



SIMULADOR BIOMECÂNICO DE REMO: MODELAGEM DINÂMICA E CINEMÁTICA DA REMADA

Marcio de Oliveira Nunes

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 2012

SIMULADOR BIOMECÂNICO DE REMO: MODELAGEM DINÂMICA E
CINEMÁTICA DA REMADA

Marcio de Oliveira Nunes

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 Assis Tavares, D.Sc.

Prof. Pedro Paulo da Silva Soares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2012

Nunes, Marcio de Oliveira

Simulador biomecânico de remo: Modelagem dinâmica e cinemática da remada / Marcio de Oliveira Nunes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XI, 79 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador(es): Marcio Nogueira de Souza

Alexandre Visintainer Pino

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Biomédica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 67-69.

1. Biomecânica do remo. 2. Simulador em programação. 3. Modelagem. I. Souza, Marcio Nogueira de, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Biomédica. III. Título.

Dedicatória

Dedico essa dissertação à minha família, eterno início e fim de tudo.

Agradecimentos

Agradeço todo o suporte incondicional que recebi de todos os integrantes da minha família, sempre visando o meu sucesso tanto como pessoa quanto como profissional. Obrigado por cada um de vocês existirem!

Agradeço a orientação dos professores Marcio Nogueira de Souza e Alexandre Visintainer Pino. Nossas reuniões foram de vital importância não só para a conclusão deste trabalho, como também para a minha formação enquanto cientista.

Agradeço aos amigos libianos/pebianos: John (João Catunda), pelas ideias inspiradoras e pela permanente predisposição em ajudar; Danielle Polato e Denise Costa, minhas companheiras de profissão e conselheiras; Cátia Carvalho, pela boa companhia que representaste nessa caminhada; Aluizio Netto, pelo conhecimento ímpar e disposição em ajudar; Fernando Monteiro, pela sua versatilidade com hardware.

Agradeço aos amigos: Rômulo Costa, Filipe Berardinelli, Diego Monteiro, Thiago Lepritiê, Igor Pimentel, Roberta Santana, Iamonã Vilhena, Fátima Resende, Carlos Stefany, Carlos Diego, Alexandre Olsen, Eduardo Pedrosa, Leonardo Bello e Bruno Cardoso. Essa segunda família sem sombra de dúvidas possui parte do mérito em tudo que faço.

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

SIMULADOR BIOMECÂNICO DE REMO: MODELAGEM DINÂMICA E
CINEMÁTICA DA REMADA

Marcio de Oliveira Nunes

Junho/2012

Orientadores: Marcio Nogueira de Souza
Alexandre Visintainer Pino

Programa: Engenharia Biomédica

O desempenho no remo olímpico tem sido determinado por detalhes que são empregados durante a remada. Sendo assim, tem havido um crescente avanço da pesquisa em variáveis que afetam o desempenho de atletas de alto rendimento. Desse modo, o presente trabalho objetivou desenvolver uma modelagem biomecânica que contemplasse tanto os aspectos da dinâmica (direta e inversa) quanto pudesse servir como um sistema de realimentação gráfica da remada. O trabalho foi realizado com um grupo de 5 remadores, com $30,0 \pm 11,7$ anos, altura de $176,5 \pm 12,0$ cm e $77,0 \pm 9,6$ kg, que realizaram cada um regatas a voga baixa (20), média (24) e alta (28), para posterior análise da correlação de Pearson. A parte dinâmica do simulador conseguiu reproduzir, a partir de variáveis que caracterizam o padrão de remada, as curvas de velocidade e aceleração esperadas (vel. média = 3,12 m/s; pico pos. de acel. = $5,45 \text{ m/s}^2$; pico neg. de acel. = $-5,03 \text{ m/s}^2$), tanto quando comparados aos sinais coletados na fase experimental quanto quando comparados a dados observados na literatura correlata. Na dinâmica inversa, os picos de força estimados foram de $258,01 \pm 21,54$ N ($r=0,749$), o impulso durante a fase ativa foi de $326,26 \pm 46,24$ Ns ($r=0,271$) e a morfologia do sinal obteve uma concordância de $80,10 \pm 6,38$ % ($r=-0,754$). Tais achados são corroborados pela literatura. A correlação negativa da concordância deve ser em função modo como se capta o sinal de aceleração. O simulador gráfico de remadas resultou num método alternativo para a avaliação da técnica da remada e monitoramento dos atletas.

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

BIOMECHANICAL SIMULATOR OF ROWING: DYNAMICAL AND
KINEMATICAL MODEL OF STROKE

Marcio de Oliveira Nunes

June/2012

Advisors: Marcio Nogueira de Souza
Alexandre Visintainer Pino

Department: Biomedical Engineering

For many times the details that characterize the pattern of the stroke are responsible to achieve a good performance on Olympic rowing. For such, the scientific research on variables that affect the performance of high performance athletes has increased a lot. In order that, the current study has as objective the development of a model for a biomechanical simulator which can be used as a dynamical model as well as a graphical simulator of stroke. The work was made with a group of 5 rowers, $30,0 \pm 11,7$ years old, $176,5 \pm 12,0$ cm of height and $77,0 \pm 9,6$ kg, who made each one regattas at slow (20) medium (24) and fast (28) stroke rate, and Pearson's correlation was calculated. The part relative to dynamics of rowing could reproduce, from variables that characterize the stroke pattern, the curves of velocity and acceleration excepted (mean speed = 3,12 m/s; pos. acel. peak = $5,45 \text{ m/s}^2$; neg. acel. peak = $-5,03 \text{ m/s}^2$), when it was compared to data recorded of the experimental part as well as when it was compared with data from the correlated papers. On inverse dynamics, the force peaks obtained was $258,01 \pm 21,54$ N ($r=0,749$), the impulse during the active phase was $326,26 \pm 46,24$ Ns ($r=0,271$) and the signal morphology had a concordance of $80,10 \pm 6,38$ % ($r=-0,754$). Such results are corroborated by the correlated literature. The negative correlation of concordance must be due the way that we used to collect boat acceleration. The graphical simulator of stroke shown be an alternative method to evaluate the stroke technique.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo Geral	4
1.2	Objetivos Específicos.....	4
2	Fundamentação Teórica.....	5
2.1	Conceitos Básicos Sobre os Aspectos da Remada e dos Seus sinais Associados 5	
2.2	Uma Visão sobre Simuladores Biomecânicos da Remada	9
3	Materiais e Métodos	13
3.1	A Dinâmica do Remo.....	13
3.1.1	A Dinâmica Direta	23
3.1.2	A Dinâmica Inversa	25
3.2	Simulação Cinemática em Gráfico 3D	30
3.2.1	O Equacionamento das Coordenadas	32
3.2.2	Análise do Simulador Gráfico 3D	41
4	Resultados.....	44
4.1	Dinâmica Direta.....	44
4.2	Dinâmica Inversa.....	45
4.2.1	Comparação entre os Métodos de Identificação de Fases do Ciclo	45
4.2.2	Obtenção dos Sinais de Entrada e Resultados da Estimação de força.....	45
4.2.3	Índices e Concordância das Estimativas de força.....	48
4.3	Simulação Gráfica 3D	50

5	Discussão	54
5.1	Método Alternativo de Detecção de Fases do Ciclo da Remada.....	54
5.2	Dinâmica Inversa.....	55
5.3	Dinâmica Direta.....	60
5.4	Simulação Cinemática 3D.....	61
6	Conclusão	66
7	Referências	67
	Apêndice A: Glossário.....	70
	Apêndice B: Sistema de Aquisição de Sinais.....	72
	Apêndice C: Experimento para Determinação do Coeficiente K.....	77
	Apêndice D: Ficha de Aquisição.....	79

Lista de Símbolos

– Variáveis Biomecânicas:

\mathbf{X}_s : Posição do sistema;

\mathbf{v}_s : Velocidade do sistema;

\mathbf{a}_s : Aceleração do sistema;

\mathbf{X}_b : Posição do barco;

\mathbf{v}_b : Velocidade do barco;

\mathbf{a}_b : Aceleração do barco;

$\mathbf{X}_{c/b}$: Posição linear do carrinho relativa ao barco;

$\mathbf{v}_{c/b}$: Velocidade do carrinho relativa ao barco;

$\mathbf{a}_{c/b}$: Aceleração do carrinho relativa ao barco;

$\mathbf{X}_{t/b}$: Posição linear do tronco do remador relativa ao barco;

$\mathbf{v}_{t/b}$: Velocidade do tronco do remador relativa ao barco;

$\mathbf{a}_{t/b}$: Aceleração do tronco do remador relativa ao barco;

$F_{\text{água}}$: Força de arrasto da água no casco do barco;

F_{ext} : Força externa ao sistema físico;

$F_{\text{mão}}$: Força aplicada na empunhadura longitudinal ao movimento do barco;

$F_{\text{pá}}$: Força de reação que a água faz na pá do remo;

θ_{HBB} : Ângulo horizontal à bombordo;

θ_{HBE} : Ângulo horizontal à boreste;

θ_{VBB} : Ângulo vertical a bombordo;

θ_{VBE} : Ângulo vertical a boreste;

– Parâmetros fixos:

K : Coeficiente de arrasto da água no casco do barco;

m_b : Massa do barco;

m_r : Massa do remador;

m_s : Massa do sistema;

D_p : Comprimento da perna do remador;

D_c : Comprimento da coxa do remador;

D_q : Largura do quadril do remador;

D_t : Comprimento do tronco do remador;

D_o : Largura dos ombros do remador;

Db : Comprimento do braço do remador;
 Da : Comprimento do antebraço do remador;
 Dcb : Comprimento do barco da proa à popa;
 Dfx : Distância da bola de proa até a reta que passa pelas duas forquetas;
 Dfy : Metade da distância entre as duas forquetas;
 Dfz : Altura da forqueta em relação ao finca-pé;
 Dpf : Distância da bola de proa ao finca-pé;
 Dft : Distância do finca-pé ao início do trilho;
 Dcz : Altura do carrinho em relação ao finca-pé;
 Dly : Metade da maior distância entre as faces laterais do barco;
 Dpz : Altura da bola de proa em relação ao finca-pé;
 Dae : Alavanca externa do remo;
 Dai : Alavanca interna do remo;

1 Introdução

Como atividade utilitária, o remo já mostrava sua presença nas mais antigas civilizações da humanidade, se remetendo à Grécia e ao Egito antigos (DAL MONTE & KOMOR, 1989). Na antiguidade, o remo era utilizado prioritariamente como meio de transporte para facilitar a pesca e o comércio, para exploração de novas terras, assim como embarcação de guerra (OLIVEIRA, 2006 *apud* HAGERMAN, 2000).

O primeiro momento que o remo foi explorado como esporte foi na criação de novas disciplinas em universidades da Inglaterra, na transição entre os séculos XVIII e XIX. A partir de então o remo começou a ser praticado tanto como atividade lúdica quanto em campeonatos desportivos (STEINACKER & SECHER, 1993). No seguimento de sua evolução como esporte, desde a primeira edição dos Jogos Olímpicos em 1896, o remo foi introduzido como uma modalidade. Desde então, várias mudanças têm ocorrido com o objetivo de aprimorar o desempenho neste esporte (OLIVEIRA, 2006).

Na conformação atual, o remo olímpico consiste de uma embarcação de largura aproximadamente igual ao tamanho do quadril humano, com palamenta simples (remo unilateral) ou dupla (remo bilateral), onde o remador possui os pés fixos ao barco, através de um apoio (finca-pé), e seu quadril se movimenta numa única dimensão junto com um assento (carrinho) que desliza sobre um trilho preso ao chão do barco.

A remada, o movimento básico do remo, pode ser dividida em duas fases distintas: o *drive*, fase ativa ou fase de apoio, e o *recovery*, fase passiva ou fase sem apoio (DAL MONTE & KOMOR, 1989). Isso é consequência do remo ser um esporte cíclico, tendo na remada a tarefa de repetição básica para a atividade.

A harmonia do movimento entre os diversos segmentos do corpo do remador,

que numa análise simplificada são representados pelos membros inferiores, superiores e o tronco, são responsáveis pelo movimento angular cíclico dos remos. Durante o movimento do barco, o contato da pá dos remos com a água pode ser visto como um sistema físico que troca quantidade de movimento, ou seja, o impulso com o qual a quantidade de água que a pá do remo entra em contato é expelida, é o mesmo impulso com o qual o barco é propulsionado no sentido da proa (Figura 1).

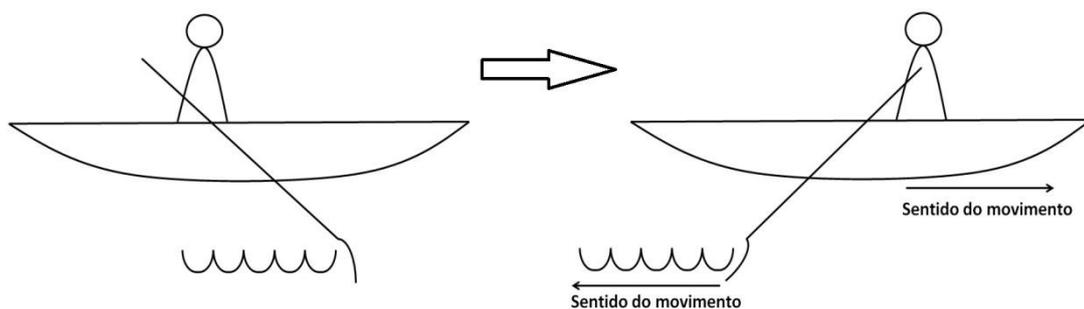


Figura 1: Transferência da quantidade de movimento entre a água e o barco durante uma remada.

Com o passar do tempo, o remo olímpico deixou de ser interesse apenas de treinadores e atletas, passando a ser investigado na área acadêmica através de pesquisas científicas. Uma série de estudos vem sendo feito com o objetivo de avaliar aspectos que possam influenciar o desempenho de remadores nas provas. A técnica de remada está intimamente ligada aos aspectos biomecânicos do movimento que o atleta faz. A melhora no desempenho desse esporte é oriunda de influências de fatores humanos como força, coordenação e técnica; e não humanos como clima, vento e barco (SCHWANITZ, 1991).

Dentre esses fatores, a técnica é pontuada como foco essencial da biomecânica, que através de modelagens de sistemas dinâmicos, é capaz de prever tipos de treinamento mais eficazes. Por meio da repetição exaustiva, tais treinamentos possuem

o potencial de fazer o remador realizar a remada de modo ao movimento ser efetuado tão próximo quanto possível do idealmente preconizado para otimizar a propulsão, sem efetuar deslocamentos desnecessários.

No remo, o barco é impulsionado através da água pela força dos músculos esqueléticos que cada remador transfere para a água fazendo uso dos remos, que são livres para executar movimentos angulares em torno de um eixo. Devido a essas características a biomecânica do remo pode ser modelada matematicamente (CAPLAN & GARDNER, 2007).

O primeiro modelo proposto para análise biomecânica do remo foi proposto por Alexander em 1925 e considerou o movimento numa única dimensão, com o remador sendo uma massa pontual, o remo perfeitamente rígido e a força de arrasto da água no casco do barco como sendo proporcional ao quadrado da sua velocidade. A resultante de forças no remo é perpendicular a este e sua magnitude é proporcional ao quadrado do produto entre a alavanca externa e a velocidade angular do remo. Para alimentar o modelo foram gerados padrões fictícios, mas plausíveis, de movimentos entre as pernas, as costas e as mãos do remador, assim como a velocidade angular dos remos para prever a velocidade do barco (CABRERA *et al.*, 2006 *apud* ALEXANDER, 1925).

Outros modelos baseados no modelo de Alexander foram posteriormente apresentados na literatura ao longo do tempo (POPE, 1973, SANDERSON & MARTINDALE, 1986, MILLWARD, 1987, VAN HOLST, 1996, BREARLEY & DE MESTRE, 1996, ATKINSON, 2001, SIMEONI *et al.*, 2002, CABRERA *et al.*, 2006).

Uma das últimas contribuições ao modelo inicial de Alexander foi apresentada recentemente (CABRERA *et al.*, 2006). Neste trabalho foi adotado um modelo unidimensional que faz uso de sinais de posição do carrinho e do tronco em relação ao barco, e para o cálculo do movimento do remador é estimada a posição do seu centro de

massa como aproximadamente localizado no umbigo. Os resultados reproduzem com precisão sinais de força na empunhadura e movimentos dos diversos segmentos que compõem o sistema barco-remador-remos.

1.1 Objetivo Geral

Em decorrência do acima exposto, o presente trabalho objetivou o desenvolvimento de um sistema de análise e simulação biomecânica do remo olímpico para embarcação *single skiff* que, ao invés de realizar uma modelagem individual para o barco e para o remador, modela o sistema como um todo. Na parte de simulação, almejou-se desenvolver um simulador gráfico 3D de remo que pudesse reproduzir o movimento dos principais segmentos do sistema barco-remador-remos.

1.2 Objetivos Específicos

- Estabelecimento de relações da biomecânica do remo que ofereçam subsídios para a análise dinâmica da remada;
- Construção de um simulador que contemplasse a modelagem biomecânica do remo e que a partir de sinais de força e de outras variáveis associadas à remada, pudesse estimar sinais de variáveis cinemáticas do barco, como velocidade e aceleração;
- Construção de um modelo de dinâmica inversa, que pudesse estimar forças aplicadas a partir de sinais de variáveis cinemáticas;
- Construção de simulador gráfico 3D baseado no modelo da cinemática do sistema barco-remador-remos, que pudesse ser usado em treinamentos para correção de aspectos da técnica de remada.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Conceitos Básicos Sobre os Aspectos da Remada e dos Seus sinais Associados

Em função de o remo ser um esporte cíclico que tem como unidade fundamental a sequência de movimentos denominada de remada, é possível encontrar traços nos sinais biomecânicos que se repetem ao longo do tempo (Figura 2). Como ponto de partida para analisarmos o ciclo da remada, podemos utilizar o *catch*, ou seja, o momento em que o remador se prepara para a imersão da pá do remo na água e começa a fazer força para dar início à fase de *drive*.

Em termos do sinal característico, podemos afirmar que para começar a aplicar impulsão no sistema, o remador paga o preço por passar pelo instante de maior desaceleração do barco, quando ocorre o pico negativo do sinal de aceleração (Figura 2 – primeira linha grossa vertical e contínua). Essa desaceleração ocorre em função da pá do remo, que entrou na água, ainda não ter chegado na mesma velocidade relativa entre o barco e a água (KLESHNEV, 2009). Nesse momento o ângulo horizontal possui valor máximo, assim como a aceleração relativa do carrinho, que indica que o remador está se acelerando em direção à proa para começar o *drive*. Isso, em contrapartida, faz a aceleração do barco ser mais negativa (Figura 3, transição entre os quadros 1 e 2). Dependendo do estilo do remador, a posição do carrinho é mínima neste instante, pois alguns fazem o *catch* já com o carrinho em movimento.

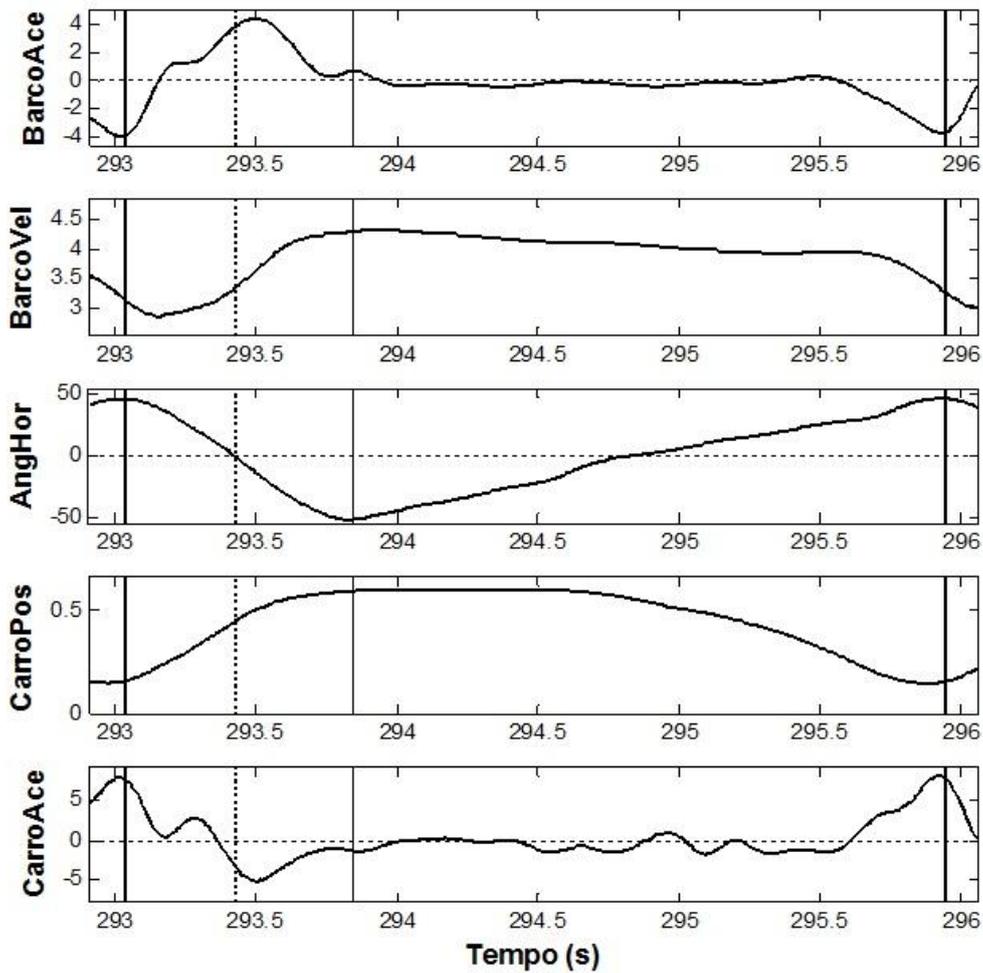


Figura 2: Sub-fases de um ciclo do remo de sinais coletados e seus derivados. De cima para baixo tem-se: a aceleração do barco (m/s^2), a velocidade do barco (m/s), o ângulo horizontal do lado bombordo (graus), a posição relativa do carrinho (m) e a aceleração relativa do carrinho (m/s^2), todos ao longo do tempo em segundos. As duas linhas verticais contínuas e mais densas cada uma próxima de uma extremidade de cada sinal representa respectivamente o início e o final do ciclo mostrado caracterizado pelo *catch*, a linha vertical tracejada indica o momento em que o ângulo horizontal é igual a zero e o remo está perpendicular ao barco e a linha vertical contínua indica o final do drive, ou seja, início da fase passiva.

