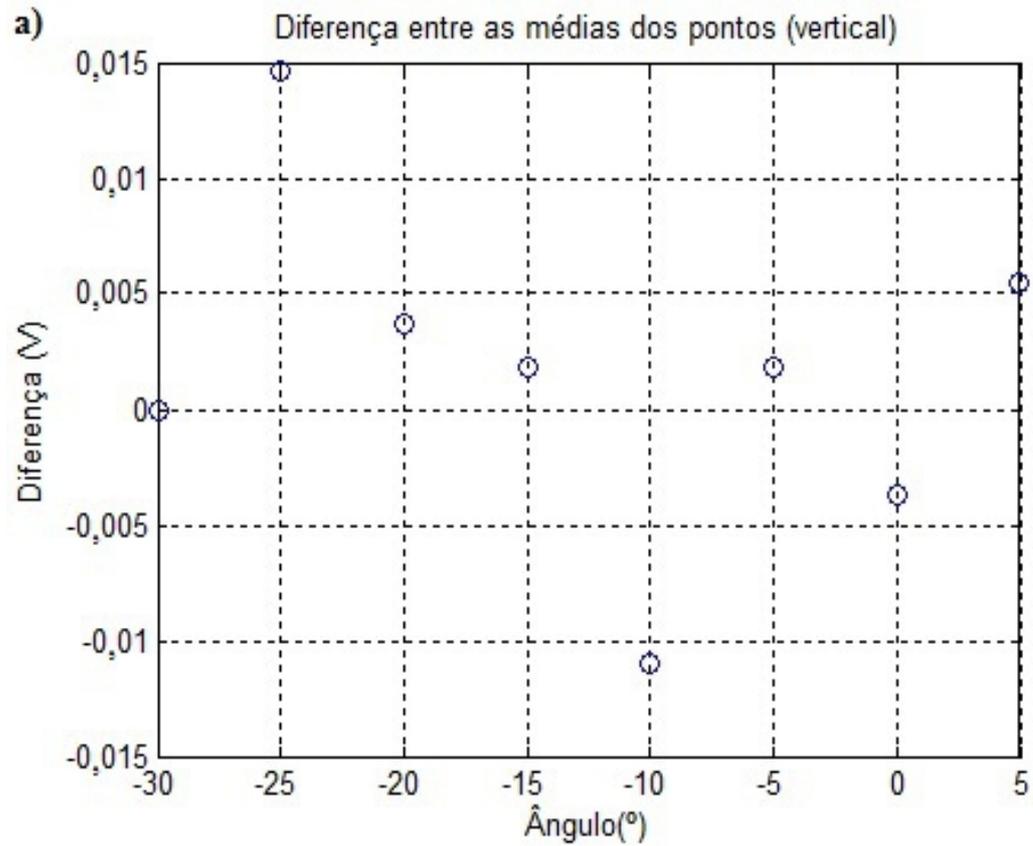


Figura 29 - a) Diferença entre as médias dos pontos de ida e as médias dos pontos de volta para o eixo vertical. b) Diferença entre as médias dos pontos de ida e as médias dos pontos de volta para o eixo horizontal.