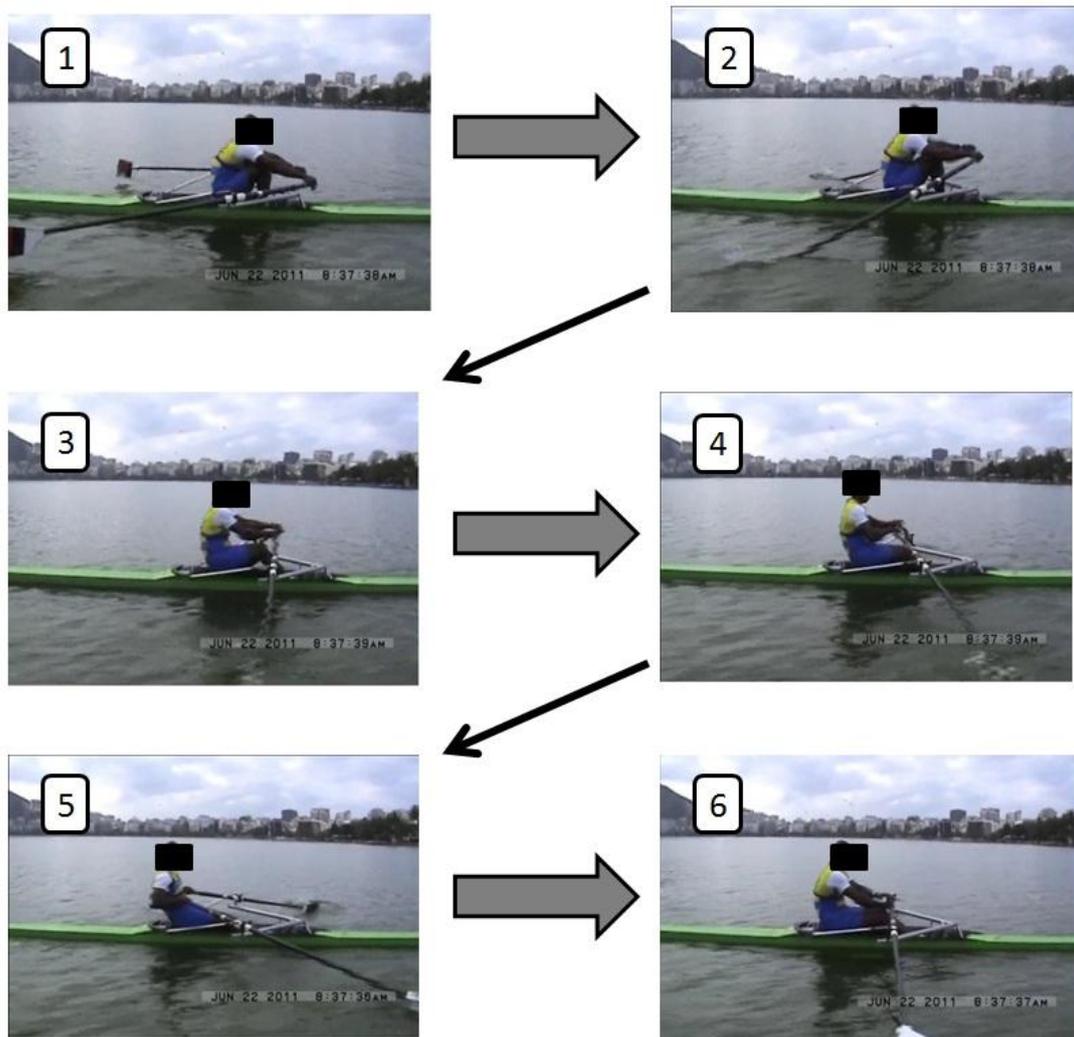


Figura 3: Subfases do ciclo de remada. Entre os quadros 1 e 2 há o *catch*. Entre os quadros 3 e 4 o remo passa pela posição perpendicular ao barco, entre os quadros 5 e 6 tem-se a finalização do *drive* com a volta da pá a proa (*recovery*). Os quadros 6 e 1 possuem ligação na preparação do novo *catch* do ciclo subsequente.

O próximo momento a ser destacado da remada se refere ao instante em que o remo está perpendicular ao barco, ângulo normalmente adotado como referência horizontal (Figura 3, quadros 3 e 4). Neste momento, numa remada típica, o remador consegue colocar maior propulsão ao barco (BAUDOIN & HAWKINS, 2002), pois não há componente da força de reação que a água faz na pá na direção transversal ao movimento do barco (instante marcado na Figura 2 por uma linha vertical e descontínua). Esse momento antecede o pico positivo de aceleração do barco e ocorre

quando o remador já está próximo a sua extensão total de membros inferiores, onde ele para e completa a remada com o tronco e os membros superiores (Figura 3, final da transição entre os quadros 3 e 4). Para acontecer essa parada a aceleração do carrinho começa a ficar negativa, como pode ser observado no quarto e quinto sinal da Figura 2.

A chamada fase ativa da remada acaba com o pico negativo do ângulo horizontal do remo (marcada na Figura 2 por uma linha fina vertical e contínua), que acontece simultaneamente com a mudança de sentido de sua velocidade (Figura 3, quadro 5), quando o remador se prepara para levar os remos novamente em direção à proa para uma nova remada (KLESHNEV, 2009). Nesse momento o carrinho alcançou sua posição máxima, ou seja, os membros inferiores estão completamente esticados e sua aceleração relativa permanece, durante um trecho, próxima a zero. Esse trecho corresponde ao momento em que o remador estica novamente os braços e flexiona o tronco à sua frente antes de movimento o carrinho para voltar à posição de *catch* (Figura 3, transição entre os quadros 5 e 6). Nesse instante a inclinação do sinal de velocidade muda drasticamente devido à diminuição da aceleração do barco (Figura 2, segundo sinal).

Durante o *recovery*, ou seja, a fase de recuperação, (Figura 3, transição entre os quadros 5 e 1, da remada subsequente) não há injeção de energia no sistema, pois esta é a fase sem apoio. Contudo, ainda assim, podemos ver traços nos sinais da cinemática do barco que dizem respeito aos deslocamentos de massas internos ao sistema. Numa remada tipicamente eficiente, é preconizado que o remador deixe o barco deslizar por baixo de si mesmo, pois movimentos bruscos do remador em relação ao barco causam maiores flutuações de velocidade, o que é contraproducente (HILL & FAHRIG, 2009).

Quando o remador está se aproximando do instante de efetuar mais um *catch*, é necessário que ele se freie em relação ao barco, o que, segundo o sistema de referência

estipulado, ocasiona o início de uma aceleração positiva para o carrinho e o início de uma aceleração negativa para o barco. Tal aceleração possui a sua maior amplitude no momento do novo *catch* para efetuar a próxima remada (marcado na Figura 2 pela segunda linha grossa vertical e contínua). Como esperado, isso acontece em sincronia com o máximo e o mínimo dos sinais de ângulo horizontal e posição relativa do carrinho, respectivamente.

Os sinais biomecânicos de remo registrados pelo sistema de aquisição desenvolvido no Laboratório de Instrumentação Biomédica mostraram-se semelhantes tanto na morfologia quanto nas amplitudes, aos sinais encontrados na literatura (SLIASAS & TULLIS, 2009, CABRERA *et al.*, 2006, FINDLAY & TURNOCK, 2009).

2.2 Uma Visão sobre Simuladores Biomecânicos da Remada

Os modelos biomecânicos do remo possuem utilidade na predição do desempenho, dado um determinado estilo de remada. Exemplo disso são os estilos de remada *stroke* e *bow*. Ambos são classificados em função da morfologia da curva de força desenvolvida na empunhadura. Enquanto o primeiro chega ao pico de força na primeira metade do *drive*, no segundo, o pico ocorre na segunda metade (BAPTISTA *et al.*, 2008). Além desse exemplo, devido à complexidade do ato da remada, é possível fazer distinção das remadas de outras maneiras.

Esses estilos podem ser discriminados com uma simples análise visual do remador. Para isso, comumente é utilizada a técnica de filmagem durante os treinos de remo, o que, normalmente, só permite uma análise posterior do atleta filmado. Na prática o técnico possui um grupo demasiadamente grande de remadores, tornando difíceis análises individuais. A técnica de cinemetria pode ser usada para quantificar movimentos desportivos por meio de certos procedimentos e o uso de filmagens

realizadas por câmeras de vídeo especiais, permitindo ainda a reconstrução tridimensional desses movimentos (AMADIO & SERRÃO, 2007), contudo, esta técnica apresenta custos elevados. Apesar de sistemas de realimentação sobre a técnica de remada serem amplamente documentados na literatura (PAGE & HALKINS, 2003, HAWKINS, 2000), tais técnicas se limitam a análises somente no remo-ergômetro, pois são de difícil aplicação dentro d'água em condições reais da prática do remo olímpico.

Um simulador da dinâmica que ilustra com detalhes uma modelagem típica feita para a biomecânica do remo foi realizado em 2006 por Cabrera e cols (Figura 4). Nesse trabalho foi realizado a modelagem das posições do centro de massa do remador, do barco e dos remos. Através de considerações puramente unidimensionais, era estimado o perfil de velocidade do barco por meio da força longitudinal que o remador faz nas empunhaduras dos remos ($F_{mãox}$), a força longitudinal que os pés do remador realiza no finca-pé ($F_{péx}$) e a força de arrasto da água no casco do barco (F_{Barco}). Por meio da lei fundamental da dinâmica, essas três forças eram utilizadas para estimação das velocidades.

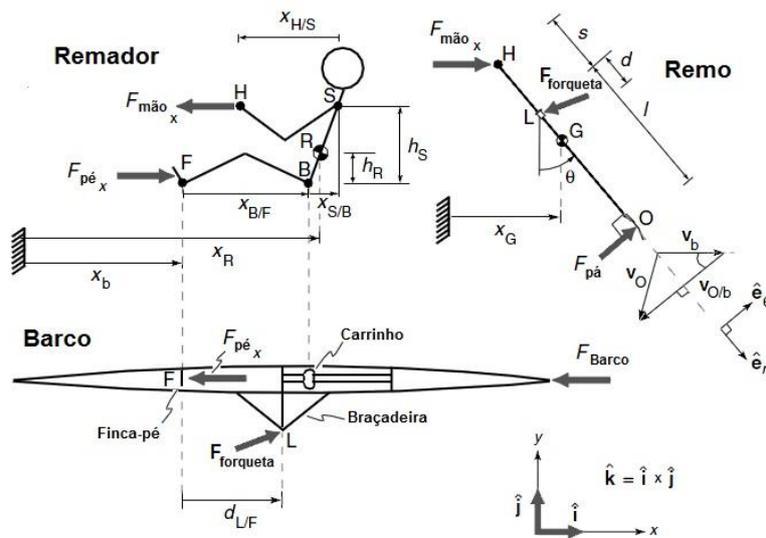


Figura 4: Exemplo de diagrama de referências e forças atuantes no sistema (adaptado de CABRERA *et al.*, 2006).

Um modelo semelhante construído por Findlay e Turnock (2009) que também fazia uso da lei fundamental, se diferenciava por no lugar de considerar o centro de massa do remador, dividiu este em suas partes com respectivas massas e seu equacionamento da dinâmica foi segmentado nessas diversas massas (Tabela 1).

Tabela 1: Relação da massa das partes do remador (Extraído de FINDLAY & TURNOCK, 2009)

Parte	Representação em massa
$m_{\text{pé}}$	$0,0145m_{\text{remador}}$
m_{perna}	$0,093m_{\text{remador}}$
m_{coxa}	$0,2m_{\text{remador}} + m_{\text{carrinho}}$
m_{tronco}	$0,578m_{\text{remador}}$
$m_{\text{braço}}$	$0,056m_{\text{remador}}$
$m_{\text{ante-braço}}$	$0,044m_{\text{remador}}$
$m_{\text{cabeça}}$	$0,0145m_{\text{remador}}$

Investiu-se em modelagem dinâmica em remo-ergômetro com o intuito de analisar as diferenças existentes com a regata propriamente dita (RITCHIE, 2008). No remo ergômetro a força é aplicada contra uma resistência organizada em hélice que desloca ar. A resistência da fase ativa é justamente modelada por o quanto esse deslocamento de ar pela hélice é facilitado ou não e a direção da força aplicada muda dependendo da parte da fase ativa em que o remador se encontra (Figura 5). O trabalho concluiu que apesar do remo-ergômetro ser uma boa ferramenta de treino, não simula com exatidão o movimento da remada, sobretudo durante a fase passiva, de modo que possui pouca serventia para treinar técnica.

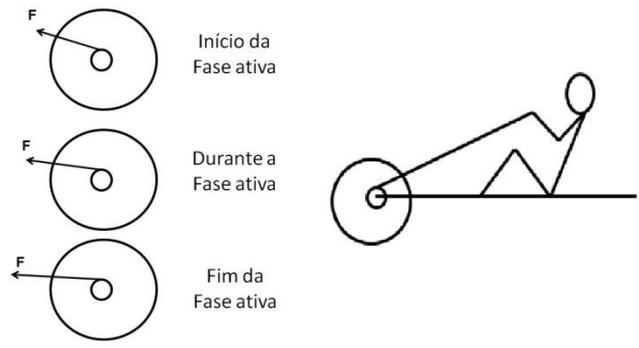


Figura 5: Direção da força aplicada pela empunhadura do remo-ergômetros em diferentes partes da fase ativa (baseado em RITCHIE, 2008).

3 Materiais e Métodos

O sistema de simulação e análise desenvolvido foi idealizado para receber como entradas sinais biomecânicos adquiridos em *in situ* durante uma regata. Um sistema de aquisição para estes sinais está sendo desenvolvido no âmbito da dissertação de mestrado da aluna Ana Carolina S. Borges (BORGES *et al.*, 2011) e se encontra descrito de forma sucinta no Apêndice B, para que se possa ter ideia dos sinais disponíveis até o momento para os simuladores do presente trabalho.

O sistema de simulação foi desenvolvido em linguagem MatLab 7 (*MathWork*, EUA). A modelagem foi feita para um barco *single skiff* de palamenta dupla. O movimento do casco do barco foi considerado unidimensional na direção e sentido do deslocamento do barco, tendo as flutuações laterolaterais e verticais desprezadas para efeito de cálculos. O remo foi considerado uma barra rígida e inflexível. Os sinais utilizados como entrada para o simulador foram adquiridos durante treinos de remadores de elite do Brasil de nível nacional e internacional, cujo centro de treinamento é o Clube de Regatas Flamengo.

Toda a parte experimental do atual trabalho foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho, sob o número de protocolo 152/10, sob o título de “Análise de métodos objetivos para melhora do desempenho de atletas de remo”.

3.1 A Dinâmica do Remo

A modelagem dinâmica foi projetada de modo a fazer o simulador funcionar de dois modos (Figura 6). No modo de *dinâmica direta*, o equacionamento contempla a estimativa de sinais cinemáticos, como velocidade e aceleração do barco, a partir de sinais de força na empunhadura e de outros sinais da movimentação do remador e

relação do barco (NUNES *et al.*, 2011). Já no modo chamado de *dinâmica inversa*, são fornecidas estimativas dos sinais da força desenvolvida na empunhadura a partir de informações dos sinais cinemáticos. Os cálculos são provenientes de um mesmo equacionamento geral e o que determina se o sistema de simulação funciona no modo de dinâmica direta ou inversa é o que se tem como variáveis de entrada e saída.

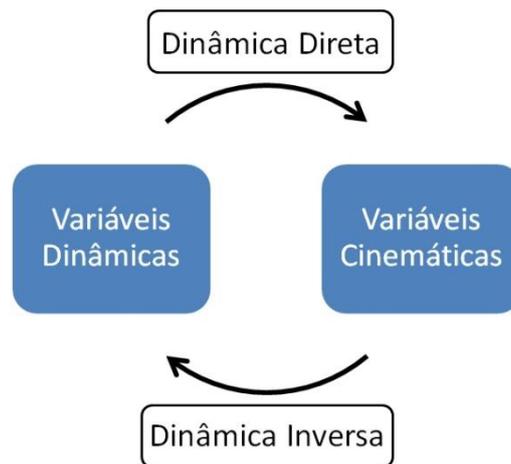


Figura 6: Organograma dos dois modos de se usar o simulador da dinâmica do remo. Pela *Dinâmica Direta* o simulador possui variáveis dinâmicas como entrada e variáveis cinemáticas como saída. Por outro lado, pela *Dinâmica Inversa* tem-se o oposto.

A modelagem foi baseada na Lei Fundamental da Dinâmica ou 2ª Lei de Newton:

$$\sum \mathbf{F}_{ext} \equiv \frac{d}{dt} (m_s \cdot \mathbf{v}_s) = m_s \cdot \mathbf{a}_s \quad (I)$$

onde:

\mathbf{F}_{ext} é o vetor força externa;

m_s é a massa do sistema;

\mathbf{a}_s é o vetor aceleração do sistema.

O raciocínio para o equacionamento de toda a dinâmica do simulador seguiu um

modelo reducionista que prevê essencialmente três forças externas atuantes no sistema: as forças de reação que a água faz em cada uma das pás devido ao movimento do remo ($F_{pá1}$ e $F_{pá2}$) e a força de arrasto no casco do barco devido à viscosidade da água ($F_{água}$). Como a bola de proa é a referência para o início e o final de uma prova de 2000 metros (a prova acaba exatamente quando a bola de proa cruzar a linha de chegada), ela será usada para identificar o vetor deslocamento do barco (Figura 7).

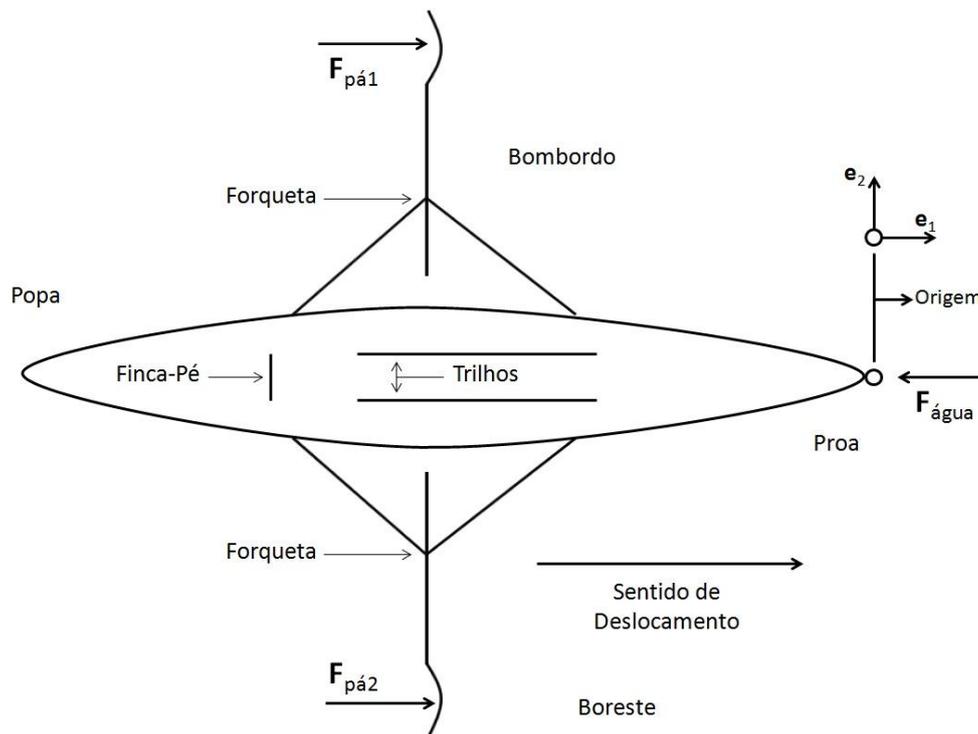


Figura 7: Diagrama de corpo livre do barco com representação das forças externas atuantes neste. $F_{pá1}$ é a força de arrasto da água na pá do remo a bombordo, $F_{pá2}$ é a força de arrasto da água na pá do remo a boreste e $F_{água}$ é a força de arrasto que a água faz no casco do barco. As grandezas vetoriais e_1 e e_2 representam, respectivamente, os vetores unitários ao longo do eixo X (longitudinal ao sentido de deslocamento) e Y (transversal ao sentido de deslocamento e paralelo a superfície da água).

Em função de se desprezar as flutuações que acontecem fora do eixo de movimento do barco, uma consequência direta é que deve-se considerar uma perfeita sincronia no movimento angular dos remos em torno da forqueta. Ou seja, a força resultante ao longo de qualquer eixo perpendicular à direção em que o sistema se

locomove será considerada nula. Logo, em todos os momentos, a magnitude da força que a água faz numa pá deve ser a mesma que a água faz na outra em todos os momentos ($|\mathbf{F}_{pá1}| = |\mathbf{F}_{pá2}|$).

Logo, podemos reescrever a (I) da seguinte forma:

$$2 \cdot \mathbf{F}_{pá} + \mathbf{F}_{água} = m_s \cdot \mathbf{a}_s \quad (\text{II})$$

onde:

$\mathbf{F}_{água}$ é o vetor força de arrasto que a água faz no casco do barco;

$\mathbf{F}_{pá}$ é um vetor tal que, $|\mathbf{F}_{pá}| = |\mathbf{F}_{pá1}| = |\mathbf{F}_{pá2}|$, sua direção é sempre perpendicular ao remo e seu ponto de aplicação é a parte côncava do centro geométrico da pá.

Dessa forma, o equacionamento da dinâmica visa essencialmente modelar as três grandezas vetoriais que compõem a equação (II), a força de reação que a água faz na pá ($\mathbf{F}_{pá}$) e no casco do barco ($\mathbf{F}_{água}$) e a aceleração do sistema (\mathbf{a}_s).

Durante uma remada em que o sistema já se encontra na velocidade de cruzeiro, ou seja, após haver passado o transiente da largada, o centro de massa do sistema permanece aproximadamente em movimento retilíneo uniforme (MRU), uma vez que, em média, a força de arrasto da água no casco se equipara à força de propulsão que o remador impõe nos remos. Contudo, existe um deslocamento relativo entre as massas internas do sistema, o que faz com que este oscile em torno da velocidade média. Para o equacionamento desses componentes, será considerado que o sistema é composto por basicamente três blocos distintos. O primeiro conterà a massa do barco; o segundo conterà metade da massa do remador e se movimentará síncrono com o carrinho; e o terceiro terá a outra metade da massa do remador e se movimentará de acordo com o tronco do remador (Figura 8).

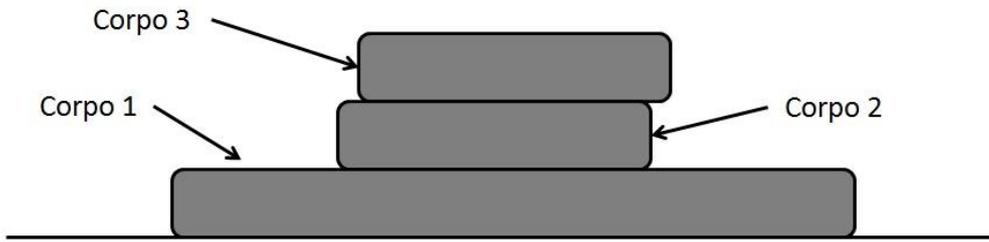


Figura 8: Diagrama ilustrativo da simplificação do modelo reducionista que é usado para fazer o equacionamento. O sistema é constituído por três corpos rígidos que descrevem um movimento unidimensional ao longo eixo X. O corpo 1 representa o barco, o corpo 2 representa a parte inferior do corpo do remador e o corpo 3 representa a parte superior do corpo do remador. Cada uma das partes do remador é considerada possuindo metade da massa do remador.

Sendo assim, o vetor deslocamento do centro de massa do sistema (\mathbf{X}_s) pode ser calculado pela média ponderada das massas que compõem o sistema.

$$\mathbf{X}_s = \left(\frac{1}{m_s}\right) \left[\frac{m_r}{2} \cdot (\mathbf{X}_c + \mathbf{X}_t) + m_b \cdot \mathbf{X}_b \right] \quad (\text{III})$$

onde:

m_b é a massa do barco;

m_r é a massa do remador;

\mathbf{X}_c é o vetor deslocamento do carrinho;

\mathbf{X}_t é o vetor deslocamento do tronco do remador;

\mathbf{X}_b é o vetor deslocamento do barco.

A partir daí, podemos obter através da derivada segunda temporal, a relação entre as acelerações existentes no sistema:

$$\mathbf{a}_s = \left(\frac{1}{m_s}\right) \left[\frac{m_r}{2} \cdot (\mathbf{a}_c + \mathbf{a}_t) + m_b \cdot \mathbf{a}_b \right] \quad (\text{IV})$$

onde:

\mathbf{a}_s é o vetor aceleração do sistema;

\mathbf{a}_c é o vetor aceleração do carrinho;

\mathbf{a}_t é o vetor aceleração do tronco do remador;

\mathbf{a}_b é o vetor aceleração do barco.

Por mais que a referência no barco tenha sido a bola de proa, e certamente esta não é o centro de massa do sistema, como o equacionamento da dinâmica levará em consideração somente a relação das acelerações, a constante que seria somada ao vetor deslocamento para se chegar ao centro de massa de cada corpo seria anulada pelo operador derivada. Logo, isso não fará diferença no cálculo das acelerações. O mesmo acontece em relação aos sinais de carrinho e tronco, que possuem a referência dentro do barco fora da bola de proa. Para equacionar os corpos 2 e 3 são necessários alguns parâmetros do sistema (Figura 9) que levam a um eixo de referência O' (Figura 10). Em função do fato de considerarmos o movimento somente na direção e sentido de \mathbf{e}_1 , isso não será explicitado nas equações.

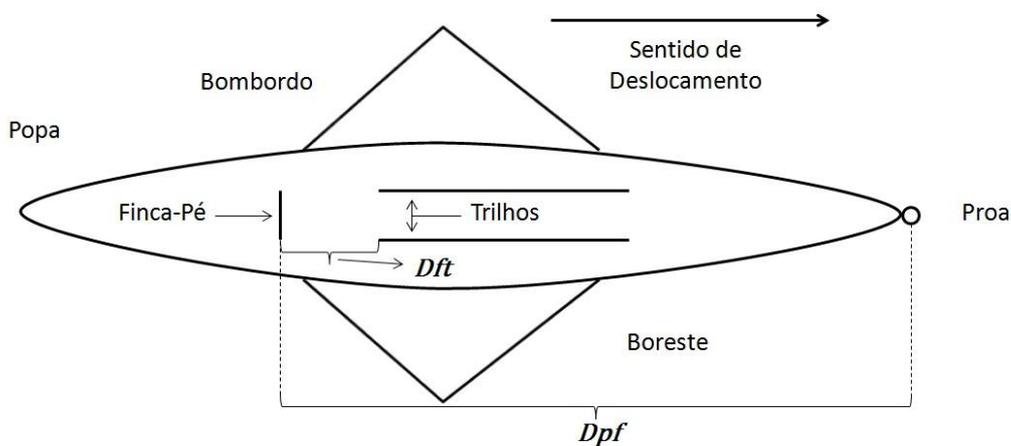


Figura 9: Sistema de referências para o equacionamento dos componentes do sistema. A bola de proa representa a origem do sistema de coordenadas que compõe o plano da superfície da água. Dpf

é a distância entre a bola de proa e o finca-pé e Dft é a distância entre o finca-pé e o começo dos trilhos.

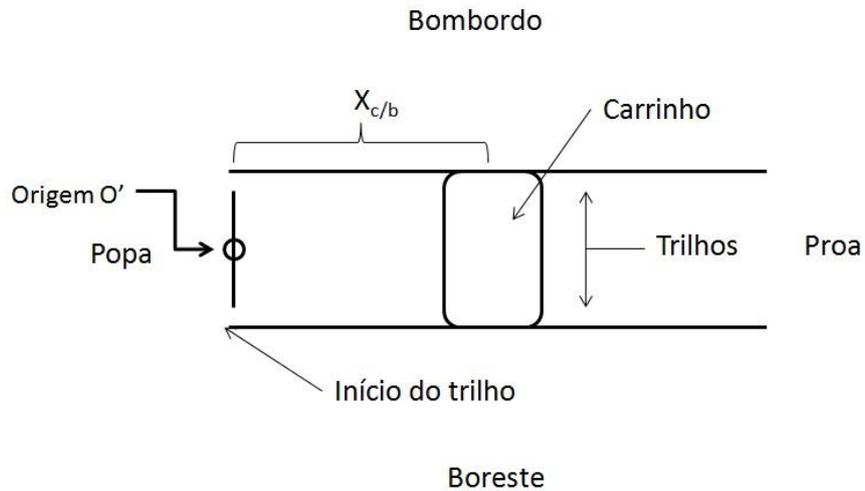


Figura 10: Sistema de referência para o deslocamento do carrinho. $X_{c/b}$ é o vetor posição do carrinho em relação à origem O' , que será considerada o vetor posição do carrinho em relação ao barco.

O vetor deslocamento do carrinho pode ser obtido através da seguinte relação:

$$X_c = X_b - Dpf + Dft + X_{c/b} \quad (V)$$

Por consequência, fazendo a derivada segunda em relação ao tempo, a aceleração do carrinho (a_c) será dada pela seguinte relação:

$$a_c = a_{c/b} + a_b \quad (VI)$$

A posição do tronco do remador tem como referência a mesma origem O' da posição do carrinho e no início da fase ativa a coluna faz um movimento de flexão (aproximação do tronco aos membros inferiores), sendo este deslocamento considerado negativo (Figura 11). Sua amplitude sempre será maior que a amplitude do carrinho em função do arco que o tronco faz em relação ao quadril.

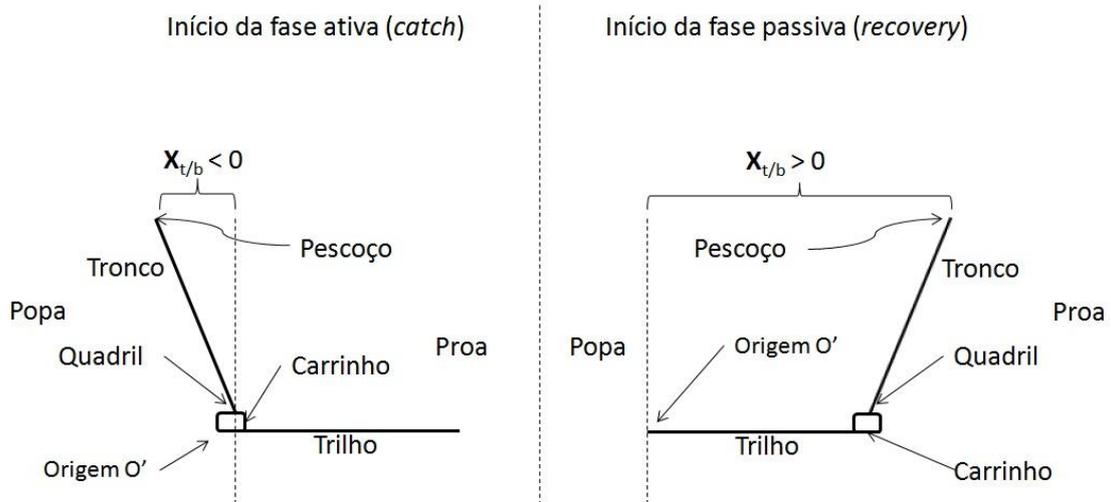


Figura 11: Diagrama de corpo livre do tronco do remador indicando a posição do tronco deste em dois momentos distintos, início da fase ativa (a esquerda) e início da fase passiva (a direita). O sinal de posição do tronco do remador em relação ao barco será o mesmo em relação a origem O' que corresponde a parte do trilho mais perto da popa.

Podemos, então, calcular o vetor deslocamento do carrinho através da seguinte relação:

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{X}_b - Dpf + Dft + \mathbf{X}_{t/b} \quad (\text{VII})$$

Logo, fazendo uso da derivada segunda, a aceleração do tronco do remador (\mathbf{a}) pode ser dada pela seguinte relação:

$$\mathbf{a}_t = \mathbf{a}_{t/b} + \mathbf{a}_b \quad (\text{VIII})$$

Assim, podemos reescrever (IV) da seguinte forma:

$$\mathbf{a}_s = \left(\frac{1}{m_s} \right) \left[\frac{m_r}{2} \cdot (\mathbf{a}_{c/b} + \mathbf{a}_{t/b} + 2\mathbf{a}_b) + m_b \cdot \mathbf{a}_b \right] \quad (\text{IX})$$

Remanejando os termos, temos:

$$\mathbf{a}_s = \left(\frac{1}{m_s}\right) \left[\frac{m_r}{2} (\mathbf{a}_{c/b} + \mathbf{a}_{t/b}) + m_s \cdot \mathbf{a}_b\right] \quad (\text{X})$$

O lado esquerdo da (II) requer ainda que seja determinada a força de arrasto da água no casco do barco.

O módulo da força de arrasto (A) de um fluido estacionário num objeto se movimentando a velocidade constante é tipicamente escrito como função da densidade do fluido (ρ), geometria da área de contato (G) e a velocidade do objeto (V_b), tal como, por exemplo, $A = (1/2) \rho C G V_b^2$, onde C é uma grandeza adimensional que depende do número de Reynolds (R_e) e da geometria do objeto (HOERNER, 1965). Considerando-se constante a densidade do fluido e a geometria do objeto, a força de arrasto que a água aplica no casco do barco ($F_{\text{água}}$) pode ser modelada como:

$$\mathbf{F}_{\text{água}} = -K \cdot \mathbf{V}_b^2 \quad (\text{XI})$$

onde $K = (1/2) \rho C G$, é denominado coeficiente de arrasto do barco.

As flutuações da velocidade do barco durante uma remada são tipicamente da ordem de $\pm 25\%$ da sua velocidade média. Dessa forma, o número de Reynolds, o qual é diretamente proporcional à velocidade, pode ser considerado constante ao longo da remada (CABRERA *et al*, 2006), resultando na consideração de que o coeficiente de arrasto também pode ser considerado constante.

No intuito de se usar um valor apropriado para a Lagoa Rodrigo de Freitas e para o barco considerado na simulação realizou-se um experimento para a determinação do valor do coeficiente de arrasto. A descrição completa deste experimento se encontra no Apêndice C, sendo o coeficiente K estimado em 5,2 kg/m.

Na determinação da força na pá ($F_{pá}$), considerou-se que o remo possui basicamente 3 forças externas atuantes nele (Figura 12) e durante a remada ele funciona como uma aproximação de uma alavanca inter-resistente, tendo o ponto de apoio na pá e o ponto de potência na empunhadura.

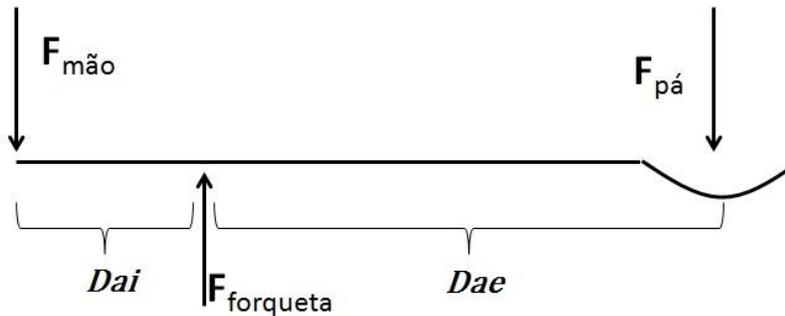


Figura 12: Diagrama de corpo livre do remo com as forças atuantes neste e identificação dos segmentos. As forças externas atuantes no remo são a força que a mão do remador aplica na empunhadura ($F_{mão}$), a força que a água aplica na pá ($F_{pá}$) e a força que a forqueta aplica na divisa entre a alavanca interna e externa ($F_{forqueta}$). A alavanca interna (Dai) é o comprimento entre a empunhadura e a forqueta e a alavanca externa (Dae) é o comprimento da forqueta ao centro geométrico da pá.

O movimento do remo, tendo a forqueta como eixo para seu movimento angular, pode ser considerado como permanentemente em equilíbrio dinâmico (HOFMIJSTER *et al.*, 2007). Logo, o somatório de momentos de força aplicados no remo é nulo. Foram estipulados como positivos os momentos de força no sentido trigonométrico. Assim, podemos estabelecer a seguinte relação:

$$\sum M_o = F_{mão} \cdot Dai - F_{pá} \cdot Dae = 0 \quad (XII)$$

onde:

M_o é o momento de força atuante no remo;

Dai é a alavanca interna;

Dae é a alavanca externa.

O remo foi considerado inflexível com base em resultados reportados na literatura, onde não foi observada diferença significativa para efeitos de cálculo entre uma modelagem com remo flexível ou inflexível (CABRERA *et al*, 2006).

A partir de (XII) pode-se assumir que:

$$Dae \cdot \mathbf{F}_{pá} = Dai \cdot \mathbf{F}_{mão} \quad (\text{XIII})$$

3.1.1 A Dinâmica Direta

Até a equação (XIII) foram mostradas as relações necessárias para a análise dinâmica do simulador. Substituindo (X), (XI) e (XIII) em (II), pode-se chegar a uma equação diferencial de primeira ordem não linear e não homogênea em \mathbf{V}_b (equação XIV), a qual permite estimativas de sinais de cinemáticas a partir de sinais relacionados ao padrão de remada do remador ($\mathbf{F}_{mão}$ e $\mathbf{a}_{c/b}$). Tradicionalmente um problema de dinâmica envolve estimativas de variáveis cinemáticas de um sistema, como, por exemplo, velocidades e acelerações, a partir das forças aplicadas ao sistema. Por esta razão, a equação (XIV) é considerada como sendo pertencente à *dinâmica direta*.

$$\frac{d\mathbf{V}_b}{dt} + \frac{K}{m_s} \cdot \mathbf{V}_b^2 = \left(\frac{1}{m_s}\right) \left[2 \cdot \frac{Dai}{Dae} \cdot \mathbf{F}_{mão} - \frac{m_r}{2} (\mathbf{a}_{c/b} + \mathbf{a}_{t/b}) \right] \quad (\text{XIV})$$

Uma vez que o sistema de aquisição de sinais disponível ainda não fornece sinais de força da empunhadura, a avaliação do sistema de simulação de dinâmica direta foi realizada usando-se como entrada um sinal de força na empunhadura ($\mathbf{F}_{mão}$) obtido através de digitalização manual de exemplos do sinal oriundos da literatura numa

amostragem de 25 Hz (HILL & FAHRIG, 2009), sendo posteriormente reamostrado a 100 Hz para efeito de cálculos. A reamostragem foi realizada por meio de interpolação por *spline* cúbica que considerou uma minimização do erro entre a curva original e a curva polinomial fazendo uso do Método dos Mínimos Quadrados.

Para que a entrada representasse a componente da força longitudinal ao movimento, foi também digitalizado o ângulo horizontal do remo (HILL & FAHRIG, 2009) de modo que as amplitudes de força fossem corrigidas pelo cosseno do ângulo horizontal.

A Figura 13 (gráfico superior) mostra o sinal de força retirado da literatura (HILL & FAHRIG, 2009) e usado na simulação. O impulso de cada ciclo do perfil de força foi de 226 N.s, com um pico de força de 483 N. A simulação foi realizada a partir da concatenação de diversos ciclos como os mostrados nesse exemplo.

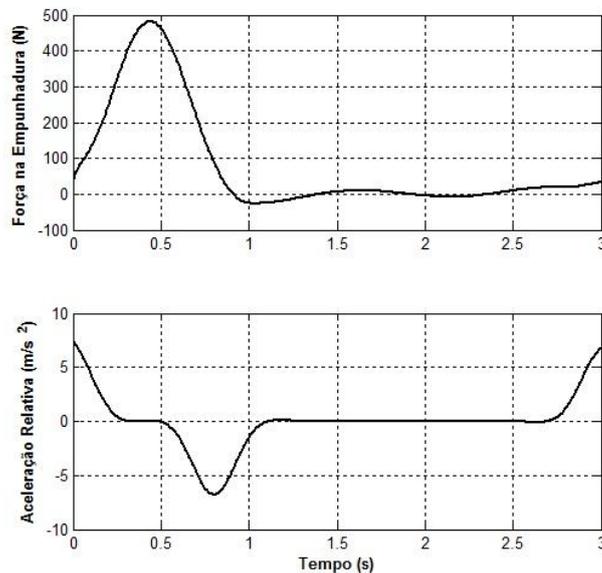


Figura 13: Sinais de entrada do simulador no modo *dinâmica direta*. O gráfico superior representa a força longitudinal desenvolvida na empunhadura em Newtons, digitalizada manualmente da literatura (HILL & FAHRIG, 2009). O gráfico inferior representa a modelagem, baseada em curvas gaussianas, para geração da aceleração dos segmentos do remador (membros inferiores e tronco) em relação ao barco.

Para um melhor controle de sincronismos entre os sinais, os sinais de aceleração relativa do carrinho ($\mathbf{a}_{c/b}$) e do tronco do remador ($\mathbf{a}_{t/b}$) foram aproximados por curvas gaussianas em função da semelhança observada com os sinais reais coletados (Figura 13 - gráfico inferior).

A simulação utilizou valores típicos para as massas envolvidas do sistema, assim como para as alavancas do remo (Tabela 2), sendo realizada para uma voga 20. Os resultados dos sinais cinemáticos de aceleração e velocidade do barco foram comparados com sinais reais de cinemática adquiridos pelo sistema de aquisição de sinais de remo.

Tabela 2: Parâmetros usados no simulador no modo: *dinâmica direta*.

Parâmetros	Valor
Massa do Remador	75
Massa do Barco	20
Const. de Arrasto	5,2
Alavanca Interna	0,9
Alavanca Externa	2,0

As massas estão em kg, o coeficiente de arrasto em kg/m e as alavancas do remo em m. Na massa do barco está inclusa a massa correspondente aos dois remos.