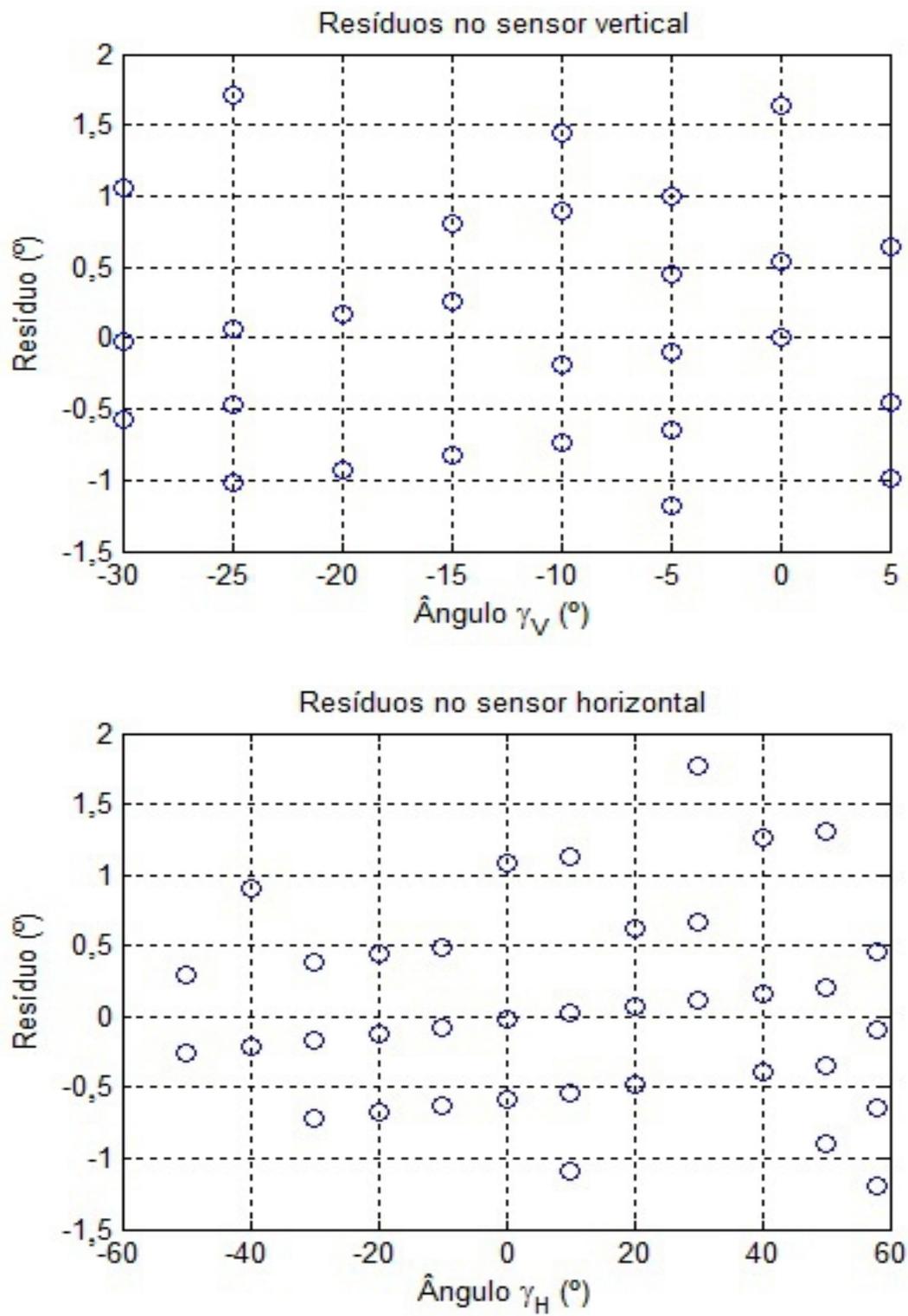


Figura 30 - a) Resíduos da curva de calibração típica do eixo vertical. b) Resíduos da curva de calibração típica do eixo horizontal.

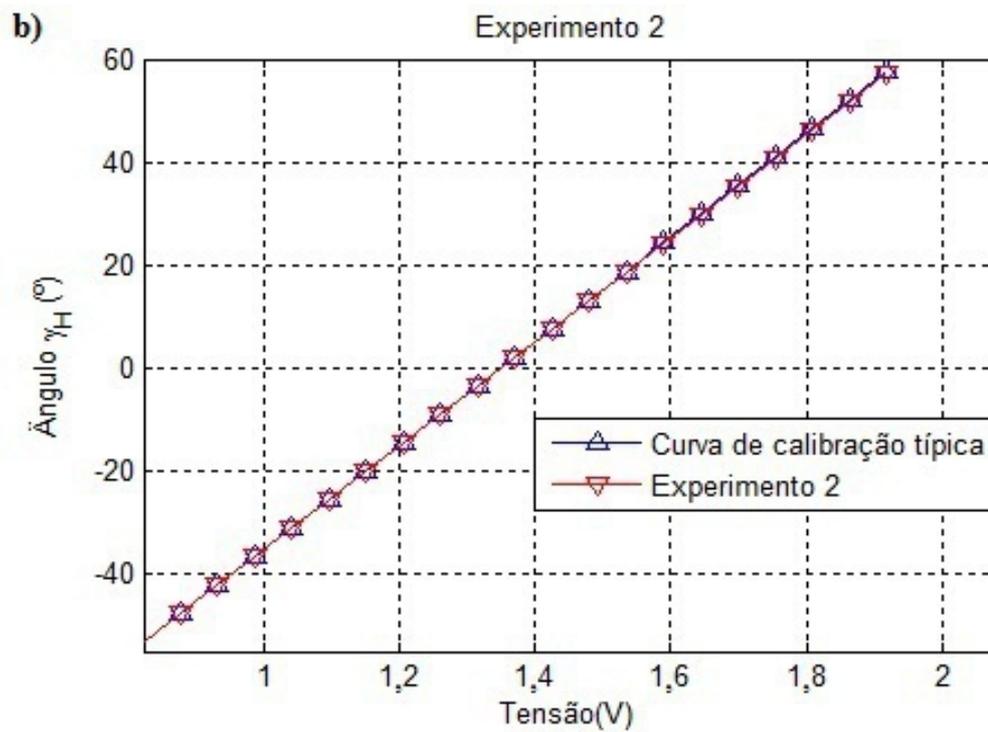
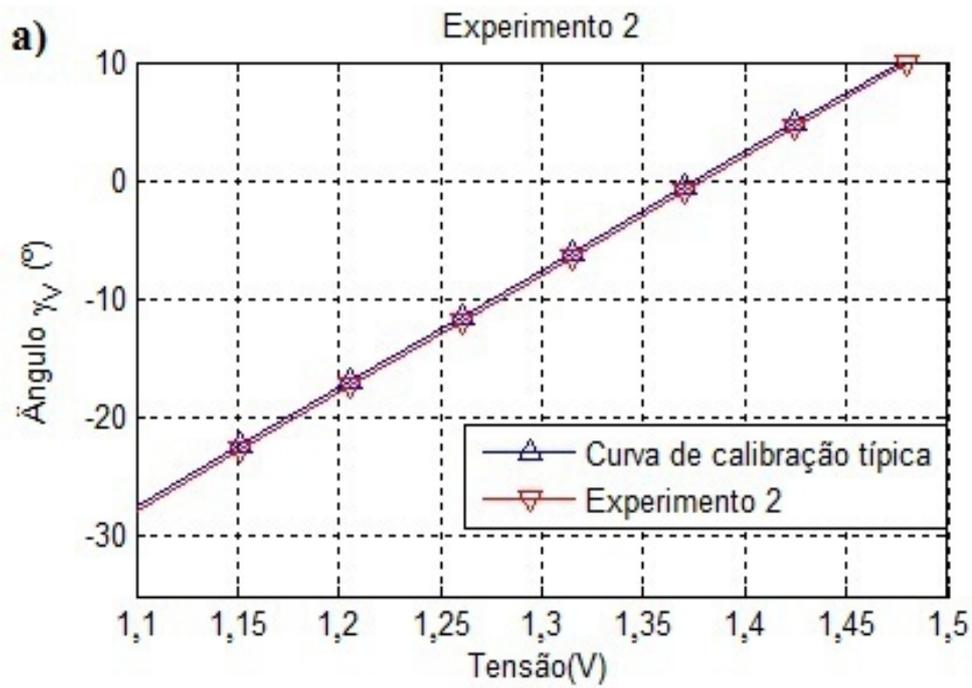
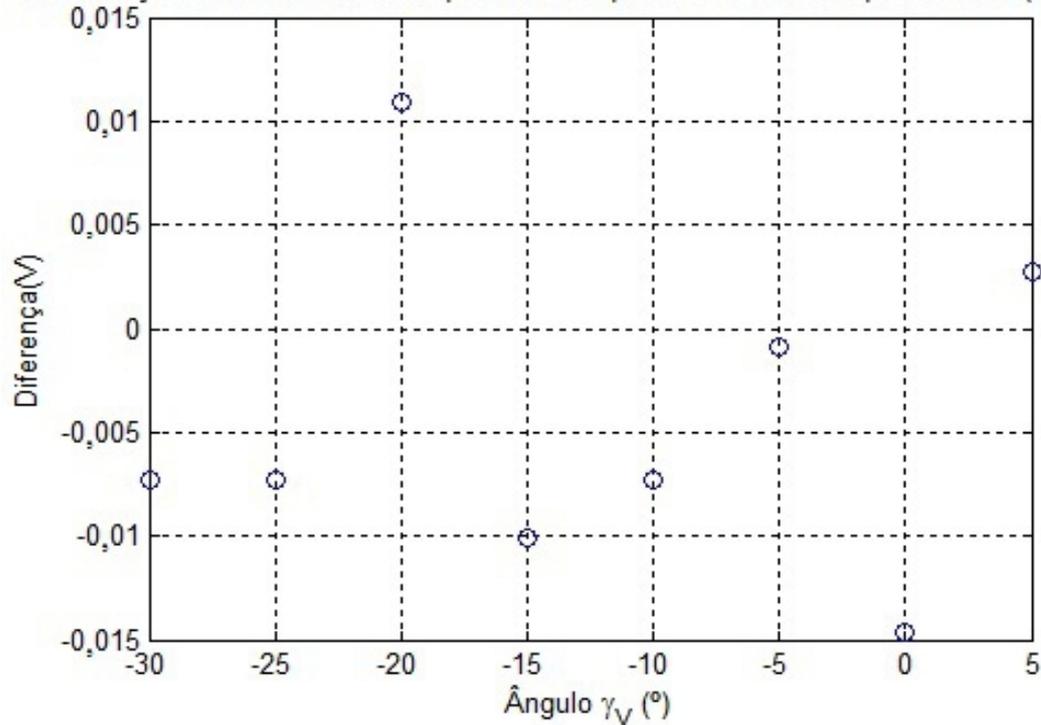