3.1.2 A Dinâmica Inversa

Fazendo uso das mesmas equações (X), (XI) e (XIII) na (II), e isolando o vetor $\mathbf{F}_{m\grave{a}o}$, pode-se chegar à equação que caracteriza a chamada *dinâmica inversa* do simulador, cuja conformação é capaz de estimar o perfil de força longitudinal que o remador desenvolveu na empunhadura a partir dos sinais do movimento do barco e do movimento relativo do remador (equação XV).

$$\mathbf{F}_{m\grave{a}o} = \frac{Dae}{2Dai} \left[m_s \cdot \mathbf{a}_b + K \cdot \mathbf{V}_b^2 + \frac{m_r}{2} (\mathbf{a}_{c/b} + \mathbf{a}_{t/b}) \right] \quad (XV)$$

Os parâmetros fixos da equação (XV), como as alavancas interna e externa dos remos e as massas dos componentes do sistema foram registrados no ato da coleta na *Ficha de Aquisição de Dados* mostrada no Apêndice D.

Na equação (XV) aparece esse fator 2 dividindo o membro da direita, uma vez que o resto do membro da direita é a força total imposta nas duas empunhaduras. Logo, pela consideração de perfeita sincronia entre os lados do sistema, a divisão do montante total da força por 2, fornece uma estimativa da força de cada mão do remador.

Para a simulação no modo de dinâmica inversa foram utilizados como entradas sinais de cinemática adquiridos durante os treinos de cinco remadores do Clube de Regatas Flamengo (4 homens e 1 mulher), a vogas baixa (aproximadamente 20 remadas por minuto), média (aproximadamente 24 remadas por minuto) e alta (de aproximadamente 28 remadas por minuto para cima). Todas as regatas foram realizadas na Lagoa Rodrigo de Freitas – Rio de Janeiro – RJ, na sede do clube.

3.1.2.1 Método Alternativo de Detecção de Fases do Ciclo

Tradicionalmente, as fases do ciclo são identificadas através dos sinais de ângulo horizontal dos remos. No entanto, goniômetros potenciométricos não possuem uma vida útil longa em atividades desgastantes como a do remo. Deste modo, torna-se interessante o desenvolvimento de métodos que possam estimar os instantes em que começava a fase ativa e a fase passiva por meio de sinais de aceleração e velocidade do barco.

Os instantes de tempo que definem as fronteiras entre as fases ativa e passiva são aqueles em que a velocidade angular do remo cruza o zero (KLESHNEV, 2009). Contudo, uma vez que o sinal de velocidade angular é obtido pela derivada temporal do sinal angular do remo, ruídos neste sinal causam incertezas na detecção da passagem

por zero do sinal de velocidade (Figura 14 – gráfico inferior). Apesar da definição a partir do sinal de velocidade, as fronteiras também podem ser detectadas pelos picos positivo e negativo do sinal do ângulo horizontal, pois correspondem aos instantes de velocidade nula. Neste sentido, convencionou-se que o ângulo máximo de cada ciclo da remada seria o usado para marcar o *catch* e o ângulo mínimo seria para marcar o *release* (Figura 14 – gráfico superior).

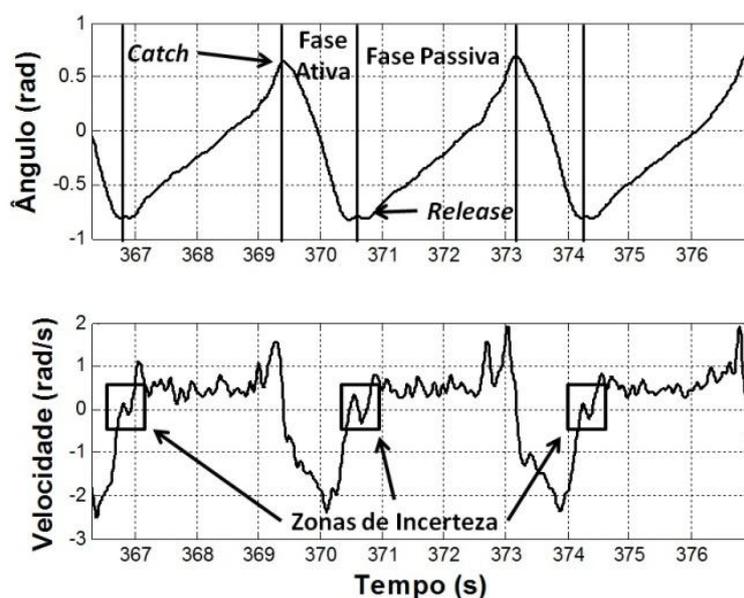


Figura 14: O gráfico superior representa o sinal de ângulo do remo em radianos. As linhas verticais demarcam os trechos correspondentes às fases. O gráfico inferior representa a primeira derivada temporal do sinal de ângulo do remo com as zonas de incerteza no início da fase passiva.

Alternativamente foi proposto um método para estimar os referidos instantes de mudança de fase usando-se sinais de aceleração e velocidade do barco. Neste método, o início de fase ativa foi determinado pelo pico negativo de aceleração do barco a cada ciclo; enquanto o início da fase passiva foi estimado através do ponto de máximo do sinal de velocidade do barco (Figura 15). O método de estimação foi baseado em duas hipóteses ou observações. A primeira diz respeito ao fato do *catch* representar o momento de maior desaceleração do barco, ou seja, o momento que o sistema entra em

contato com o meio externo. A segunda hipótese está relacionada ao fato de que no momento em que o remador para de injetar energia no sistema, a aceleração cruza o zero, fazendo com que haja um ponto de máximo no sinal da velocidade.

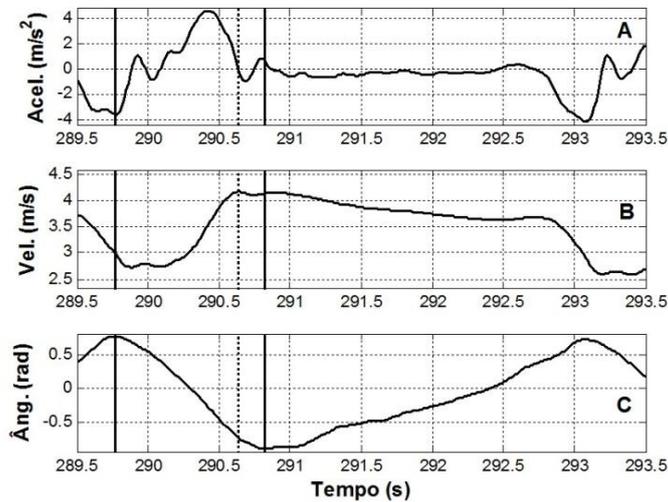


Figura 15: Os gráficos A e B representam, respectivamente, a aceleração e a velocidade do barco, e C representa o ângulo horizontal do remo. As linhas verticais contínuas representam detecções de fases por meio do ângulo e as linhas descontinúas, detecções usando os sinais cinemáticos. Deve ser mencionado que na fase ativa do ciclo de remada as linhas descontinua e contínua se sobrepõem.

Para comparar o método alternativo com aquele que faz uso dos sinais de goniometria (considerado como padrão) foram realizadas coletas de sinais de 5 regatas, envolvendo a aquisição do ângulo horizontal dos dois remos, bem como a aceleração do barco e o sinal de GPS para a estimação da velocidade. Para avaliar a precisão do método alternativo, foi calculado a média e o desvio-padrão dos erros temporais da detecção do método com sinais da cinemática do barco em relação ao método realizado com os sinais de ângulo horizontal.

3.1.2.2 A Concordância da Força Estimada

Apesar do sistema atual de aquisição de sinais de remo ainda não prover um sinal de força na empunhadura para comparação com a curva estimada pela dinâmica

inversa, foi criada uma medida objetiva para mensurar o quanto o formato da curva de força estimada se aproxima de um perfil tradicional, a qual apresenta um formato de sino (BAPTISTA *et al.*, 2008).

Para tal, foi medida a concordância entre o perfil de força estimada e uma curva polinomial de segundo grau. Tendo feito a detecção de fases pelo sinal da cinemática do barco, a cada ciclo de força estimada na empunhadura foi gerada uma curva polinomial de segundo grau para a parte correspondente a fase ativa e uma matriz de zeros para a parte correspondente a fase passiva. O contorno para a geração da curva polinomial foi basicamente ter a primeira raiz no início da fase ativa do ciclo e a segunda raiz no final desta (ou seja, início da fase passiva do mesmo ciclo) sendo que seu pico seria de mesmo valor que o pico da estimacão de força. O índice mediu o quanto a curva de força estimada se ajustava na curva polinomial. A Figura 16 mostra um exemplo do sinal estimado desenhado junto com a curva polinomial gerada a partir do sinal estimado.

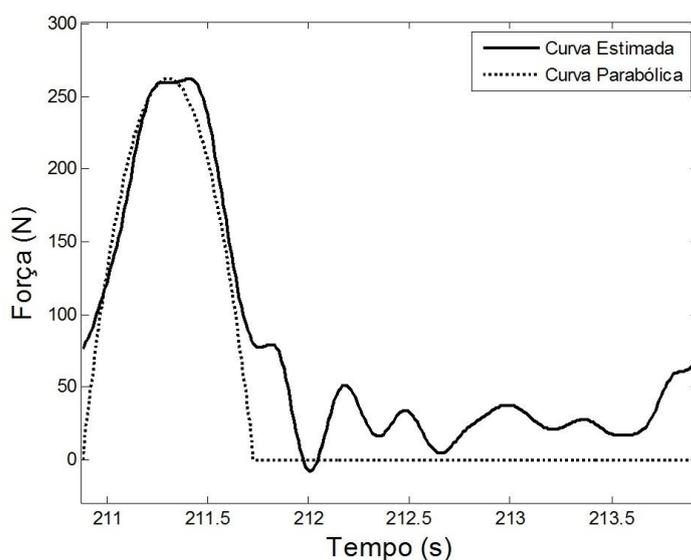


Figura 16: Sinal de força estimado junto com curva parabólica ajustada.

Além disso, uma estimativa de impulso de força foi calculada através da integral

numérica do sinal estimado de força com respeito ao tempo, no trecho pertinente à fase ativa, comparando-a com dados da literatura. Do mesmo modo, os picos de força estimados de cada ciclo foram confrontados com dados de trabalhos pertinentes.

3.2 Simulação Cinemática em Gráfico 3D

O sistema de simulação proposto possui uma parte voltada para a criação de uma análise gráfica do remo fazendo uso de sinais biomecânicos. Todo o equacionamento da modelagem gráfica teve como base as relações da Geometria Euclidiana. As equações serão mostradas segundo o modelo a seguir: $\mathbf{R}_{ponto} = (X_R, Y_R, Z_R)$, onde \mathbf{R}_{ponto} é o vetor posição do ponto citado, X_R , Y_R e Z_R são as coordenadas do ponto \mathbf{R} nos eixos X, Y e Z, respectivamente. Quando houver o símbolo \pm antes da coordenada no eixo Y, isto significa que esse ponto possui simetria bilateral no sistema e a componente positiva é referente ao lado a bombordo (lado direito do barco) e a componente negativa é referente ao lado boreste (lado esquerdo do barco). Os índices ii aparecem quando há necessidade de se especificar o lado do ponto equacionado, BB para bombordo ou BE para boreste.

Os vetores unitários (\mathbf{e}_1 , \mathbf{e}_2 e \mathbf{e}_3) pertencente a cada eixo de coordenadas foram assumidos conforme é mostrado na Figura 17 e Figura 18. As coordenadas que representam cada um dos 14 pontos do remador são referentes aos pontos mostrados na Figura 19.

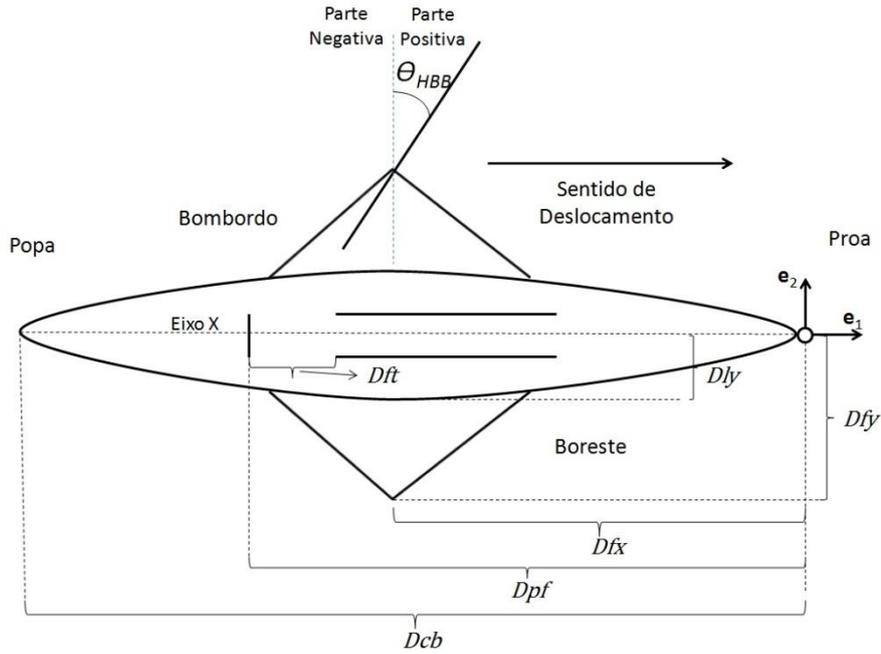


Figura 17: Visão superior do diagrama de corpo livre do barco representando os seus parâmetros de cálculo e o ângulo horizontal referente a bombordo (θ_{HBB}) com a linha imaginária que divide sua porção positiva da negativa. Os parâmetros de cálculo do barco no plano XY são: Dcb (comprimento do barco), Dpf (distância entre bola de proa e o finca-pé), Dfx (distância entre bola de proa e um segmento de reta que passa pelas duas forquetas), Dly (distância entre o eixo X e uma das laterais do barco), Dfy (distância entre a Linha Média Y e uma das forquetas) e Dft (distância entre o finca-pé e o início do trilho).

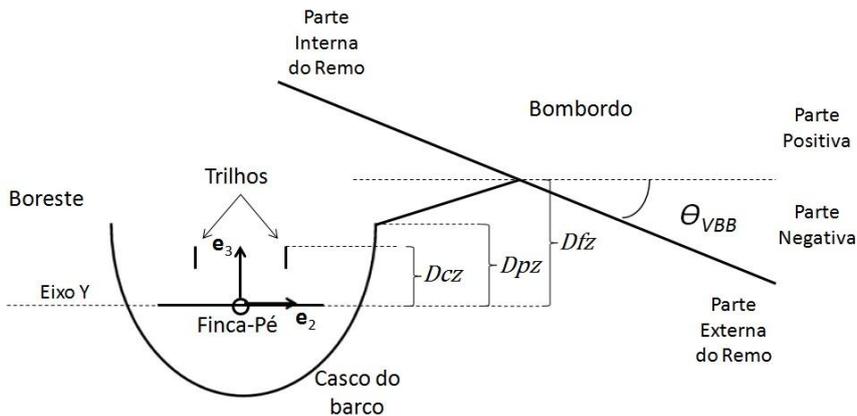


Figura 18: Visão frontal do diagrama de corpo livre do barco representando os seus parâmetros de cálculo e o ângulo vertical referente a bombordo (θ_{VBB}) com a linha imaginária que divide sua porção positiva da negativa. Os parâmetros de cálculo do barco no plano YZ são: Dcz (altura dos trilhos), Dpz (altura da bola de proa, que será considerada a mesma distância para a popa e as laterais do barco) e Dfz (altura das forquetas).

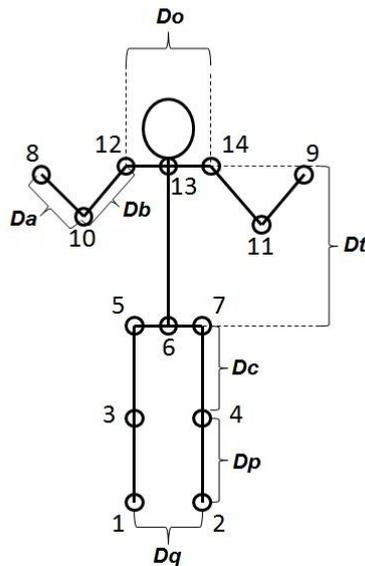


Figura 19: Diagrama de corpo livre do remador com seus diversos segmentos representados, comprimento da perna (Dp), comprimento da coxa (Dc), largura do quadril (Dq), comprimento do tronco (Dt), largura dos ombros (Do), comprimento do braço (Db) e comprimento do antebraço (Da).

3.2.1 O Equacionamento das Coordenadas

A simulação gráfica é alimentada por sete sinais biomecânicos (X_b , $X_{c/b}$, $X_{t/b}$, θ_{HBB} , θ_{HBE} , θ_{VBB} e θ_{VBE}) e mais dezoito constantes de comprimento dos diversos segmentos que serão representados na animação gráfica. Cada uma dessas constantes está presentes na Lista de Símbolos e são identificadas pela inicial “ D ”. O equacionamento para representação gráfica será dividido em pontos referentes ao barco, ao remo, aos membros inferiores, ao tronco e aos membros superiores.

3.2.1.1 Coordenadas do Barco

Para delimitar o espaço ocupado pelo barco, a parte que fica acima da superfície da água será tratada como um losango, onde os vértices de maior diagonal serão o bico da proa e o bico da popa e os outros dois vértices comporão as laterais do barco. Estes

pontos nas laterais servem para ligar o barco às forquetas (Figura 20 – desenho superior). Os quatro pontos que formam o losango estão a uma mesma altura (Dpz), somente tendo as coordenadas do eixo X e do eixo Y diferentes, sendo calculadas através das constantes (Dcb e Dly).

$$\mathbf{R}_{proa} = (X_b, 0, Dpz) \quad (XVI)$$

$$\mathbf{R}_{popa} = (X_b - Dcb, 0, Dpz) \quad (XVII)$$

$$\mathbf{R}_{laterali} = (X_b - Dfx, \pm Dly, Dpz) \quad (XVIII)$$

Para compor a parte imersa e formar o resto do casco barco foram estimados dois pontos, um de nome “Casco do barco à popa” e o outro de nome “Casco do barco à proa” (Figura 20 – desenho inferior). Atribuiu-se que os dois pontos do casco se encontram exatamente no plano XZ e os pontos perto da proa e da popa no eixo X distam da bola de proa, respectivamente, $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ do comprimento total do barco.

$$\mathbf{R}_{cascoproa} = (X_b - \frac{Dcb}{4}, 0, -Dpz) \quad (XIX)$$

$$\mathbf{R}_{cascopopa} = (X_b - \frac{3Dcb}{4}, 0, -Dpz) \quad (XX)$$

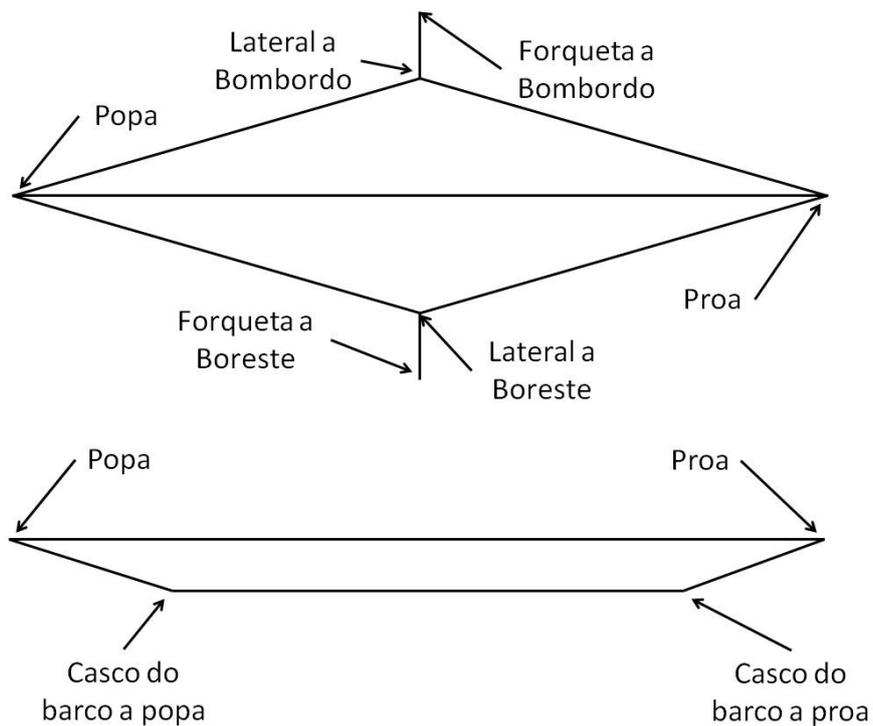


Figura 20: Diagrama de corpo livre do barco como este é desenhado para a simulação em 3D. O desenho superior representa a visão superior do barco e o desenho inferior, a visão lateral. Cada seta indica um ponto que possui a posição equacionada. Os pontos referentes ao “Casco do barco a popa” e “Casco do barco a proa” são pontos aproximados somente com a finalidade de desenhar o barco inteiro.