Figura 31 - a) Curva de calibração típica e curva de calibração do experimento 2 para o eixo vertical. b) Curva de calibração típica e curva de calibração do experimento 2 para o eixo horizontal.

a) Diferença entre as médias dos pontos do experimento 1 e do experimento 2 (vertical)



b) $\times 10^{-3}$ Diferença entre as médias dos pontos do experimento 1 e do experimento 2 (horizontal)

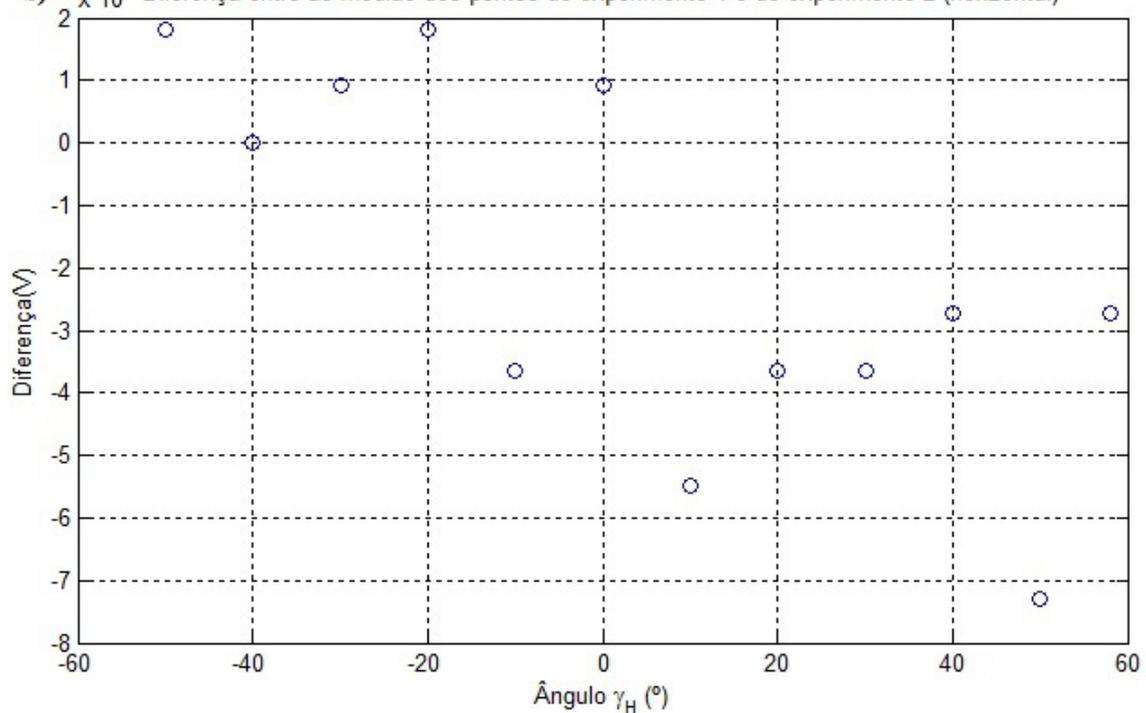


Figura 32 - a) Diferença entre as médias dos pontos do experimento 1 e as médias dos pontos do experimento 2 para o eixo vertical. b) Diferença entre as médias dos pontos do experimento 1 e as médias dos pontos do experimento 2 para o eixo horizontal.

4.2 Ensaio no barco

Durante o ensaio no barco, o sistema, incluindo *datalogger* e transdutor, não apresentou defeitos físicos ou eletrônicos e nem interrupções, funcionando por uma hora e meia.

Após o ensaio, o *datalogger* continha as informações do ângulo horizontal, ângulo vertical e acelerações do treino (Figura 33). Observa-se que a aceleração no eixo X foi em torno de zero. Olhando com maior detalhe uma das remadas, nota-se que o ângulo vertical variou em torno de $+10^\circ$ a -5° (Figura 34a), enquanto o horizontal em torno de $+60^\circ$ a -35° (Figura 34a). A duração do movimento foi de 3,2 s; o que significa uma voga de 18,75 remadas/min; enquanto a velocidade média do atleta, informada pelo GPS, foi de 3,31 m/s. Analisando esses dois gráficos e a aceleração ao longo da remada (Figura 35), vê-se que existem 5 momentos:

1. Ângulo vertical positivo estável com ângulo horizontal variando de 0° a $+60^\circ$ (3002,7 s a 3003,7 s); a aceleração Y é em torno de zero;
2. Descida do ângulo vertical com ângulo horizontal positivo estável (3003,7 s a 3004,1 s); a aceleração Y é negativa;
3. Subida do ângulo vertical, mantendo-se negativo, com descida do ângulo horizontal de $+60^\circ$ a -35° (3004,1 s a 3005,1 s); a aceleração Y é positiva;
4. Subida brusca do ângulo vertical com ângulo horizontal negativo quase máximo (3004,75 s a 3004,95 s); diminuição brusca da aceleração Y;
5. Subida do ângulo horizontal coincidente com ângulo vertical positivo estável (3005,1 s a 3005,9 s); aceleração Y em torno de zero;

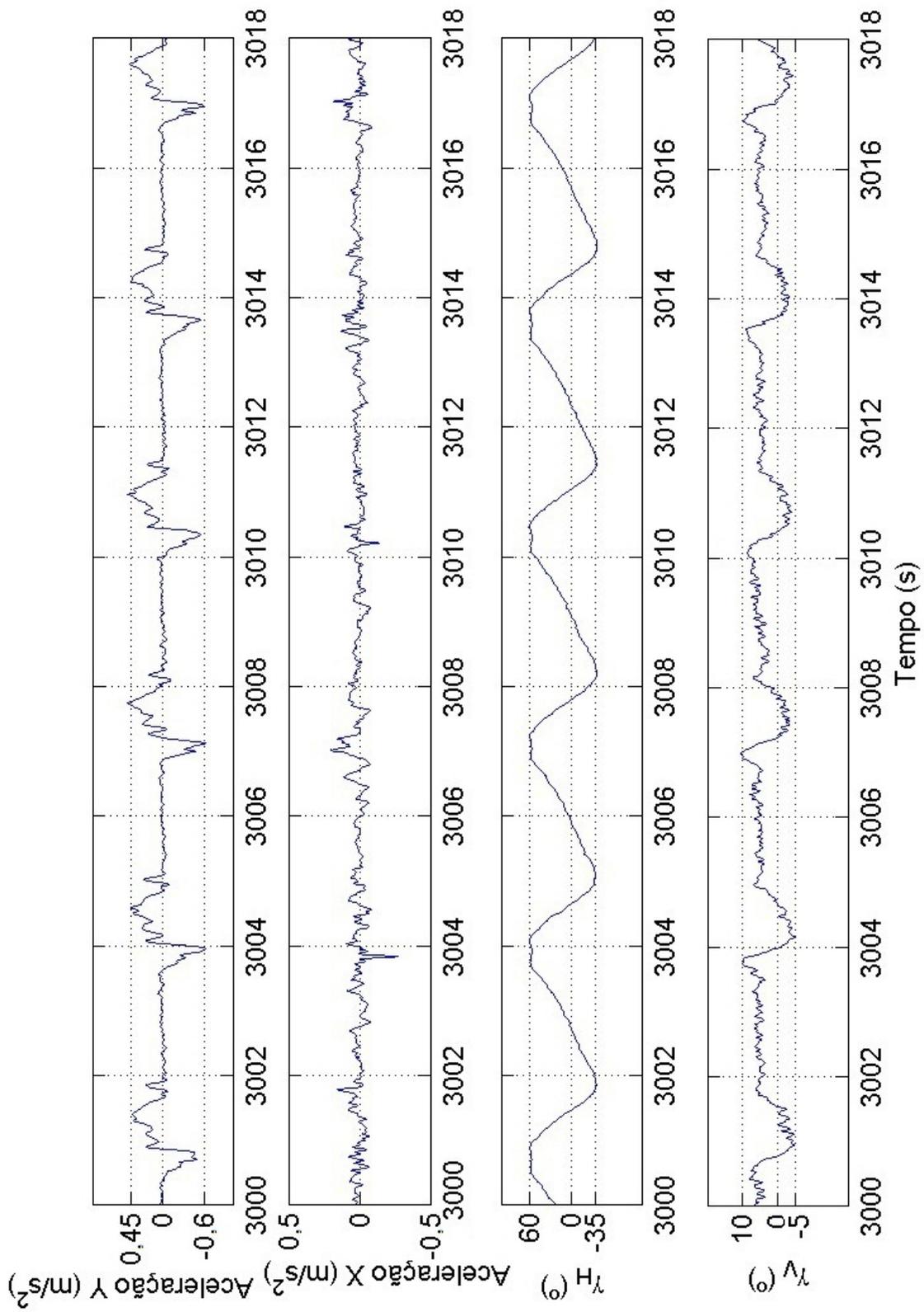


Figura 33 - Sinais adquiridos no ensaio. As acelerações estão normalizadas para a aceleração da gravidade.