3.2.1.2 Coordenadas do Remo

O remo foi considerado uma barra rígida. Seu movimento de translação ocorre em concordância com o movimento do barco e o de movimentação angular (tanto vertical quanto horizontal) possui a forqueta como eixo (Figura 21). O equacionamento da posição da forqueta foi obtido a partir do sinal de posição do barco (\mathbf{X}_b) e dos parâmetros Dfx , Dfy (Figura 17) e Dfz (Figura 18). A posição da forqueta serviu de base para a determinação das coordenadas dos outros dois pontos do remo (a pá e a empunhadura), cujos valores são obtidos a partir dos ângulos e dimensões do remo.

$$\mathbf{R}_{forquetaii} = (\mathbf{X}_b - Dfx, \pm Dfy, Dpz) \quad (XXI)$$

$$\mathbf{R}_{páii} = (\mathbf{X}_b - Dfx + Dae \cdot \text{sen}(\theta_{Hii}), \pm(Dfy + Dae \cdot \text{cos}(\theta_{Hii}), Dpz + Dae \cdot \text{sen}(\theta_{Vii})) \quad (\text{XXII})$$

$$\mathbf{R}_{empunhadurairi} = (\mathbf{X}_b - Dfx - Dai \cdot \text{sen}(\theta_{Hii}), \pm(Dfy - Dai \cdot \text{cos}(\theta_{Hii}), Dpz - Dai \cdot \text{sen}(\theta_{Vii})) \quad (\text{XXIII})$$

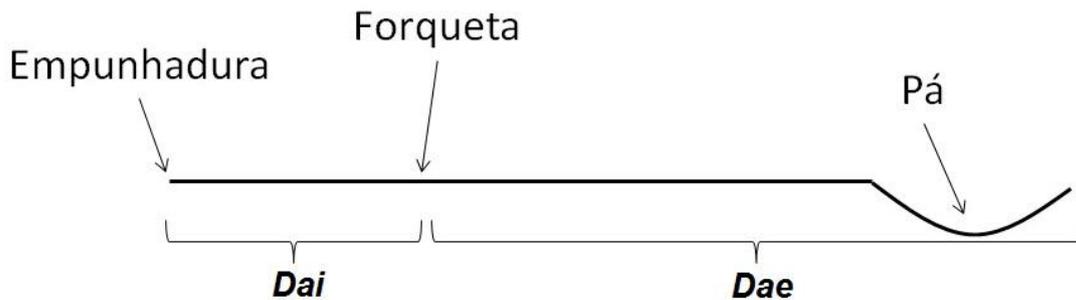


Figura 21: Diagrama de corpo livre do remo como este é desenhado para a simulação em 3D.

3.2.1.3 Coordenadas dos Membros Inferiores

Foi considerado que os membros inferiores estão em perfeita sincronia e paralelos ao plano sagital do remador durante todo o tempo. A modelagem dos membros inferiores pode ser vista como a variação de lados de um sistema composto por dois triângulos (Figura 22). A posição dos pés é fixa em relação ao barco e obtida a partir das constantes Dpf e Dq para os eixos X e Y, respectivamente, enquanto para o eixo Z seu valor é sempre nulo por estar sempre na altura do finca-pé.

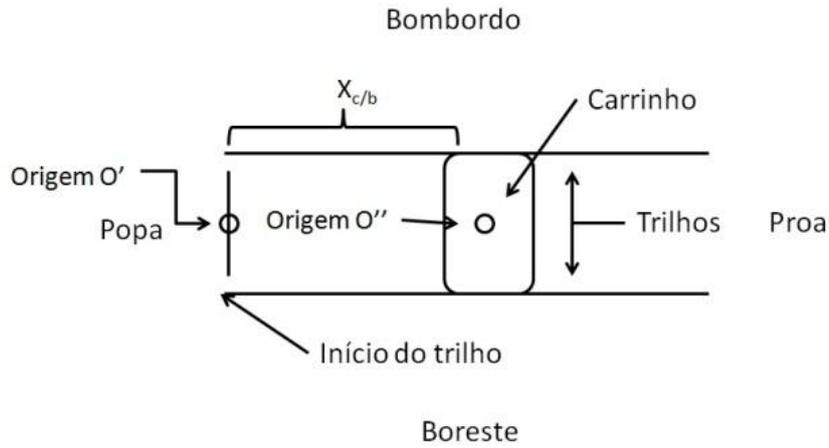


Figura 23: Referências no interior do barco. Para o equacionamento do carrinho faz-se uso do sistema da referência com origem em O' , que se localiza no início do trilho. Para o equacionamento dos segmentos acima do quadril do remador faz-se uso do sistema da referência com origem em O'' , que possui como origem o próprio carrinho. Ambas as referências encontram-se numa altura correspondente a Dcz e com coordenada nula no eixo Y , somente variando ao longo do eixo X .

Pode-se calcular o comprimento de PQ em cada momento da seguinte forma:

$$PQ = \sqrt{Dcz^2 + (Dft + X_{c/b})^2} \quad (XXVI)$$

De posse do comprimento de PQ , utilizando a Lei dos Cossenos no triângulo constituído pelos segmentos dos membros inferiores, pode-se calcular α da seguinte forma:

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{PQ^2 + Dp^2 - Dc^2}{2 \cdot |PQ| \cdot DP} \right] \quad (XXVII)$$

Para calcular o último ângulo para determinação da posição do joelho, uma das formas que se pode usar é a função arco tangente:

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{Dcz}{Dft + X_{c/b}} \right] \quad (XXVIII)$$

Fazendo uso dos ângulos α e β , além das variáveis pertinentes, as coordenadas dos pontos 3 e 4 do remador ficam estabelecidas como:

$$\mathbf{R}_{joelhoii} = (X_{péii} + Dp \cdot \cos(\alpha + \beta), \pm \frac{Dp}{2}, Dp \cdot \sin(\alpha + \beta)) \quad (XXIX)$$

3.2.1.4 Coordenadas do Tronco

O tronco será aproximado por uma barra fixa, na qual o extremo inferior é o ponto médio entre os acetábulos e o extremo superior é a base do pescoço (meio do segmento que une os ombros). A origem para estabelecer o referencial do movimento do tronco do remador será O'' (Figura 23). As componentes nos eixos X e Z são determinadas a partir de funções trigonométricas através de Dt e dos sinais de posição relativa do carrinho ($X_{c/b}$) e do tronco do remador ($X_{t/b}$). O movimento do tronco é uma oscilação que descreve um ângulo (σ) em torno de uma reta normal ao carrinho. Esse ângulo será mínimo no início da propulsão e máximo no final da mesma (Figura 24).



Figura 24: Visão lateral do diagrama de corpo livre do tronco do remador em dois momentos do ciclo da remada: a esquerda tem-se o início da fase ativa e a direita o início da fase passiva. $X_{t/c}$ é a posição do tronco do remador em relação ao carrinho ($X_{t/b} - X_{c/b}$) cuja porção positiva é com o tronco inclinado à proa e a negativa e com o tronco inclinado à popa. Por definição do ângulo σ , este segue a mesma regra, tendo como linha de base o eixo Z.

O ângulo σ é calculado como:

$$\sigma = \sin^{-1} \left[\frac{X_{t/b} - X_{c/b}}{Dt} \right] \quad (\text{XXX})$$

Normalmente não é possível fazer a aquisição da posição das costas do remador na altura dos ombros. Logo, deve existir alguma medida compensatória para que a entrada que represente $\mathbf{X}_{t/b}$ não seja tendenciosa em função do raio de giração do ponto em que o sinal está sendo captado. O deslocamento linear que uma partícula faz num movimento circular é diretamente proporcional ao raio. Logo, considerando que o sinal captado ($\mathbf{X}'_{t/b}$) foi medido a uma altura h do quadril do remador, o fator de correção para o sinal do tronco é apenas a razão (Dt/h) . Assim sendo, $\mathbf{X}_{t/b} = (Dt/h) \cdot (\mathbf{X}'_{t/b})$.

As equações que modelam as componentes dos pontos 6 e 13 do remador são:

$$\mathbf{R}_{quadril} = (\mathbf{X}_b - Dpf + Dft + \mathbf{X}_{c/b}, \mathbf{0}, Dcz) \quad (\text{XXXI})$$

$$\mathbf{R}_{pescoço} = (\mathbf{X}_{quadril} + Dt \cdot \text{sen}(\sigma), \mathbf{0}, Dcz + Dt \cdot \text{cos}(\sigma)) \quad (\text{XXXII})$$

3.2.1.5 Coordenadas dos Membros Superiores

Os ombros possuem coordenadas iguais as do pescoço nos eixos X e Z e são deslocados em metade de Do no eixo Y. As mãos possuem coordenadas idênticas às empunhaduras. Tais pontos são 8, 9, 12 e 14 do remador (Figura 19) e são modelados da seguinte maneira:

$$\mathbf{R}_{ombroii} = (\mathbf{X}_{pescoço}, \pm \frac{Do}{2}, \mathbf{Z}_{pescoço}) \quad (\text{XXXIII})$$

$$\mathbf{R}_{mãoii} = (\mathbf{X}_b - Dfx - Dai \cdot \text{sen}(\theta_{Hii}), \pm(Dfy - Dai \cdot \text{cos}(\theta_{Hii})), Dfz - Dai \cdot \text{sen}(\theta_{Vii})) \quad (\text{XXXIV})$$

Semelhante aos membros inferiores, a modelagem dos membros superiores pode ser vista como a variação de lados de um triângulo. No caso dos membros superiores esse triângulo é determinado por ombros, mãos e cotovelos (Figura 25), dos quais ombros e mãos são diretamente determinados, enquanto o cotovelo deverá ter sua posição estimada.

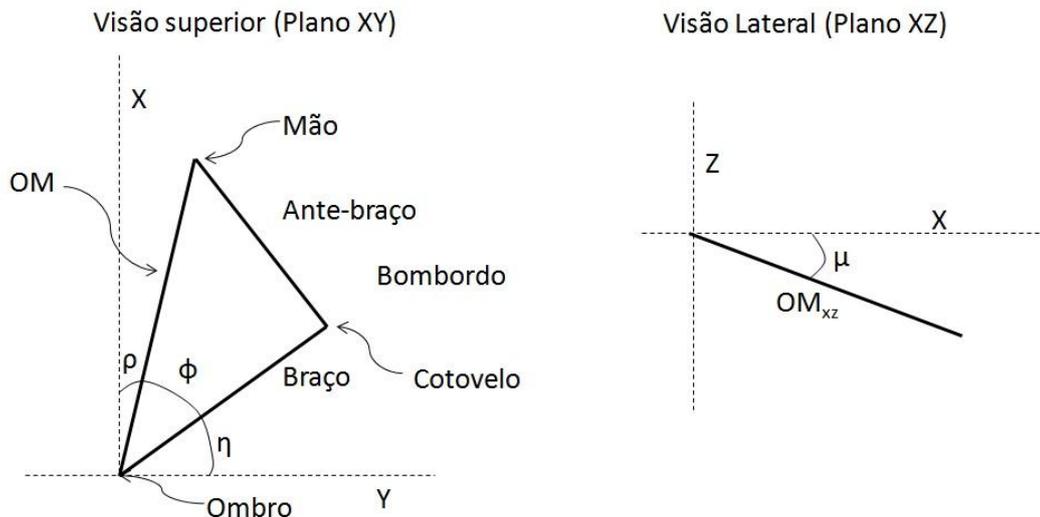


Figura 25: Diagrama de corpo livre do membro superior direito (a bombordo), à direita no plano XY e à esquerda no plano XZ. OM é o vetor que possui origem no ombro e termina na mão do mesmo lado do ombro onde começa. Ou seja, o vetor OM direito está contido no plano determinado pelos dois ombros e a mão direita, valendo a mesma regra para o lado esquerdo. OM_{xz} é a componente do vetor OM no plano $Y=DO/2$ (paralelo ao plano XZ), ou seja, trata-se do mesmo vetor com componente Y valendo metade da largura dos ombros. η é o ângulo que o braço faz com a reta que passa pelos dois ombros, ϕ é o ângulo que o vetor OM faz com o vetor que liga o ombro ao cotovelo, ρ é o ângulo cujo somatório com os dois primeiros é igual a $\pi/2$ e μ é o ângulo que o plano que contém o cotovelo faz com o plano em que a coordenada Z é igual à altura do ombro.

Considerado um vetor com origem no ombro e inserção na mão do mesmo lado (OM) dadas as limitações anatômicas do comprimento do braço e do antebraço, a única informação que podemos extrair da posição do cotovelo é a distância que este possui do vetor OM . Matematicamente, todas as possibilidades da posição do cotovelo são os infinitos pontos que descrevem o círculo com o vetor OM como centro. Uma boa aproximação é imaginar que o cotovelo pertence a um plano que será determinado em cada momento por três pontos: os dois ombros e a mão que pertence ao lado do cotovelo que se deseja equacionar.

Segundo o modo como foi construído o plano que contém o cotovelo, o segmento de reta que passa pelos dois ombros funciona como eixo de rotação desse plano. Para determinar os componentes dos cotovelos, foi usado um sistema de coordenadas esféricas com origem no ombro do lado do cotovelo que se deseja

determinar a posição. Os dois primeiros componentes das coordenadas esféricas são o parâmetro DB e o ângulo $\rho + \phi$ (Figura 25 – Diagrama à esquerda), onde o ângulo ρ é tal que seu complementar é $\phi + \eta$. O terceiro componente é o ângulo entre o plano que contem o cotovelo e o plano XY, chamado μ (Figura 25 – diagrama à direita).

O ângulo ϕ é calculado através de Lei dos Cossenos no triangulo composto pelo braço, antebraço e OM :

$$\phi = \cos^{-1} \left[\frac{Da^2 - (OM^2 + Db^2)}{2 \cdot DB \cdot |OM|} \right] \quad (XXXV)$$

Fazendo-se o produto interno do vetor OM com o vetor unitário e_2 , temos:

$$\eta = \cos^{-1} \left[\frac{OM \cdot e_2}{|OM|} \right] - \phi \quad (XXXVI)$$

Pela definição assumida, temos:

$$\rho \equiv \frac{\pi}{2} - (\phi + \eta) \quad (XXXVII)$$

O terceiro componente de coordenadas esféricas (μ) pode ser determinado pelo produto interno entre a projeção no plano XZ de OM e o vetor unitário e_1 (Figura 25 – diagrama à direita) da seguinte forma:

$$\mu = \cos^{-1} \left[\frac{OM_{xz} \cdot e_1}{|OM_{xz}|} \right] \quad (XXXVIII)$$

Assim, os pontos 10 e 11 do remador (Figura 19), convertidos em coordenadas cartesianas, ficam da seguinte forma:

$$\begin{aligned} R_{cotoveloii} = & \left(X_{ombroii} - Db \cdot \cos(\phi + \rho) \cdot \cos(\mu), \pm \left(\frac{Do}{2} + Db \cdot \sin(\phi + \right. \right. \\ & \left. \left. \rho, Z_{ombroii} + Db \cdot \cos(\phi + \rho) \cdot \sin(\mu) \right) \right) \quad (XXXIX) \end{aligned}$$

3.2.2 Análise do Simulador Gráfico 3D

Em função do fato do atual sistema de aquisição de dados de remo ainda não ser capaz de fazer a aquisição de todos os sinais de entrada requeridos pelo simulador gráfico, a avaliação deste programa de visualização foi feita por comparação a filmagem

de um treino de um remador de *single skiff* do Clube de Regatas Flamengo, selecionando-se do vídeo resultante 6 quadros para representar o ciclo completo da remada, os quais formam três duplas de momentos importantes do ciclo da remada. Esses quadros correspondentes ao início e ao final do *catch* (início da fase de apoio com a imersão da pá do remo na água); os momentos imediatamente antes e depois do remo passar perpendicularmente ao barco (momento em que a transmissão de energia para o sistema é mais eficiente por não haver componente de forças transversais ao deslocamento); e o início e o meio da fase de recuperação (remoção da pá da água com o fim da fase de apoio e posterior volta do remador para um novo ciclo).

Estimativas dos sinais biomecânicos necessários ao simulador foram obtidas com o uso do programa Kinovea – 0.8.15 (CARDOSO, 2011) a partir de cada quadro. Esses sinais foram então aplicados ao programa de simulação, de modo a criar uma representação gráfica (2D ou 3D) dos quadros correspondentes para posterior comparação. A simulação usou ainda valores típicos de um barco *single skiff* e de parâmetros antropométricos de um remador do Clube de Regatas Flamengo (Tabela 3 e Tabela 4).

Tabela 3: Parâmetros referentes às dimensões do barco.

Parâmetros	Valor (cm)
<i>Dcb</i>	600
<i>Dfx</i>	300
<i>Dfy</i>	85
<i>Dfz</i>	35
<i>Dpf</i>	320
<i>Dft</i>	35
<i>Dcz</i>	5
<i>Dly</i>	20
<i>Dpz</i>	35
<i>Dae</i>	190
<i>Dai</i>	80

Tabela 4: Parâmetros referentes às dimensões do remador.

Parâmetros	Valor (cm)
<i>Dp</i>	50
<i>Dc</i>	50
<i>Dq</i>	35
<i>Dt</i>	65
<i>Do</i>	50
<i>Db</i>	45
<i>Da</i>	50

4 Resultados

4.1 Dinâmica Direta

Munido dos parâmetros constantes e dos sinais de entrada gerados, o simulador no modo *dinâmica direta* forneceu sinais de aceleração e velocidade do barco que se assemelham às observadas experimentalmente, tanto no que diz respeito à morfologia, quanto às suas magnitudes (Figura 26). A parte positiva e a parte negativa do sinal de aceleração relativa dos segmentos corporais do remador apresentaram áreas iguais, de modo a fazer que as excursões de ida na remada tenham as mesmas magnitudes das excursões de volta, e os valores da amplitude de excursão do carrinho e do tronco do remador, obtidas pela segunda integral em relação ao tempo de cada parte, foram de 0,55m e 0,8 m, respectivamente (conferir no gráfico superior das Figura 27 e Figura 28). A velocidade média obtida na simulação realizada com um total de 100 ciclos em voga 20 foi de 3,12 m/s. A média dos picos positivos de aceleração foi de 4,46 m/s², enquanto a média dos picos negativos foi de -5,02 m/s².

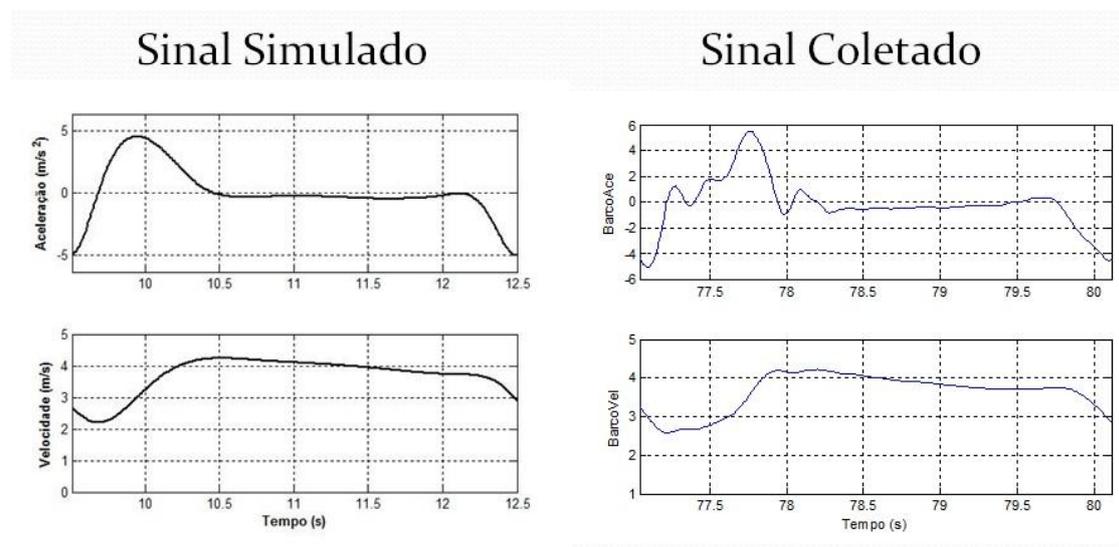


Figura 26: À esquerda, Sinais de saída do simulador na conformação de dinâmica direta. O gráfico superior representa um ciclo da aceleração, enquanto o gráfico inferior representa o ciclo da

velocidade, ambos calculados através do modelo da dinâmica direta a voga 20. À direita, sinais coletados no campo experimental à mesma voga dos sinais simulados.

4.2 Dinâmica Inversa

4.2.1 Comparação entre os Métodos de Identificação de Fases do Ciclo

A **Tabela 5** apresenta os erros relativos que o método alternativo apresentou em relação ao método padrão de detecção de fases do ciclo de remada, considerando as cinco regatas avaliadas. A média global dos erros na detecção do início da fase ativa foi de $1,10 \pm 1,68\%$. Em todas as regatas a média dos erros foi sempre inferior a 2%, apesar de um dos casos ter apresentado uma dispersão superior a 5%. Para a fase passiva, a média global dos erros na detecção foi maior, atingindo $3,42 \pm 2,86\%$.

Tabela 5: Erros percentuais na detecção de fase ativa e passiva por meio do método alternativo e resultados do teste de inferência.

Remador	ErroFA (%)	ErroFP (%)
1	$0,90 \pm 0,71$	$1,79 \pm 1,51$
2	$1,00 \pm 1,05$	$5,18 \pm 5,23$
3	$0,68 \pm 0,43$	$3,21 \pm 0,95$
4	$1,16 \pm 0,67$	$1,92 \pm 0,94$
5	$1,75 \pm 5,52$	$5,02 \pm 5,68$
Média	$1,10 \pm 1,68$	$3,42 \pm 2,86$

Valores representados por média \pm desvio-padrão.

4.2.2 Obtenção dos Sinais de Entrada e Resultados da Estimação de força

A **Tabela 6** mostra as características físicas dos remadores que participaram da fase experimental do trabalho.

Tabela 6: Características físicas do espaço amostral

Altura (cm)	Massa Corporal (Kg)	Idade (anos)
176,5 ± 12,0	77,0 ± 9,6	30,0 ± 11,7

Valores representados por médias ± desvio-padrão (n = 5).