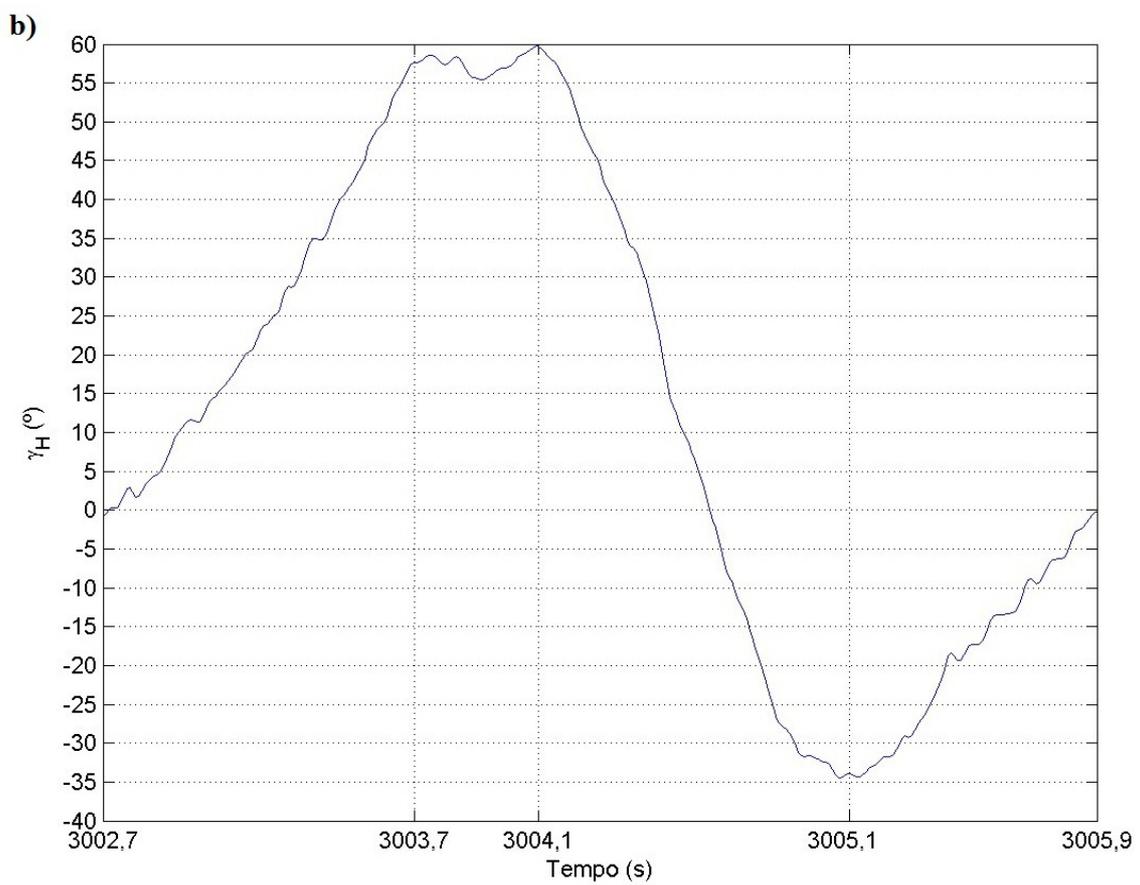
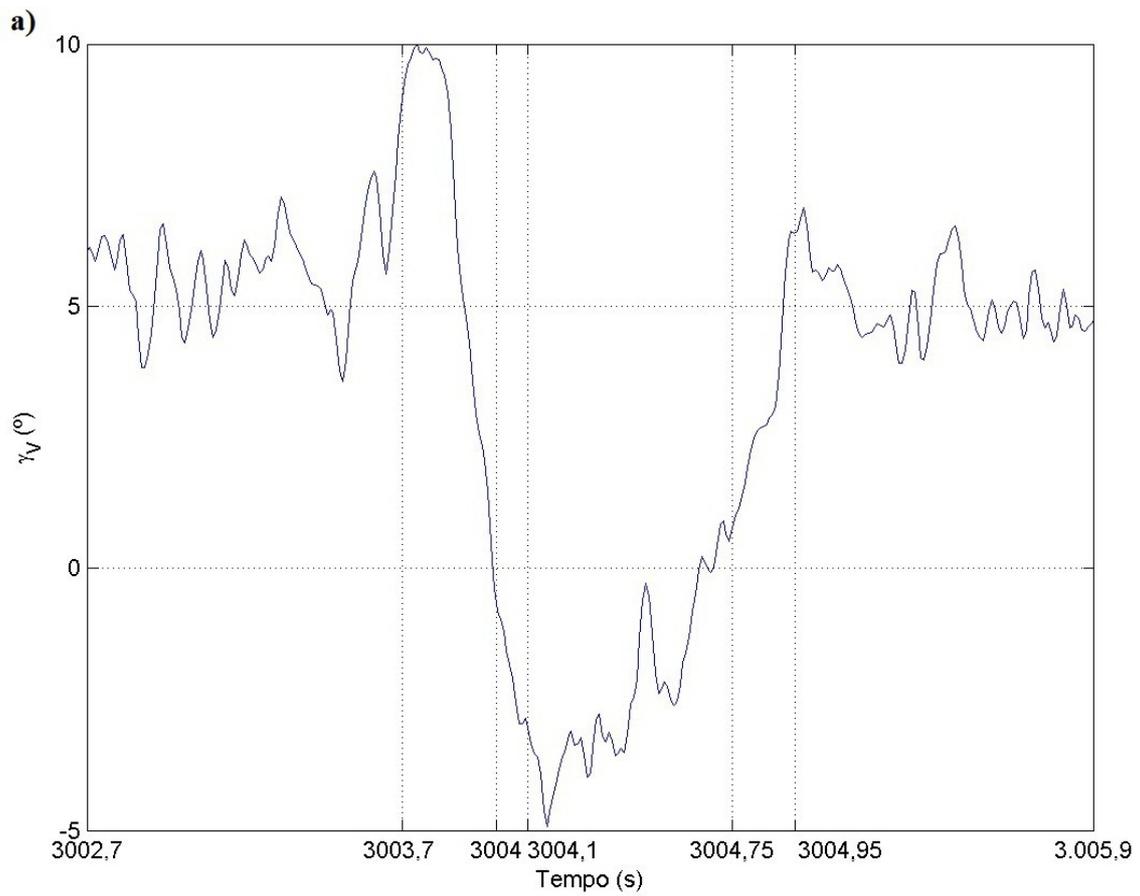


Figura 34 -. a) Ângulo vertical durante uma remada. b) Ângulo horizontal durante uma remada.

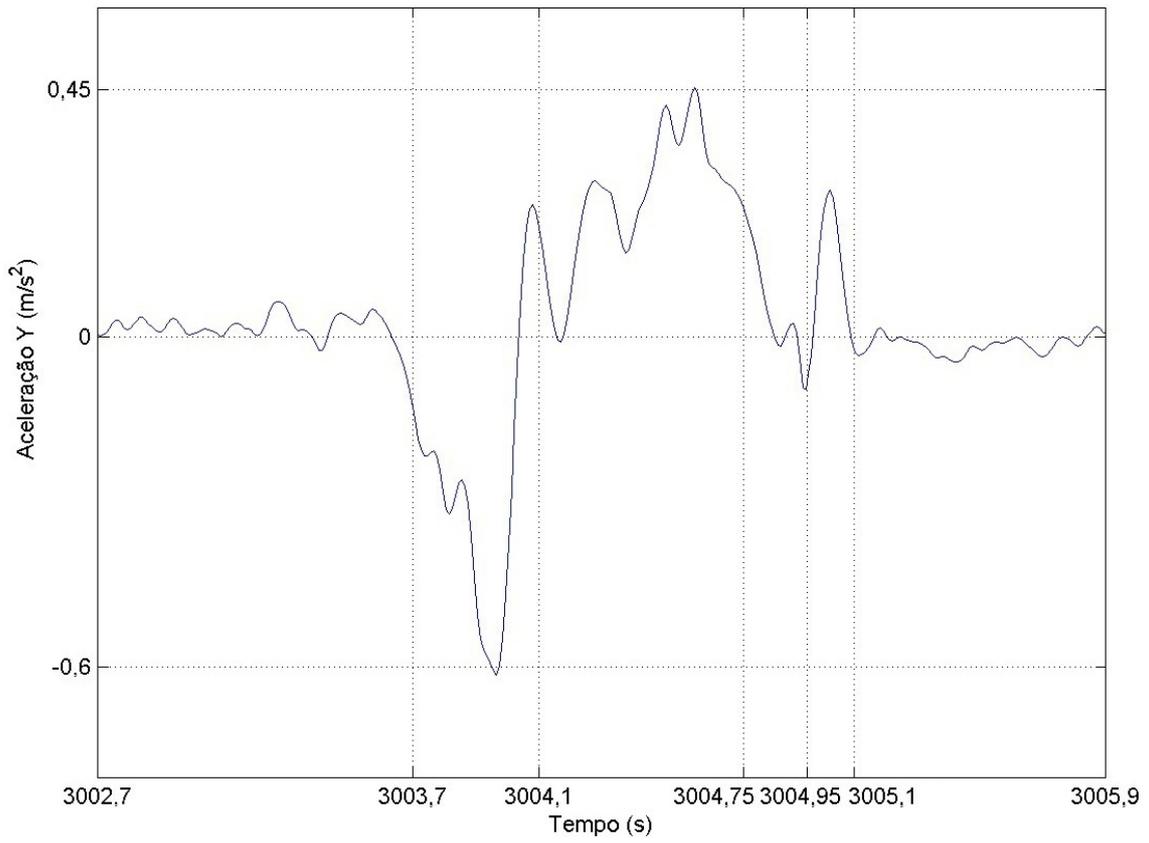


Figura 35 - Aceleração no eixo Y, durante uma remada, normalizada para a aceleração da gravidade.

Capítulo 5

Discussão

Após os resultados de medição mostrados no capítulo 4, uma discussão sobre eles é feita neste capítulo. Primeiramente são abordados os resultados dos experimentos com os potenciômetros, depois os resultados do ensaio.

As baixas diferenças entre as curvas obtidas no experimento 1 demonstram que não há a ocorrência de fenômenos significativos de histerese nos dois eixos (Figura 28 e 29). Também nesse experimento, são obtidas incertezas do sistema de $\pm 1,5^\circ$ no eixo vertical (Equação 9) e de $\pm 1,2^\circ$ no eixo horizontal (Equação 10), com nível de confiança de 95%, que são até 3 vezes maiores do que a dos sistemas comerciais tratados no capítulo 2. Embora, no quesito incerteza, o sistema proposto não seja mais satisfatório que os comerciais, essa característica é mais impactante para atletas de alto nível, favorecendo o uso do sistema em atletas inciantes (fato reforçado pelo seu custo mais baixo, o qual é geralmente empregado nas etapas iniciais do aprendizado).

No experimento 1, também são calculados os coeficientes angulares (Equação 6 e 7) das curvas de calibração típicas, que juntamente com os lineares (Equação 8), tornam o transdutor em um transdutor absoluto, facilitando o seu uso em relação ao modelo antigo do LIB/COPPE.

Os resultados do experimento 2 (Figura 31) também não evidenciam outras não-linearidades significativas. As curvas obtidas são muito semelhantes às curvas de calibração típicas (Figura 32). Assim, os sensores escolhidos são adequados ao projeto.

Voltando-se para o ensaio, o sistema mecânico se mostra eficiente, já que não existem defeitos nos sensores e nem no transdutor como um todo, além da afirmação do atleta de que não há qualquer tipo de desconforto provocado pelo sistema. A durabilidade quanto ao número de ciclos dos sensores e a proteção à imersão em água, propiciada pela cola quente, se mostram satisfatórias durante e após um treino. A bateria é capaz de manter o sistema em operação por todo o tempo de uma hora e meia, mostrando que o consumo é como planejado, portanto a escolha dos valores dos potenciômetros é acertada.

Também é observado no ensaio a relação entre aceleração e ângulos de remada em momentos distintos do movimento (Figura 34 e 35). O momento 1 representa o *catch*, pois o atleta coloca a pá do remo em direção à proa do barco (ângulo horizontal

variando de 0° a $+60^\circ$) com o remo fora da água (ângulo vertical positivo estável); a aceleração Y em torno de zero faz sentido já que não há contato do remo com a água nesse momento. O momento 2 representa o início do *drive*, porque há a colocação do remo na água (descida do ângulo vertical) com a permanência da pá do remo na direção da proa (ângulo horizontal positivo estável); a aceleração Y negativa mostra que a entrada do remo na água provoca desaceleração. O momento 3 é o meio e o fim do *drive*, já que apresenta deslocamento horizontal da pá do remo, começando na proa e indo para a popa (descida do ângulo horizontal de $+60^\circ$ a -35°), com subida do remo (subida do ângulo vertical), mantendo-se na água (ângulo vertical negativo), distribuída ao longo desse tempo (devido à configuração utilizada pelo remador); a aceleração Y é positiva, significando a impulsão do movimento de remada. Já o momento 4 demonstra o *finish* por causa da rápida retirada do remo da água (subida brusca do ângulo vertical); a diminuição brusca da aceleração Y concorda com o fato do remo não estar mais na água. Por fim, o momento 5 é o *recovery*, pois há a recolocação do remo em 0° na horizontal (subida do ângulo horizontal) com o remo fora da água (ângulo vertical positivo estável), portanto voltando para a posição inicial da remada; a aceleração Y em torno de zero condiz com o fato do movimento de alavanca não estar sendo realizado. Assim, é possível identificar as diferentes fases da remada.