A aceleração do barco foi o sinal primário obtido pelo sistema de aquisição de dados de remo. Para minimizar os erros decorrentes da integração do sinal de aceleração, este foi corrigido pelo sinal de posição do barco obtido pelo GPS. A correção foi realizada de tal maneira que fosse minimizado o erro entre os sinais de velocidade obtidos pela derivação do sinal da GPS e de integração do sinal de aceleração. Ambos são mostrados nos dois primeiros gráficos de cima para baixo da Figura 2.

Os sinais de aceleração relativa do carrinho (Figura 27) e do tronco do remador (Figura 28) foram obtidos através da segunda derivada temporal dos respectivos sinais de posição. As morfologias dos sinais e suas amplitudes foram assemelhadas a análogos reportadas anteriormente (BAUDOIN & HAWKINS, 2004 e CABRERA *et al.*, 2006).

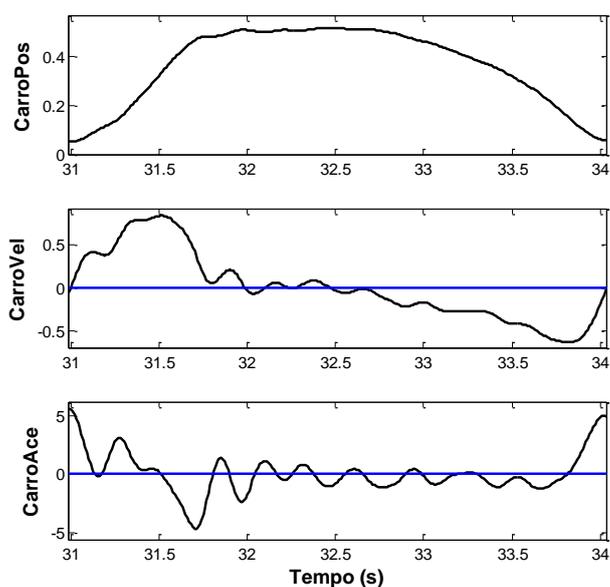


Figura 27: Sinal de posição relativa do carrinho (CarroPos) filtrado passa-baixas no sentido direto e reverso em 5Hz (4ª ordem) e suas derivadas até segunda ordem (CarroVel e CarroAce), processados com mesmo filtro. Os três sinais mostrados estão em fase começando pelo *catch* e terminando no *catch* subsequente.

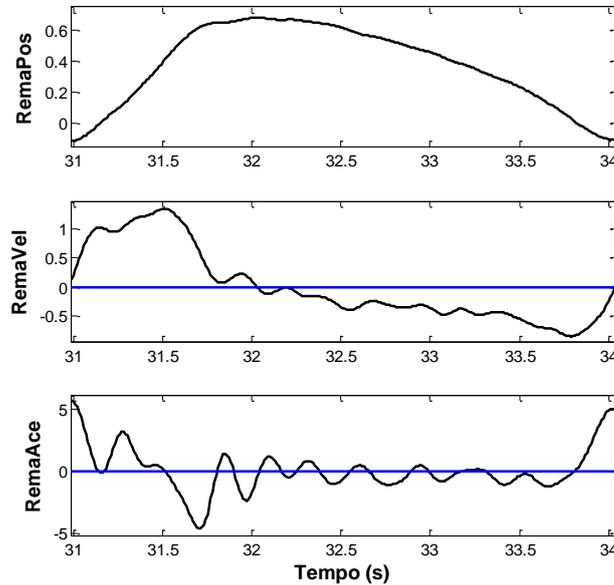


Figura 28: Sinal de posição relativa do tronco do remador (RemaPos) filtrado passa-baixas no sentido direto e reverso em 5Hz (4ª ordem) e suas derivadas até segunda ordem (RemaVel e RemaAce), processados com mesmo filtro. Os três sinais mostrados estão em fase começando pelo *catch* e terminando no *catch* subsequente.

A Equação (XV) mostra todos os membros que são somados para se obter a força estimada, segundo a qual, com exceção dos parâmetros fixos, como massas dos componentes do sistema, constante de arrasto da água e dimensões do remo. Deste modo, a força é estimada essencialmente através de quatro sinais (\mathbf{a}_b , \mathbf{v}_b , $\mathbf{a}_{c/b}$ e $\mathbf{a}_{t/b}$). No intuito de facilitar o entendimento de como é produzida a estimação do sinal de força na empunhadura, a Figura 29 mostra, do primeiro ao quarto gráficos, um ciclo de remada dos quatro termos da Equação (XV), multiplicados pelas respectivas constantes, e a somação destes no quinto gráfico, a qual representa a estimativa da força na empunhadura propriamente dita.

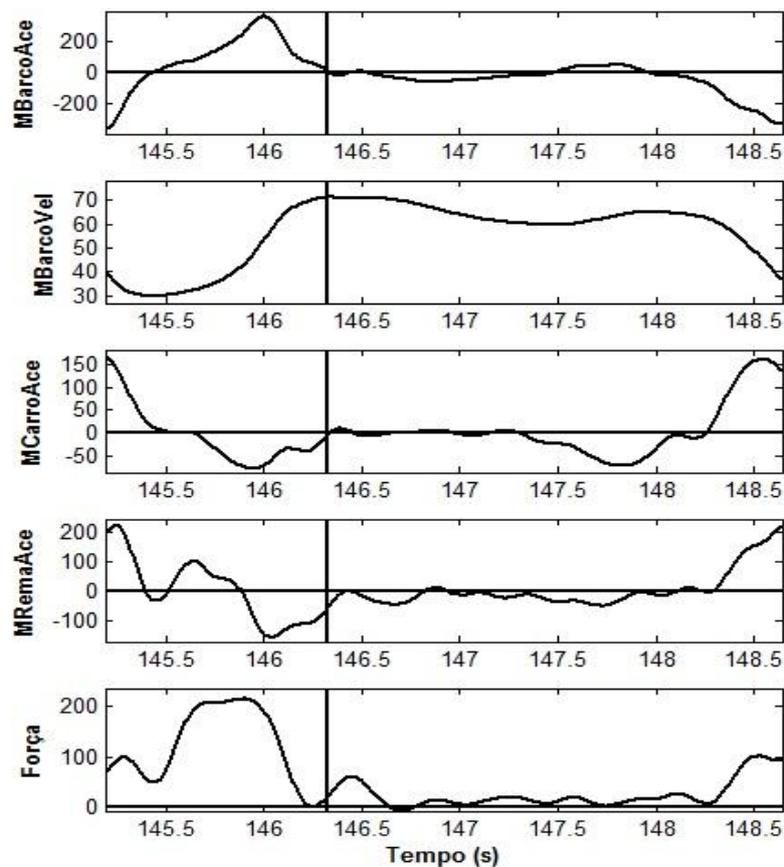


Figura 29: Construção da estimativa de força na empunhadura. Os quatro primeiros gráficos representam os quatro sinais do lado direito da Equação (XV), já multiplicado pelos seus respectivos multiplicadores, conseqüentemente cada um já em Newtons. MBarcoAce é o termo referente ao sinal de aceleração do barco, MBarcoVel, o de velocidade do barco, MCarroAce, o de aceleração relativa do carrinho e MRemaAce, o de aceleração relativa do tronco do remador. O quinto sinal é o ciclo correspondente à estimativa de força proveniente do somatório dos outros quatro gráficos anteriores. O ciclo é mostrado de *catch a catch* e a linha vertical contínua indica a divisa entre as fases.

4.2.3 Índices e Concordância das Estimativas de força

A Figura 30 mostra o comportamento da média dos picos da estimação de força para cada um dos remadores nas três vogas estudadas. O coeficiente de correlação linear (Pearson) entre os valores dos picos de força e os valores de vogas ao longo de cada regata foi de $r = 0,75$ ($n = 15$). A média global dos picos de força estimados foi de 258,01 N.

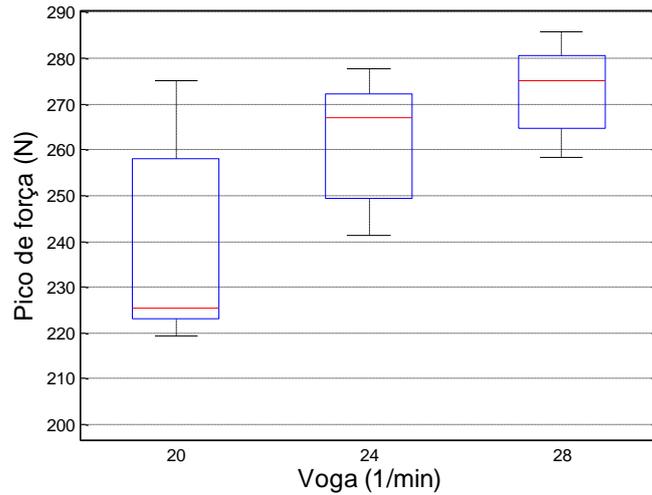


Figura 30: Boxplot do pico da estimativa de força na empunhadura em voga baixa, média e alta ($r = 0,749$).

A Figura 31 mostra o comportamento da média dos impulsos para cada um dos remadores nas três vogas requisitadas. O coeficiente correlação linear de Pearson obtido para os impulsos foi $r = 0,27$ ($n = 15$). A média global do impulso encontrado para todas as vogas foi de 326,26 N*s.

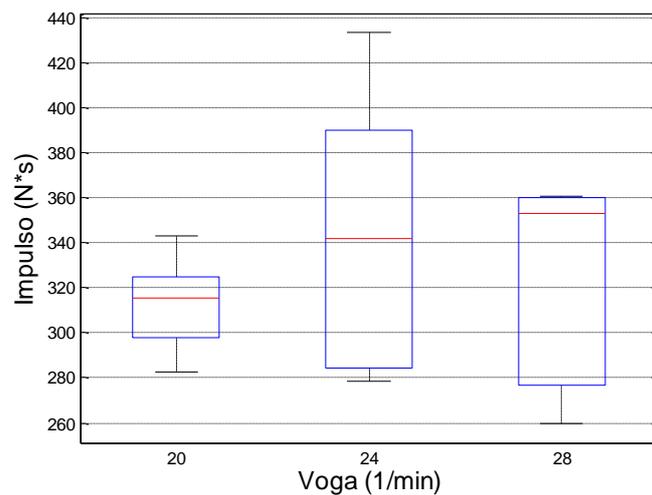


Figura 31: Boxplot do impulso da estimacão de força na empunhadura em voga baixa, média e alta ($r = 0,271$).

A Figura 32 mostra o comportamento da concordância do sinal de força

estimado com a curva polinomial ajustada, considerando-se as regatas de cada remador em cada uma das vogas requisitadas. O coeficiente correlação linear de Pearson foi de $r = -0,75$ ($n = 15$) e a média global desse índice foi de 80,10%.

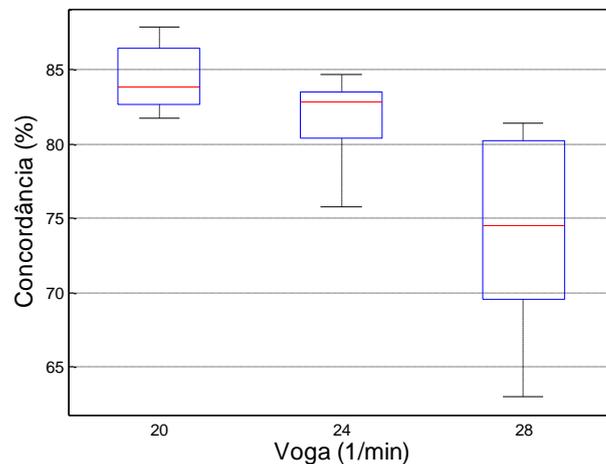


Figura 32: Boxplot da concordância da curva de estimação de força na empunhadura com a curva parabólica em voga baixa, média e alta ($r = -0,754$).

4.3 Simulação Gráfica 3D

Como resultados representativos da simulação, foram selecionados quadros correspondentes aos selecionados na filmagem. Cada resultado foi organizado de modo à linha superior de figuras representar a parte inicial e a linha inferior representar a parte final do momento do ciclo de remada. A Figura 33 corresponde aos quadros do *catch*, a Figura 34 ilustra os quadros do momento com o remo perpendicular ao barco e a Figura 35 os quadros relativos à fase de recuperação.

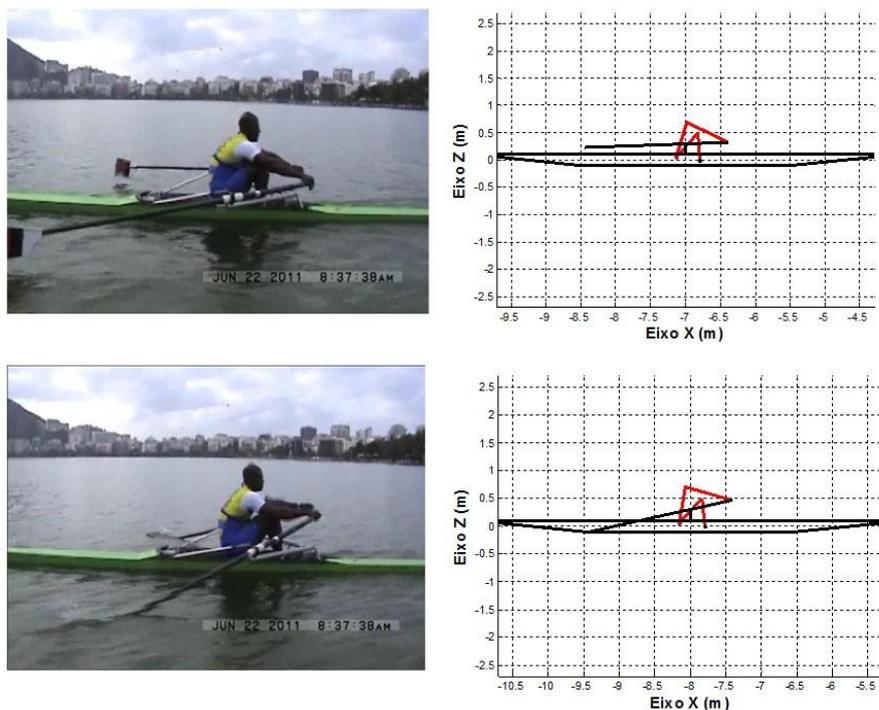


Figura 33: *Catch*, o momento de imersão da pá do remo na água. Na coluna da esquerda estão os *frames* da filmagem do atleta e na coluna da direita a respectiva simulação em gráfico 3D através do equacionamento proposto. As figuras na linha superior representam o início do movimento e as figuras da linha inferior o final do movimento.

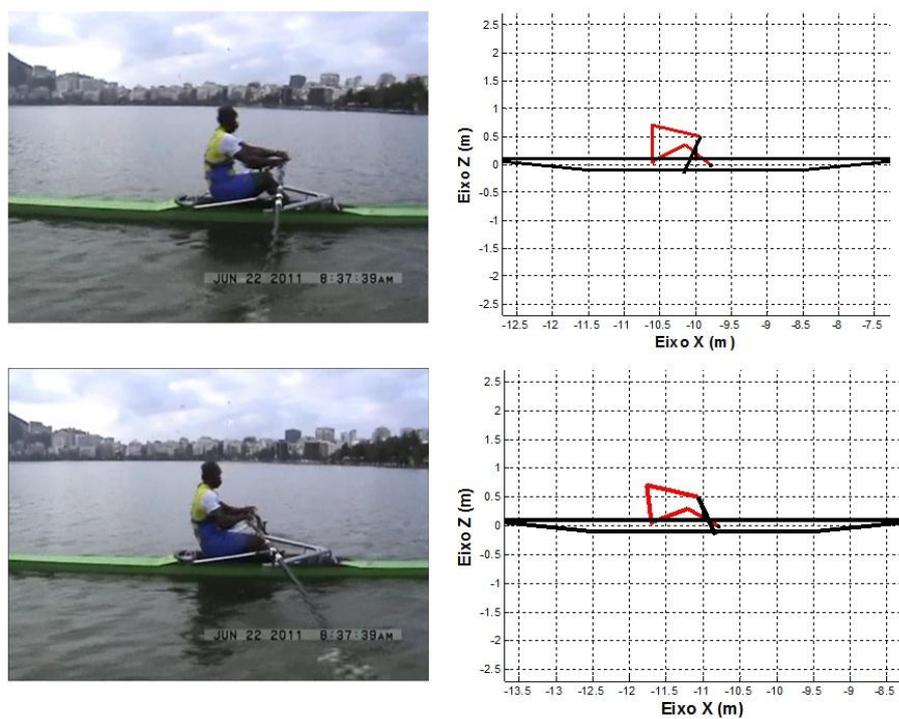


Figura 34: Momento em que o remo passa perpendicularmente ao barco. Na coluna da esquerda estão os *frames* da filmagem do atleta e na coluna da direita a respectiva simulação em gráfico 3D

através do equacionamento proposto. As figuras na linha superior representam o início do movimento e as figuras da linha inferior o final do movimento.

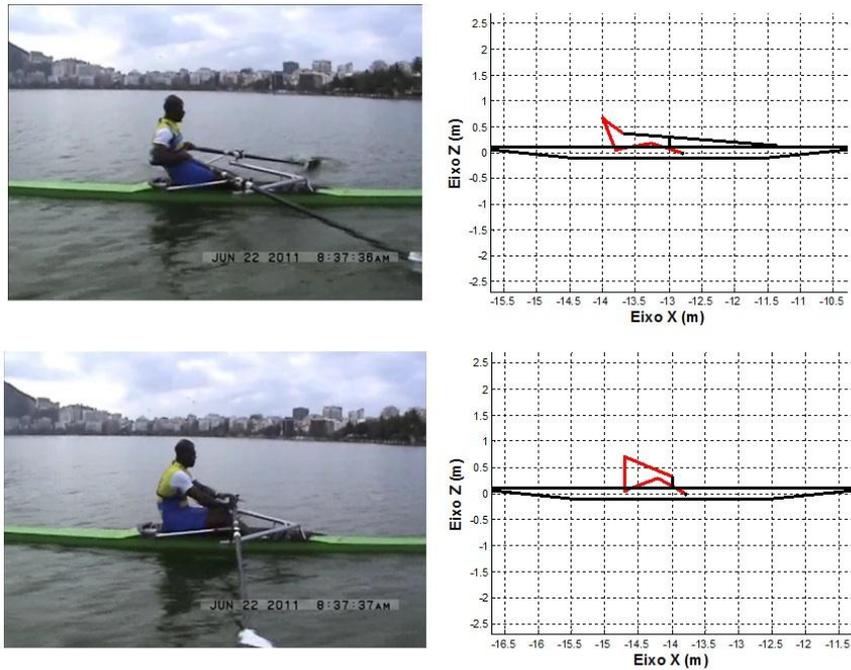


Figura 35: Release, fim da fase ativa e início da fase passiva para um novo ciclo. Na coluna da esquerda estão os *frames* da filmagem do atleta e na coluna da direita a respectiva simulação em gráfico 3D através do equacionamento proposto. As figuras na linha superior representam o início do movimento e as figuras da linha inferior o final do movimento.

Para ampliar a noção de perspectiva que o simulador pode oferecer, também são mostrados gráficos da visão superior de cada um dos momentos utilizados na simulação (Figura 36).

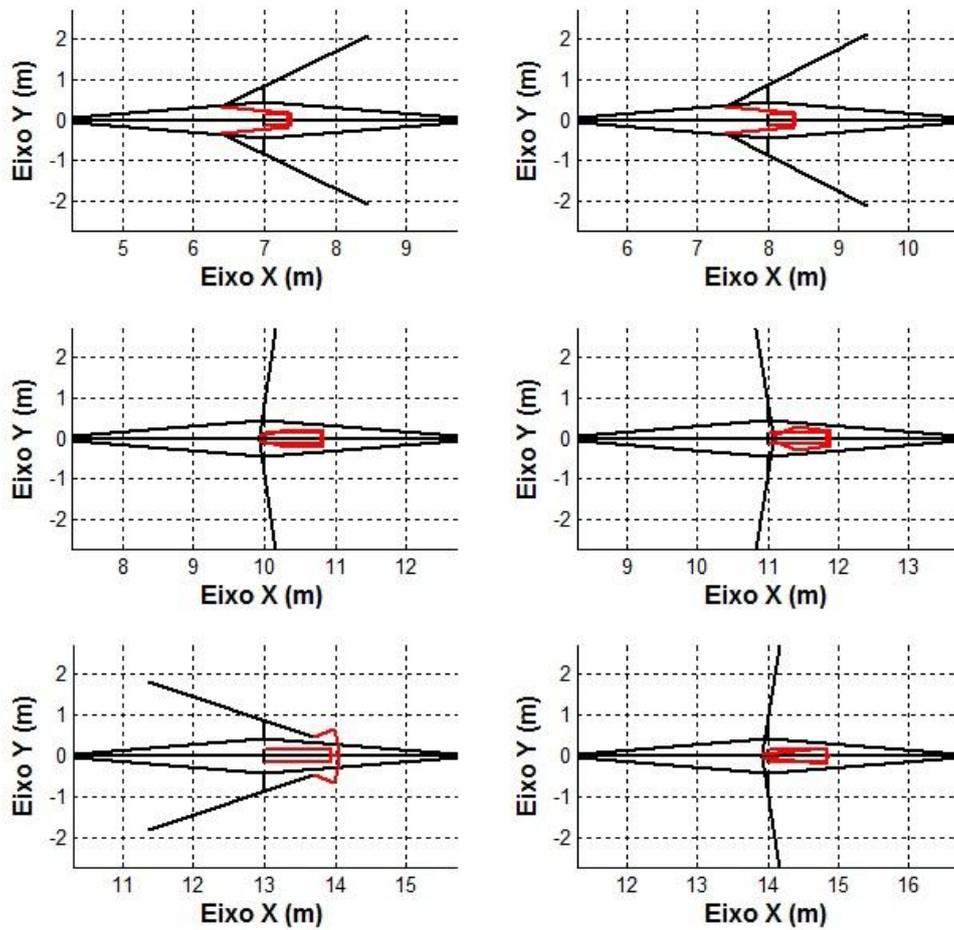


Figura 36: Visão superior da simulação gráfica. Cada linha representa de cima para baixo representa cada um dos três momentos da remada das Figura 33, Figura 34 e Figura 35, respectivamente. A coluna da esquerda representa o início do movimento e a coluna da direita representa o final do mesmo.

5 Discussão

O coeficiente de arrasto que a água faz no casco do barco (K) obtido na fase experimental foi da mesma ordem de grandeza que anteriormente reportado (CABRERA *et al.*, 2006, SLIASAS & TULLIS, 2009).

5.1 Método Alternativo de Detecção de Fases do Ciclo da Remada

Esse trabalho se propôs, inicialmente, a fazer uso de medidores de ângulo horizontal do remo para determinação das fases do ciclo de remada. Contudo, por mais que o suporte projetado para fixar os sensores goniométricos fossem resistentes para aguentar o estresse mecânico de muitas regatas, os potenciômetros mostraram-se pouco robustos, não resistindo mais que três regatas sem comprometer o seu funcionamento. A necessidade da constante troca de potenciômetros no sensor mostrou-se pouco funcional, de modo que foi decidido investir na detecção de fases do ciclo por meio de outro sinal.

O método alternativo foi desenvolvido com base no comportamento repetitivo dos sinais de remo. O *catch*, que caracteriza o início da fase ativa, está ligado ao momento de maior desaceleração do barco. Essa desaceleração acontece tanto pelo movimento do remador em relação ao barco, quanto pela imersão da pá dos remos na água. Esse foi o motivo para o método alternativo ter sido bem sucedido na identificação do início da fase ativa usando o pico negativo do sinal de aceleração do barco (KLESHNEV, 2009).

A remoção das pás do remo da água caracteriza o início da fase passiva. Nesse momento o sistema para de ganhar energia e a aceleração cai vertiginosamente. Por consequência, a inclinação do gráfico de velocidade muda de um valor positivo para um valor negativo, o que faz acontecer um ponto de máxima velocidade. Logo, o instante associado ao máximo valor de velocidade foi escolhido no método alternativo como

indicador do início da fase passiva.

A média e o desvio-padrão dos erros percentuais tanto na detecção de início de fase ativa quanto na detecção do início de fase passiva pelo método alternativo apresentou erros menores que 5% do ciclo.

Os resultados mostraram que o método alternativo é melhor na detecção do início de fase ativa do que para a detecção do início da fase passiva. Tais resultados parecem estar ligados ao fato dos movimentos do remador durante o *catch* serem mais abruptos e marcantes que os movimentos associados ao *release*. Isso acontece porque, uma vez com a pá imersa na água, o remador deve fazer com que a velocidade da pá supere a velocidade do barco o mais rápido possível, de modo a minorar a frenagem durante o *catch*. Tal exemplo de movimento abrupto já não acontece durante o *release*. Então, parece que o movimento abrupto no *catch* e o movimento mais suave no *release* causam variações nos sinais cinemáticos que facilitam a identificação do início de fase ativa em detrimento da identificação do início de fase passiva.

5.2 Dinâmica Inversa

Os quatros sinais de entrada, obtidos a partir de variáveis cinemáticas da remada, usados para geração da estimativa da força da empunhadura interferem-se construtiva e destrutivamente em momentos específicos, fazendo com que seja possível reconhecer uma perturbação concentrada no trecho correspondente ao *drive*. Em contrapartida, a resultante da somação fica próxima a uma linha de base concentrada no zero no trecho correspondente à fase passiva (Figura 29).

De um modo geral, devido à baixa amplitude de variação relativa do sinal ao longo do ciclo, o termo que depende da velocidade do barco serve aproximadamente como um *offset* para a estimativa de força. Nessa linha de raciocínio, a morfologia final da estimativa é mais sensível à somação dos outros três termos, os termos dependentes

da aceleração do barco e das acelerações relativas dos segmentos do remador.

Deste modo, destacam-se dois instantes importantes na determinação na morfologia do sinal resultante. Durante o primeiro instante, o pico de aceleração negativa do barco sempre está coincidindo com os picos positivos de aceleração relativa do carrinho e do tronco do remador, de forma que nesse trecho, a somação tenda a um valor não muito elevado. O segundo instante diz respeito à parte positiva da aceleração do barco. Esse momento acontece concomitantemente com os picos negativos de aceleração relativa do carrinho e do tronco do remador. Contudo, esses dois últimos não conseguem sobrepujar a somação da parte positiva da aceleração do barco com o termo dependente da velocidade do barco, que é sempre positivo. Consequentemente a perturbação no trecho correspondente à fase ativa dá origem à morfologia da estimativa do sinal de força (Figura 29). Finalmente, no trecho correspondente à fase passiva, por se tratar da parte do ciclo que não possui qualquer contato do sistema com o meio externo (com exceção do arrasto que a água faz no casco do barco), os sinais tendem a se anular em função dos deslocamentos relativos de massas do sistema (NUSSENZVEIG, 2002). No exemplo mostrado na construção da estimativa de força (Figura 29), é possível notar os mencionados efeitos.

Na primeira metade da fase passiva, dentro do estilo de remada preconizado no Clube de Regatas Flamengo, há inicialmente a volta dos membros superiores no qual os sinais de aceleração relativa ficam em torno de zero. Quando o carrinho começa a se movimentar para chegar ao início do trilho, ele é acelerado negativamente. Para manter a quantidade de movimento total do sistema (considerando uma velocidade constante do centro de massa do sistema), a aceleração do barco fica levemente positiva, o que acontece na Figura 29 entre 147,5 s e 148,0 s. No saldo final, para efeito de somação do sinal de estimativa de força, nesse trecho a linha de base continua tendendo a ser nula, o

que é esperado durante a fase passiva.

Numa regata, a largada, momento da prova caracterizado por vogas mais altas que as utilizadas na velocidade de cruzeiro, os picos de força alcançam valores de 1000 a 1500N. No decorrer da prova, esses valores já vão para uma faixa menor que vai de 500 a 700N (STEINACKER, 1993), o que sugere que a voga possui uma relação com os picos de força desenvolvidos na empunhadura (BAPTISTA *et al.*, 2008). Tais achados concordam com o comportamento observado de picos de força para diferentes vogas, no qual os picos tendiam a aumentar conforme a voga aumentava. Tal efeito é refletido na correlação de $r = 0,75$. Levando-se em consideração a relação de causa e efeito em relação à voga, o índice de determinação (r^2) assume um valor de 56,1% do aumento do pico de força estimada em função do aumento de voga.

No entanto, as magnitudes dos picos não se mantiveram em concordância com os valores análogos reportados em trabalhos anteriores, assumindo valores que alcançaram cerca de menos da metade dos valores encontrados na literatura (Tabela 7). A modelagem proposta busca estimar variáveis bilaterais (força a bombordo e a boreste) a partir de variáveis unilaterais (grandezas cinemáticas do sistema que oscilam ao longo de uma única dimensão). Talvez isso se deva ao fator “2” presente na Equação (XV), que é consequência da consideração do perfeito sincronismo entre as duas empunhaduras. Na prática isso não acontece e os picos não necessariamente ocorrem no mesmo momento, de modo que o fator presente na equação pode ter feito com que as estimações de força, apesar de se concentrarem no trecho correspondente à fase ativa, sejam mais largas que o que seriam na realidade e conseqüentemente com menores amplitudes. Além disso, os trabalhos reportados foram realizados em esforço máximo ou sub-máximo por parte dos atletas, o que não foi possível em todos os casos no presente trabalho.

Tabela 7: Referência de picos de força encontrados na literatura.

Trabalhos	Método	Situação	Pico de Força (N)
Presente	Regata de 2000 m	Água	~ 260
Baudoin & Hawkins (2004)	Média de 8 remadas	Água	~ 700
Baptista <i>et al.</i> (2008)	Carga crescente	Remo-Ergômetro	~ 800 à 900
Hill & Fahrig (2009)	Regata de 2000 m	Água	~ 800

Somado a isso, uma vez que se faz um paralelo entre o trabalho mais semelhante que fez uso de regatas de 2000 metros (HILL e FAHRIG, 2009) e o atual trabalho, a velocidade média do atual trabalho foi de 3,66 m/s, enquanto na referência foi de 4,32 m/s. Essa diferença de cerca de 15% na velocidade também pode ser usada como um fator para explicar a discrepância dos picos de força encontrados, uma vez que força possui relação quadrática com a velocidade.

Baptista e *cols.* (2008), em testes feitos com remadores no limiar de lactato e no esforço máximo, não observaram diferença significativa entre o impulso gerado na fase de *drive* nessas duas situações. Hill e Fahrig (2009) avaliaram a influência da flutuação de velocidade em diferentes vogas, protocolo semelhante ao desenvolvido no presente trabalho. Os remadores desenvolveram regatas em quatro vogas diferentes (20, 24 28 e 32 remadas/min) e o sinal de força foi registrado em cada regata. A média dos impulsos (em Ns) com seus respectivos desvio-padrão para as diferentes vogas em ordem crescente foram: 442 ± 29 , 448 ± 27 , 450 ± 23 e 445 ± 19 . Ou seja, o impulso não parece ser modulado pela voga. Esses achados corroboram a baixa correlação encontrada entre impulso e voga no presente trabalho ($r = 0,25$). O aumento da voga tende a aumentar o pico do sinal de força e a diminuir a sua duração. Logo, maiores amplitudes de força num intervalo de tempo mais curto tendem a manter a área sobre essa curva

aproximadamente a mesma.

O índice de concordância atingiu valores altos, com médias acima de 80% para voga baixa e em torno de 75% para voga alta. Contudo, foi observada uma alta correlação negativa em função da voga, o que sugere que o modelo pode perder a precisão com o aumento da voga quando alimentada pelos sinais registrados pelo atual sistema de aquisição.

Como mostrado no Apêndice B, o sensor que registra a aceleração do barco fica preso no casco do barco, de modo a captar as acelerações na direção em que o casco está apontando a cada momento. Idealmente, a direção apontada pelo casco é permanentemente a direção de deslocamento do barco. No entanto, existem flutuações verticais que se intensificam com o aumento a voga (HIL & FAHRIG, 2009). Esse aumento da flutuação do barco é causado, entre outros fatores, pela oscilação que o casco do barco faz, tendo como referência o eixo latero-lateral do seu movimento. Durante toda a regata, essa oscilação varia periodicamente (com o período da remada) a direção que o casco está apontado ao longo de um arco no plano sagital, o que não corresponde à direção longitudinal ao movimento do sistema que o modelo considera em seus cálculos. Isso poderia explicar a perda da morfologia com o aumento da voga que se reflete na alta correlação negativa da concordância ($r = 0,75$).

Uma possível modificação que poderia solucionar esse problema é a instalação de uma unidade inercial adicionalmente ao acelerômetro (KUGA *et al.*, 2007). Tendo conhecimento aproximado do formato do sistema e onde exatamente a caixa com o acelerômetro está localizada neste, é possível se efetuar um pré-processamento antes do registro dos sinais, que possa filtrar as componentes que não pertencem ao eixo longitudinal ao deslocamento de modo a obter um sinal mais fidedigno.

Outra possível alteração é uma modelagem bidimensional levando em conta o

movimento oscilatório do barco no plano sagital. Nessa conformação, haveria a necessidade de se levar em conta a posição dos componentes do sistema no eixo Z, pois o movimento de cada um dos segmentos do sistema gerariam momentos de força para os dois sentidos no eixo latero-lateral. Nessa perspectiva, poderia haver a análise de mais um fator que altera o desempenho, ou seja, a variação da flutuação do casco do barco ao longo da remada, um dos grandes fatores que causam aumento do arrasto da água no barco (FINDLAY & TURNOCK, 2009).

5.3 Dinâmica Direta

Fazendo uso do sinal de força digitalizado a partir de dados da literatura e do sinal de aceleração dos componentes do remador e da formulação desenvolvida no atual trabalho (Figura 13), o simulador da dinâmica direta foi capaz de reproduzir curvas da cinemática do barco que estivessem em concordância com as tradicionalmente encontradas na literatura (SOPER & HUME, 2004, KLESHNEV, 2009, HILL & FAHRIG, 2009), como também com os sinais coletados.

Os índices dos sinais de saída da dinâmica direta (velocidade e aceleração do barco) mostrados no último parágrafo da seção 4.1 do Capítulo de *Resultados*, mostraram-se assemelhados com os valores típicos para cada índice das aquisições realizadas ao longo do atual trabalho (Figura 26).

O modelo dinâmico desenvolvido por Cabrera *et al.* (2006), diferentemente do proposto neste trabalho, considerou dois sistemas distintos, um composto somente pelo barco e que teve como forças externas a força aplicada a forqueta, no fica-pé e o arrasto da água; e outro composto somente pelo remador, cujas forças externas eram a força no finca-pé e na empunhadura. Todas as forças consideram somente a componente longitudinal ao movimento. A principal diferença entre os dois trabalhos foi a consideração dos componentes barco, remador e remos como fazendo parte de um único

sistema. Nessa conformação o sistema não é constituído por um componente rígido, mas os componentes massivos internos ao sistema que possuem deslocamentos relativos entre si. E levando-se em consideração os resultados obtidos pelo simulador biomecânico na conformação da dinâmica direta, pode-se chegar a padrões típicos de curvas da cinemática do barco considerando um sistema único para os diversos componentes que existem para serem equacionados.

Do modelo atual para o modelo proposto por Cabrera e cols. (2006), a principal diferença foi o que era considerado como sendo o sistema. Para este último, o barco era o sistema, como tal, o equacionamento proposto fez uso das forças externas como sendo a força que o remador fazia no finca-pé, a força que o remo fazia na forqueta e o arrasto da água no casco do barco. Alternativamente, no atual trabalho as forças externas a serem consideradas foram exclusivamente a força de reação da água na pá dos remos e o arrasto da água em função de considerar o sistema como sendo composto por barco, remador e remos. Isso causa algumas mudanças em como a modelagem ocorre. A principal diferença da modelagem proposta no atual trabalho com as que são recorrentes na literatura é que, em função da consideração do sistema ser os três corpos juntos (barco, remador e remos), pode-se entender as morfologias dos perfis das curvas tanto de forças quanto das da cinemática do barco, além de pela força na empunhadura, pelo deslocamento relativo que os segmentos do remador fazem em relação ao barco ao longo da remada.

5.4 Simulação Cinemática 3D

Halkins (2000) afirma que um sistema que possa oferecer um *feedback* da performance, quantificando e mostrando informação sobre a cinemática do remador, é útil para identificação de deficiências técnicas na regata e diferença entre remadores de elite. O sistema de simulação proposto no presente trabalho vai ao encontro desse

objetivo.

Na representação do *catch* o tronco se encontra voltado para frente com os membros inferiores flexionados e os membros superiores estendidos (Figura 33 – lado esquerdo). A simulação correspondente (Figura 33 – lado direito) capturou as principais características dessa fase do ciclo de remada. O mesmo pode ser observado em relação ao momento quando o remo passa perpendicularmente ao barco (Figura 34). No final da fase de apoio, os membros inferiores estão amplamente estendidos e membros superiores flexionados com os remos posicionados para sair da água. Tais características são descritas no lado esquerdo da Figura 35 (quadro da filmagem) e no lado direito da mesma figura (simulação).

A Figura 36 ilustra imagens dificilmente capturadas em filmagens convencionais. As informações dessas projeções ajudam a dirimir dúvidas que, por ventura, ocorram quando somente são usadas as projeções ilustradas nas Figura 33, Figura 34 e Figura 35.

Apesar de o simulador ser capaz de equacionar as principais articulações do remador, em virtude das limitações impostas pela quantidade de sinais biomecânicos usados como entrada, as coordenadas relativas aos joelhos e aos cotovelos são aproximadas. Por isso, caso o remador cometa algum tipo de erro de técnica com essas articulações, o simulador não poderá discriminar precisamente tal erro. No exemplo da Figura 34 o remador executa a fase de propulsão com os cotovelos abaixados, enquanto na correspondente representação gráfica, o cotovelo é colocado no mesmo plano pertencente aos dois ombros e a mão do lado do cotovelo correspondente.

Imagens 2D ou 3D, obtidas por meio de filmagem ou cinematria, possuem as mais variadas aplicações dentro do esporte de alto rendimento. Dentre os principais objetivos das análises decorrentes do uso de tais imagens, podemos citar a avaliação de

estratégias de competição, o desenvolvimento de técnica de treinamento, o monitoramento de atletas, a detecção de indicadores preditivos que caracterizem o comportamento de talentos esportivos, dentre outros (AMADIO & BAUMANN, 1990).

Apesar da técnica de cinemetria poder fornecer dados quantitativos para análise biomecânica do remo, sua logística é complexa em virtude de questões técnicas. A simulação proposta é capaz de reproduzir graficamente o sistema barco-remador-remos fazendo uso de sinais que tipicamente são coletados para análise biomecânica do referido esporte. Adicionalmente, variáveis usadas durante a simulação podem gerar índices que seriam úteis no treinamento de remadores, propiciando uma realimentação objetiva para que o atleta melhore sua técnica de remada (WAGNER *et al.*,1993). Uma das informações que pôde ser fornecida pelas coordenadas da simulação gráfica foi a espessura do laço que a pá do remo faz na água durante o *drive* (Figura 37). Tal índice tem sido citado na literatura como influência na quantidade de água que se perde durante o *drive* para transferência de quantidade de movimento ao longo da trajetória da pá (SLIASAS & TULLIS, 2009).

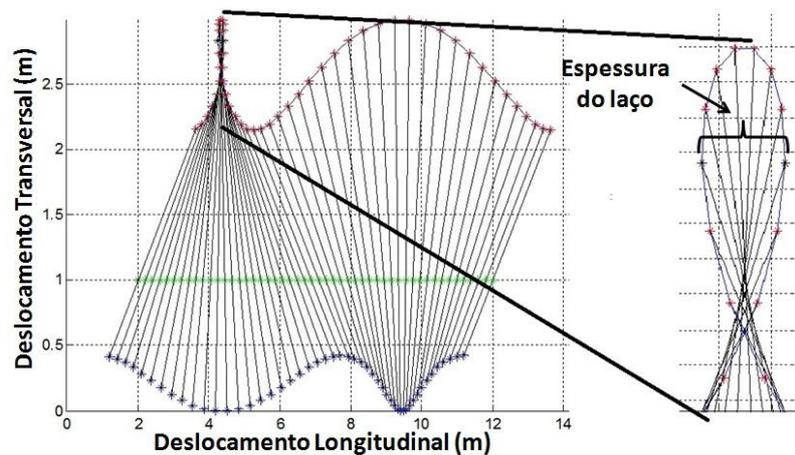


Figura 37: À esquerda é mostrada uma simulação da trajetória da pá ao longo de um ciclo de remada. À direita é mostrado um *zoom* do laço que a pá do remo faz durante o *drive*.

Os estilos de remada podem ser classificados segundo o movimento dos dois

principais segmentos do corpo, os membros inferiores e o tronco. Essa divisão pode ser feita de acordo com os movimentos dos dois segmentos, se estes ocorrem modo simultâneo ou consequente; ou de acordo com o segmento corporal que possui mais ênfase no *drive*, se os membros inferiores ou o tronco (Figura 38). Cada estilo foi consagrado por intermédio de guarnições de projeção internacional, sendo a classificação inicial proposta em 1977 por Klavora e ampliada em 2006 por Valery Kleshnev (KLESHNEV, 2006).

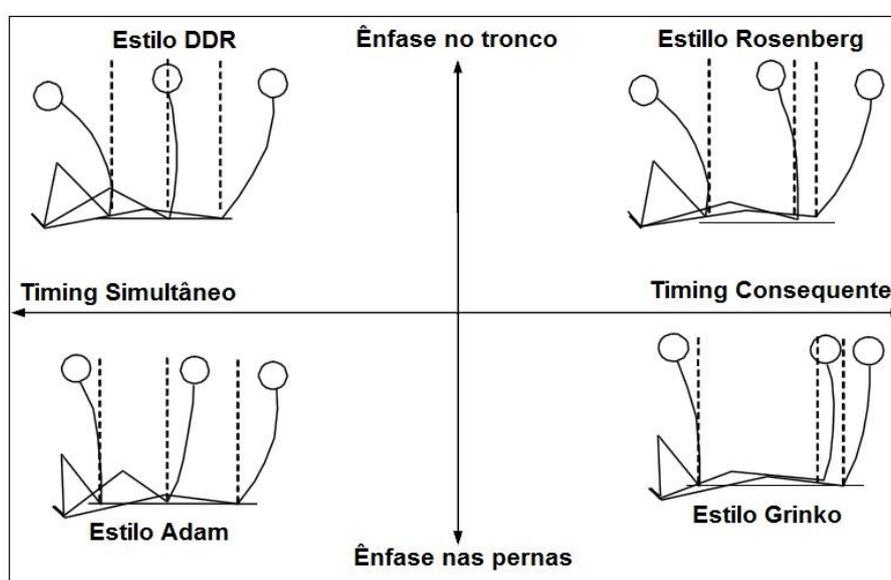


Figura 38: Estilos de remada (adaptado de KLESHNEV, 2006).