A aceleração X (Figura 33) é em torno de zero, o que significa que o atleta mantém uma linha reta durante cada trecho retilíneo do treino.

O tempo médio de remada é de 3,2 s, maior que o estipulado em 1,5 s; mas devido à instrução dos técnicos em manter voga 18 durante o treino, valor que é levemente superado pelo atleta já que alcança o índice de 18,75 remadas/minuto (em torno 2500 ciclos durante o treino), atingindo 3,31 m/s. Portanto, é possível extrair a voga do atleta e sua velocidade.

Comparando o resultado da aceleração adquirido nesse trabalho (Figura 33 e 35) com a aceleração adquirida pelo sistema *Accrow* de Mattes e Schaffert [24] (Figura 36), percebem-se semelhanças no formato dos sinais (observando que a amplitude dos gráficos desse último trabalho não estão em função da aceleração “g” da gravidade). Logo, a medida de aceleração é conforme com outros trabalhos.

Como o ângulo horizontal varia de $+60^\circ$ a -35° (Figura 34b), a amplitude da remada é de 95° , muito próxima à amplitude de remada ideal de 90° exposta por Llosa *et al.* [12]. As medições dos ângulos horizontal e vertical (Figura 34) estão de acordo com as medições do trabalho de Kleshnev [13], tanto no formato quanto na amplitude

dos sinais (Figura 37). O ângulo horizontal de Kleshnev [12] está invertido em relação ao deste trabalho devido ao referencial adotado por ele, com ângulos negativos no *catch* e positivos no fim do *drive*. Assim, a medição angular feita aqui é condizente com a literatura.

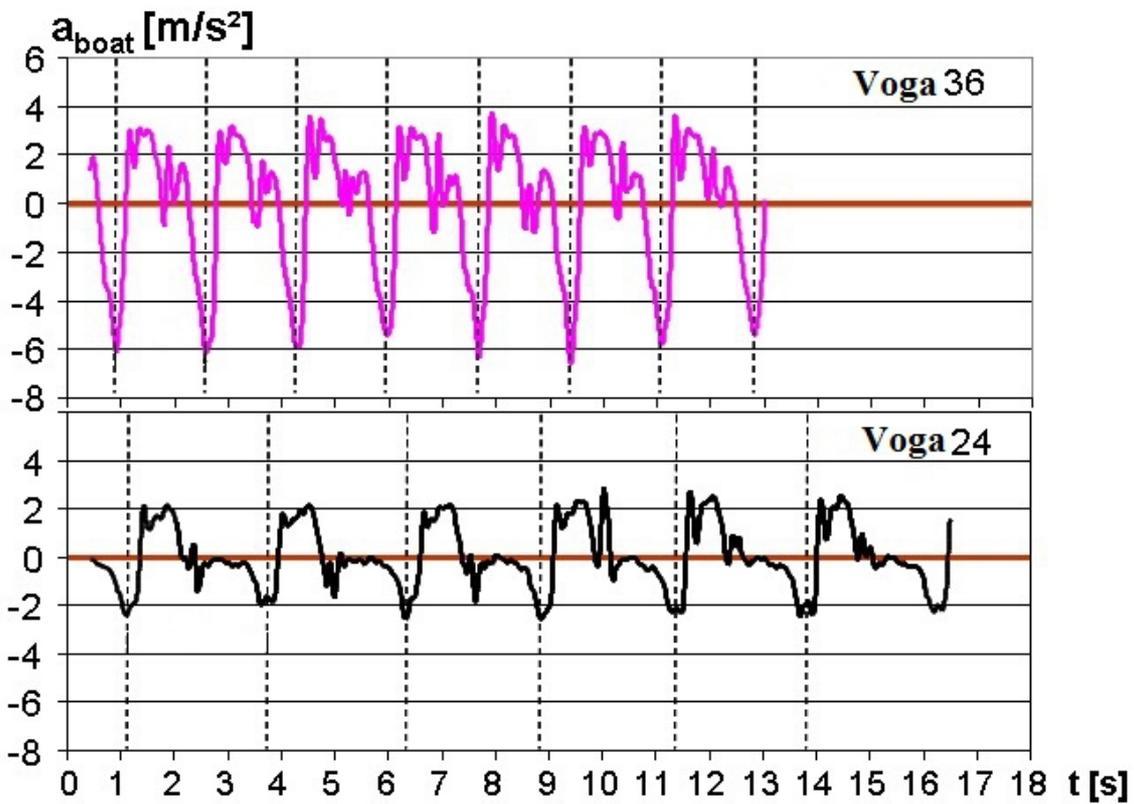


Figura 36 -Aceleração do barco na vogas 36 e 24 durante 18 s (medido pelo sistema *Accrow*). Fonte: adaptado de Mattes e Schaffert [24].

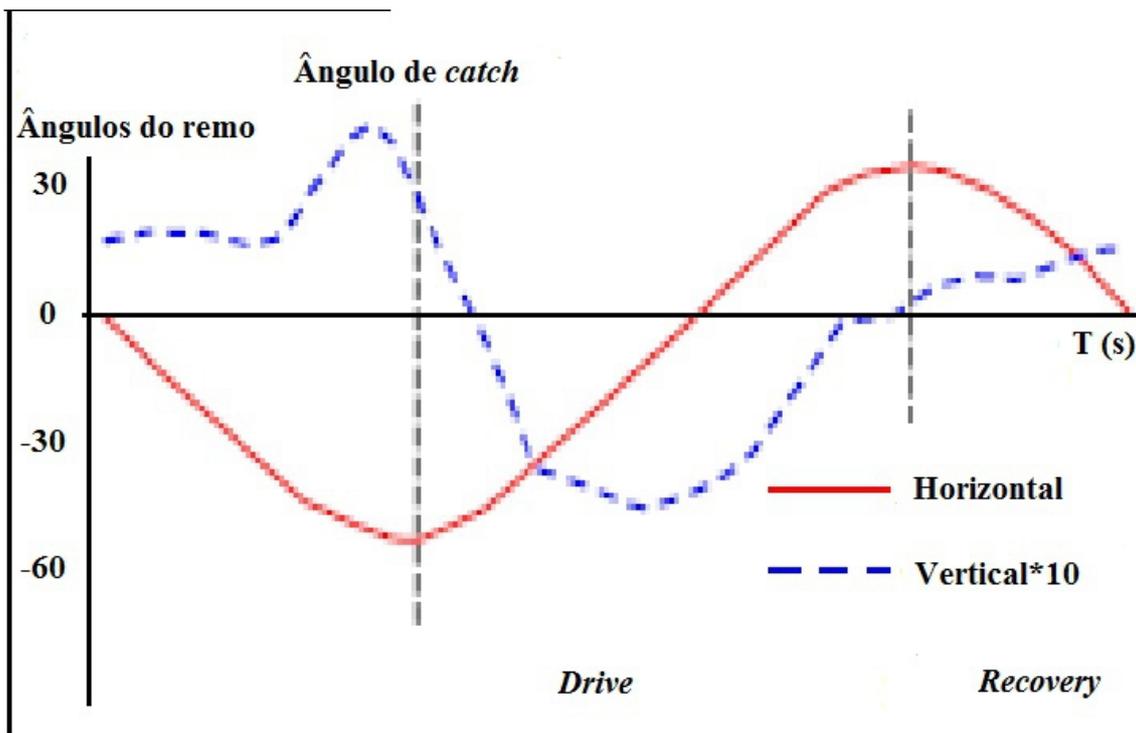


Figura 37 - Ângulos de remada medidos pelo sistema de Kleshnev [12]. fonte: adaptado de Kleshnev [12].

Capítulo 6

Conclusão

Neste trabalho, é proposto um sistema capaz de medir os ângulos (horizontal e vertical) feitos por um remador durante a prática do Remo. Ainda que não seja uma versão profissional e totalmente finalizada, é capaz de cumprir com os objetivos propostos, obtendo resultados em conformidade com a literatura sobre o assunto.

Bibliografia

- 1 CONFEDERAÇÃO BRASILEIRA DE REMO. Disponível em: <<http://www.cbr-remo.com.br>>. Acesso em: 20 Set. 2012.
- 2 LICHT, H. **O Remo através dos tempos**. 2. ed. Porto Alegre, RS: Corag, 1986. Disponível em: <http://www.cbr-remo.com.br/docs/2008_o_remo_atraves_dos_tempos_2a_edicao.PDF>. Acesso em: 21 Set. 2012.
- 3 CONCEPT2. Disponível em: <http://www.concept2.com.br/v2_0>. Acesso em: 29 Set. 2012.
- 4 CONSTANTA. Disponível em: <<http://www.constantacom.br>>. Acesso em: 6 Out. 2012.
- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60529**. Disponível em: <<http://fen-uerj.net/Prominp/Normas/NBR-IEC-60529.PDF>>. Acesso em: 15 Nov. 2012.
- 6 CTS. **Series 284 datasheet**: precision potentiometer. Disponível em <<http://www.ctscorp.com/components/Datasheets/284.pdf>>. Acesso em: 6 Out. 2012.
- 7 ELECTROSWITCH. **500 series magnetic encoders**. Disponível em <<http://www.electro-nc.com/500series.pdf>>. Acesso em : 27 Nov. 2012.
- 8 WEBA SPORT. Disponível em: <<http://webasport.at/en/products/rowx-outdoor>>. Acesso em: 1 Dez. 2012.
- 9 PEACH INNOVATIONS. Disponível em: <<http://www.peachinnovations.com/tourintro.htm>>. Acesso em: 1 Dez. 2012.
- 10 COMITÊ OLÍMPICO BRASILEIRO. Disponível em: <<http://www.cob.org.br/>>. Acesso em: 16 Jan. 2013.
- 11 INTERNATIONAL OLYMPIC COMMITTEE. Disponível em: <<http://www.olympic.org/>>. Acesso em: 16 Jan. 2013.
- 12 LLOSA, J. et al. REMOTE, a Wireless Sensor Network Based System to Monitor Rowing Performance. **Sensors**. 2009. Disponível em <<http://www.mdpi.com/1424-8220/9/9/7069>>. Acesso em: 23 Jan. 2013.
- 13 KLESHNEV, V. **Rowing Technology and Technique**. 2004. Disponível em: <<http://www.biorow.com/Papers.htm>>. Acesso em: 23 Jan. 2013.
- 14 BETTINELLI, S. et al. An integrated data acquisition system for on-water measurement of performance in rowing. **Strain**. 2010.
- 15 PILGERAM, K. C; DELWICHE, M. J. Device for on-the-water measurement of rowing output. **Sports Engineering**. 2006.

16 SMITH, R. M; LOSCHNER, C. Biomechanics feedback for rowing. **Journal of Sports Science**. 2002.

17 NXP SEMICONDUCTORS. **LPC 2141/42/44/46/48**. Disponível em: <http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC2141_42_44_46_48.pdf>. Acesso em: 28 Jan. 2013.

18 SPARKFUN ELETRONICS. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/>>. Acesso em: 28 Jan. 2013.

19 FREESCALE SEMICONDUCTOR. Disponível em: <<http://www.freescale.com/>>. Acesso em: 31 Jan. 2013.

20 BOURNS. **EMS22D**: Non-Contacting Direction/Step Encoder. Disponível em: <<http://www.bourns.com/data/global/pdfs/EMS22D.pdf>>. Acesso em: 1 Fev. 2013.

21 INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: conceitos fundamentais e gerais de termos associados. Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/infotec/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em: 3 Fev. 2013.

22 INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br>>. Acesso em: 3 Fev. 2013.

24 MATTES, K., SCHAFFERT, N. New Measuring and on Water Coaching Device for Rowing. **Journal of Human Sport and Exercise**. 2010.