O estilo *Rosenberg* é o mais tradicional e faz uso de uma grande flexão do tronco no início da remada sendo seguida de uma larga extensão de membros inferiores com pouca ativação de tronco, que é usado para finalizar a remada. O estilo *Adam* possui maior extensão de pernas no drive em comparação aos outros estilos e apesar do limitado movimento de tronco, o movimento dos dois segmentos (tronco e membros inferiores) é realizado simultaneamente. O estilo *DDR* é caracterizado por uma larga extensão de tronco com ambos os segmentos se movimentando simultaneamente. O estilo *Grinko* usa de grande extensão de membros inferiores, sendo terminado com a

extensão de tronco, mas com pouca amplitude (KLESHNEV, 2006).

A principal vantagem da simulação gráfica proposta é propiciar ao remador, e/ou técnico, a observação da sincronia entre os membros inferiores e o tronco, uma vez que a falta dessa sincronia caracteriza uma deficiência técnica de remada. Além disso, por reproduzir sem maiores aproximações (como ocorre para joelhos e cotovelos) as posições de quadril e tronco, o simulador tem o potencial de discriminar os estilos de remada que o remador realiza, dentre as classificações que levam em conta o movimento relativo entre esses dois segmentos corporais como no trabalho realizado em 2006 por Kleshnev.

Além disso, na experiência de campo que o grupo obteve no Clube de Regatas Flamengo, foi possível notar que a visualização gráfica das regatas que estavam sendo coletado pelo sistema de aquisição, proporcionou uma aproximação por parte da comissão técnica aos relatórios de acompanhamento que eram gerados sobre o desempenho do remador por meio dos sinais.

6 Conclusão

O simulador biomecânico desenvolvido contempla os dois aspectos da prática da remada: o dinâmico, com modos de operação *dinâmica direta* e *dinâmica inversa*. Ele possui limitações pela consideração de perfeita sincronia latero-lateral. Contudo, em função de não isolar partes do sistema, oferece subsídios para a interpretação da influência que cada componente do sistema possui durante a remada. Além disso, no modo da dinâmica direta, é capaz de reproduzir perfis típicos de velocidade e aceleração do barco em magnitudes encontradas nas regatas.

O simulador gráfico, com o equacionamento das coordenadas dos principais pontos do sistema barco-remador-remos, pode ser usado para propiciar realimentação objetiva para o atleta avaliar sua técnica durante a remada. Em função de usar poucos sinais biomecânicos, possui limitações em localizar a posição dos cotovelos e joelhos. Contudo, o simulador consegue reproduzir satisfatoriamente os movimentos relativos entre membros inferiores e tronco, e seu equacionamento pode auxiliar na criação de índices de desempenho, o que vai além de sua proposta inicial.

Como propostas de continuidade sugere-se que o movimento da massa dos remos entre na modelagem dinâmica tendo em vista levar em consideração seu movimento angular. Tal mudança poderia chegar a ajustes mais finos dos resultados a serem alcançados pelo simulador. Além disso, pode-se também estudar a influência das flutuações em direções ortogonais à direção de deslocamento por meio da componente das acelerações nessas direções.

7 Referências

AMADIO, A. C., BAUMANN, W. “Kinetic and electromyographical analysis of the triple jump”. In: **Proceedings of THECHNIQUES in athletics**, pp. 751-752, Sport und Buch Strauss, 1990;

AMADIO, A. C., SERRÃO, J. C. “Contextualização da biomecânica para a investigação do movimento: fundamentos, métodos e aplicações para análise da técnica desportiva”, **Rev Bras Educ Fís Esp**, v. 21, pp. 61-85, 2007.

ATKINSON, W., *Modelling the Dynamics of Rowing*. 2001. Disponível em: <http://www.atkinsoph.com/row/rowrpage.htm>. Acesso em: 10 abr 2011, 13:35:30.

BAPTISTA, R. R., CUNHA, G. S., OLIVEIRA, A. R. “Aspectos fisiológicos e biomecânicos da produção de força podem ser usados no controle do treinamento de remadores de elite”, **Rev Bras Med Esporte**, v. 14, n. 5, pp. 427-430, 2008.

BAUDOIN, A., HAWKINS, D. “Investigation of biomechanical factors affecting rowing performance”, **Journal of Biomechanics** v. 37, pp. 969-976, 2004.

BAUDOIN, A. & HAWKINS, D. “A biomechanical review of factors affecting rowing performance”, **J Sports Med**. v. 36, n. 6, pp. 396-402, 2002.

BORGES, A. C. S., POLATO, D., PINO, A. V., SOUZA, M., N., “Sistema de acelerometria para avaliação objetiva da prática do remo” **XIV Congresso Brasileiro de Biomecânica**, Ribeirão Preto, Barsil, 2011.

BREARLEY, M. N. & DE MESTRE, N. J. “Modeling the rowing stroke and increasing its efficiency”, In: **Proceedings of the 3rd conference on maths and computers in sport**, pp. 35–46, Bond University, 1996.

CABRERA, D., RUINA, A., KLESHNEV, V., “A simple 1+ dimensional model of rowing mimics observed forces and motions”, **Human Movement Science**, v. 25 pp. 192-220, 2006.

CAPLAN, N., GARDNER, T. “A mathematical model of the oar blade-water interaction in rowing”, **Journal of Sports Science**, v. 25, n. 9, pp. 1025-1034, 2007.

CARDOSO, T. P., TCCII, “Análise espaço-temporal do nado crawl em teste máximo de 400 m” Escola de Educação Física, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DAL-MONTE, A., KOMOR, A. “Rowing and sculling mechanics” In: Vaughan, C.L., **Biomechanics of sport**, Boca Raton, Fla., CRC Press, p. 53-119, 1989.

FINDLAY, M. & TURNOCK, S.R., “Mechanics of a rowing stroke: surge speed variations of a single scull”, **J. Sports Engineering and Technology** v. 224, pp. 89-100, 2009.

HAWKINS, D., “A new instrumentation system for training rowers”, **Journal of Biomechanics**, v. 33, pp. 241-245, 2000.

HILL, H., FAHRIG, S. “The impact of fluctuations in boat velocity during the rowing cycle on race time”, **J Med Sci Sports** v. 19, pp. 585-594, 2009.

HOERNER, S. F., “Drag and Theoretical Analysis”, **Fluid-dynamic drag**, 1^a edição, Capítulo 3, New York, *Publicado pelo autor*, 1965.

HOFMIJSTER, M. J., LANDMAN, E. H. J., SMITH, R.M., VAN SOEST, A. J. K., “Effect of stroke rate on the distribution of net mechanical power in rowing”, **J Sports Sci** v. 25 pp. 403-411, 2007.

KLESHNEV, V., “Boat acceleration, temporal structure of the stroke cycle, and effectiveness in rowing”, **J. Sports Engineering and Technology** v. 224, pp. 63-74, 2009.

KLESHNEV, V., *Rowing Biomechanics*. 2006. Disponível em: <http://www.biorow.com/Papers.htm>. Acesso em: 03 nov 2011, 16:50:30.

KUGA, H. K., GUEDES, U. T. V., MENDONÇA, C. B., WENTZ, J. P. T. G., TEIXEIRA, L. M., “Integração de sistema DGPS e unidade inercial para navegação precisa de aeronave em tempo real” **V Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial**, pp. 80-84, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

MILLWARD, A. “A study of the forces exerted by an oarsman and the effect on boat speed”, **J Sports Sci**, v. 5, pp. 93-103, 1987.

NUNES, M. O., SOUZA, M. N., PINO, A. V., WEBERSZPIL, J., “Simulador para análise de desempenho numa prova de remo através de variáveis biomecânicas pertinentes ao remador” **XIV Congresso Brasileiro de Biomecânica**, Ribeirão Preto, SP, 2011.

NUSSENZVEIG, H. M., “Conservação do Momento”, **Curso de Física Básica – vol. 1**, 4^a edição, Capítulo 8, São Paulo, Editora Edgard Blücher, 2002.

OLIVEIRA, L. G., M.Sc., “Influência do posicionamento das pedaleiras do remo ergômetro na potência e impulso” Escola de Educação Física. Pós-Graduação em Ciência do Movimento Humano, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PAGE, P., HAWKINS, D., “A real-time biomechanical feedback system for training in rowers”, **Sports Engineering** v. 6, pp. 67-80, 2003.

POPE, D. L. “On the dynamics of men and boats and oars”, **Mechanics and Sport**, pp. 113–130, 1973.

RITCHIE, A. C., “Dynamic modeling of ergometer and on-water rowing”, **Sports Technol**, vol.1, n. 2, pp. 110-6, 2008.

SANDERSON, B. & MARTINDALE, W. "Towards optimizing rowing technique", **Medicine and Science in Sports and Exercises**, v. 18, pp. 454-468, 1986.

SCHWANITZ, P. "Applying biomechanics to improve rowing performance" **19th FISA Coaches Conference**, pp. 9-13, Athens, Greece, 1991.

SIMEONI, R. J., BARRETT, R., & MANNING, J. M. "A new model of rowing based on simple physics," **The Physicist**, v. 39, pp. 190-197, 2002.

SLIASAS, A., TULLIS, S. "The dynamic flow behaviour of an oar blade in motion using a hydrodynamics-based shell-velocity-coupled model of a rowing stroke", **J Sports Engineering and Technology** v. 224, pp. 9-24, 2009.

SOPER, C., HUME, P. A. "Towards an ideal rowing technique for performance", **Sports Med** v. 34, n. 12, pp. 825-848, 2004.

STEINACKER, J. M., "Physiological aspects of training in rowing", **Int J Sports Med** v. 14 Suppl S1:S3, pp. 10, 1993.

STEINACKER, J. M., SECHER, N. H. "Advances in physiology and biomechanics of rowing", **Int J Sports Medicine**, sup 1 v. 14, pp. S1-S2, 1993.

VAN HOLST, M., *Theory and Model*. 1996. Disponível em: <http://home.hccnet.nl/m.holst/Model.pdf>. Acesso em: 05 abr 2011, 14:30:00.

WAGNER, J., BARTMUS, U., De MARÉES, H., "Three-axes gyro system quantifying the specific balance of rowing" **Int J Sports Med** v. 14, pp. 35-38, 1993.

Apêndice A: Glossário

- **Alavanca interna:** Distância entre a empunhadura e o anel.
- **Alavanca externa:** Distância entre o anel e o centro geométrico da pá.
- **Anel:** Círculo de plástico colocado em volta do remo para este não deslizar pela forqueta.
- **Ângulo horizontal:** Ângulo que o remo descreve no plano XY.
- **Ângulo vertical:** Ângulo que o remo descreve no plano YZ.
- **Bola de proa:** Bola colocada no bico do barco por segurança. Tem como objetivo minimizar os efeitos de possíveis choques.
- **Bombordo:** Lado direito do remador, esquerdo do barco visto da ré para a proa.
- **Boreste:** Lado esquerdo do remador, direito do barco visto da ré para a proa.
- **Braçadeira:** Em forma triangular, está presa a borda do barco e sustenta a forqueta.
- **Carrinho:** Assento deslizante.
- **Catch:** Momento que marca o início da fase ativa do ciclo da remada, acontece com a imersão da pá na água.
- **Drive:** Mesmo que fase ativa.
- **Empunhadura:** Cabo do remo onde o remador aplica a força.
- **Fase ativa:** Fase de apoio no ciclo da remada em que a pá do remo está submerso.
- **Fase passiva:** Fase sem apoio no ciclo da remada em que a pá do remo está acima do nível da água.
- **Finca-pé:** Suporte ajustável cuja finalidade é deixar os pés fixos ao barco.
- **Forqueta:** Suporte do remo nas bordas do barco. Fica na extremidade da braçadeira e gira em torno de um pino de metal, sendo fechado por uma cancela.

- **Guarnição:** Mesmo que equipe de remadores da embarcação.
- **Recovery:** Mesmo que fase passiva.
- **Regata:** Prova de remo.
- **Remo:** Corpo longo provido de empunhadura e pá, usado pelo remador para dar propulsão ao barco.
- **Skiff Simples:** Mesmo que *single skiff*, embarcação de um único remador com palamenta dupla.
- **Pá:** Extremidade distal do remo.
- **Palamenta dupla:** Classificação para o barco no qual para cada remador há dois remos.
- **Palamenta simples:** Classificação para o barco no qual para cada remador há um único remo.
- **Popa:** Ponta traseira do barco, no sentido para onde ele se desloca.
- **Proa:** Ponta dianteira do barco, no sentido para onde ele se desloca.
- **Velocidade de cruzeiro:** Velocidade após ter passado o *sprint* inicial. Também chamado de velocidade de *steady-state*.

Apêndice B: Sistema de Aquisição de Sinais

O sistema de aquisição faz uso de um *datalogger* (Logomatic v2, Sparkfun, EUA) que utiliza um microcontrolador (LPC2148, *NXP Semiconductors*, EUA), o qual possui 8 canais de conversão A/D de 12 bits e possibilita o armazenamento dos dados em um cartão de memória MicroSD de 2 GBytes. O sistema conta ainda com um receptor de GPS (Venus634FLPx, *Skytraq*, Taiwan). O sistema foi montado em uma caixa plástica com fechamento hermético de modo a proteger o circuito da entrada de água (Figura 39). A amostragem do GPS é feita a uma taxa de 10Hz por uma entrada serial, enquanto a amostragem dos canais analógicos é feita numa taxa de 100Hz.



Figura 39: Foto do sistema de aquisição de dados biomecânicos de remo do LIB mostrando as duas entradas para sinais externos. As dimensões da caixa são 10 cm x 13 cm x 7 cm.

– Sinais da Cinemática do Barco

O sinal de aceleração do barco foi obtido por meio de um acelerômetro MMA7260Q (*Freescale*) fixado internamente à caixa do sistema e com alinhamento do adequado para registrar deslocamento longitudinal do barco. Como a linha de base de acelerômetros monolíticos varia em função do ângulo que os dispositivos fazem com a aceleração da gravidade, métodos de integração numérica não são suficientemente precisos para, sozinhos, obter os sinais de velocidade e deslocamento do barco. Para obter tais sinais, a integral do sinal do acelerômetro foi corrigida por uma linha de base

determinada pela derivada primeira do sinal de posição do barco fornecido pelo GPS, o qual também estava condicionado dentro da caixa do *datalogger* (Figura 40).

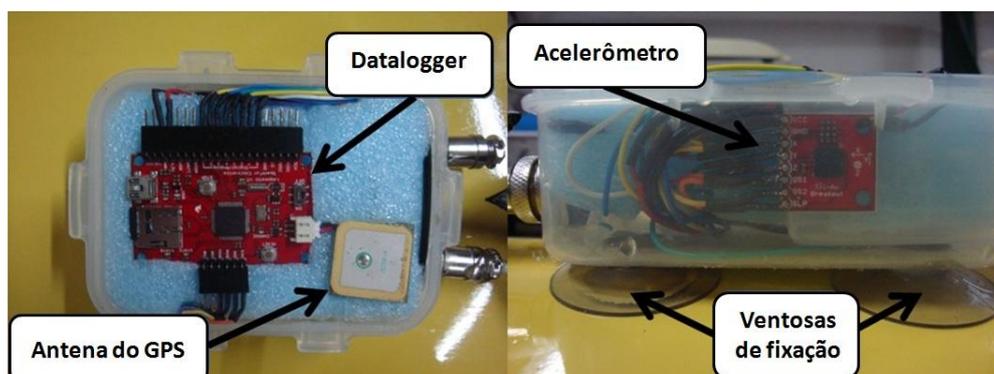


Figura 40: À esquerda tem-se a visão superior do sistema mostrando o *datalogger* e a antena do GPS. À direita tem-se a visão lateral do sistema mostrando o acelerômetro e as ventosas usadas para fazer a fixação da caixa no casco do barco.

– Sinais de Ângulos dos Remos

O sinal de ângulo do remo foi obtido por meio de um goniômetro potenciométrico preso à forqueta (peça de contenção fixada ao barco na qual o remo acopla para realizar o seu movimento angular) (Figura 41). O sensor apresenta uma não-linearidade da ordem de 1,27%.

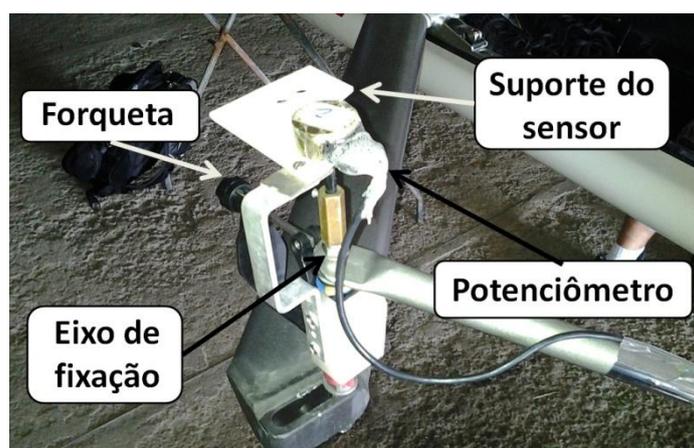


Figura 41: Sensor de aquisição do sinal de ângulo do remo. O eixo do potenciômetro, preso ao eixo de fixação da forqueta, fica parado em relação ao barco, enquanto a o corpo da forqueta gira junto com o suporte onde está preso o corpo do potenciômetro.

– Sinais da Cinemática do Remador

Para aquisição da posição do carrinho e do tronco do remador foram construídos sensores potenciométricos lineares. Em cada sensor um fio, com uma presilha numa das extremidades, ficou enrolado numa polia acoplada a uma mola espiral de um lado e a um potenciômetro multivoltas do outro (Figura 42). Conforme o fio é puxado pelo carrinho ou pelas costas do remador, a mola espiral acumula energia potencial elástica fazendo o fio retornar junto com o movimento do componente do sistema a que ele é preso. Em função dos remadores fazerem movimentos demasiadamente abruptos e o sistema do sensor ser mecânico, a presilha foi conectada a extremidade do fio através de um elo fraco que arrebentaria antes de danificar o sensor, caso o fio emperrasse por qualquer motivo durante a regata.

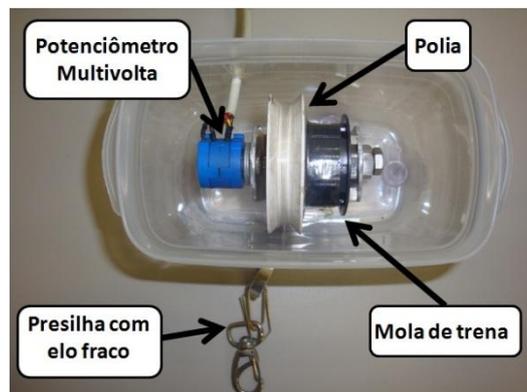


Figura 42: Foto do sensor potenciométrico linear usado para fornecer sinais de posição do carrinho e do tronco do remador.

A presilha do sensor do carrinho fica presa num suporte de alumínio que é fixado através de lacres plásticos nos eixos das rodinhas por baixo do carrinho (Figura 43 à esquerda). A presilha do sensor do remador fica enganchada numa correia que envolve a parte de trás do macacão do remador (Figura 43 à direita).



Figura 43: À esquerda é mostrado o suporte que fica fixado embaixo do carrinho, preso por lacres plásticos ao redor dos eixos das rodinhas. À direita é mostrada a presilha presa ao tronco do remador que mantém a extremidade do fio aproximadamente na altura da vértebra T7.

O fio preso às costas do remador passava por uma polia externa de modo a fazer este ficar aproximadamente na altura da sétima vértebra torácica. A polia era sustentada por uma haste com base na parte de cima do casco do barco e o topo fixado por três cordas aproximadamente inextensíveis, uma presa a bola de proa e as outras duas presas ao início de cada braçadeira (Figura 44). Durante a remada, o movimento das costas do remador não descreve um movimento exatamente retilíneo na direção do deslocamento do barco. Se considerarmos o carrinho como referência, o tronco descreve um movimento aproximadamente ao longo de um arco, contudo, como aproximação para cálculo, esse movimento foi considerado retilíneo.

Os sinais de velocidade e aceleração relativas do carrinho e do remador foram obtidos através da derivada temporal dos sinais dos potenciômetros. As não linearidades dos goniômetros potenciométricos do carrinho e do tronco do remador foram, respectivamente 1,88% e 2,03%.



Figura 44: Sistema de aquisição de dados biomecânicos montado na íntegra.

Apêndice C: Experimento para determinação do coeficiente K

Um remador foi orientado a fazer uma sequência de dez remadas fortes simulando a largada de uma regata, quantidade suficiente para fazer o sistema chegar à velocidade de cruzeiro, e em seguida esticar as pernas e manter o tronco rígido para ficar parado em relação ao barco e manter a pá dos remos paralela à superfície da água e perpendiculares em relação ao barco. Durante esse trecho considerou-se que a força resultante atuante no sistema foi unicamente a força de arrasto da água no casco. Igualando o segundo membro da (XI) com o produto da massa do sistema pela aceleração do barco (que representa a aceleração do sistema nessa situação em que o remador encontra-se parado em relação ao barco) previsto pela segunda lei de Newton, podemos determinar K . Os experimentos em que havia condições climáticas ou de lagoa desfavoráveis (chuva, vento e marola) foram descartados desta análise.

O valor do coeficiente K estimado experimentalmente foi de 5,2 kg/m por meio da média de 12 trechos ao longo dos treinos que se mostraram bons para análise ($n = 12$). Na determinação experimental da constante de arrasto (K) foi realizado a minimização do erro entre o sinal gerado pelo produto entre a massa do sistema e a aceleração do barco (que não situação proposta foi considerada como a aceleração do sistema) e o sinal gerado pelo produto entre um coeficiente constante (que representou a constante de arrasto) e o quadrado da velocidade do barco (Figura 45). A minimização do erro foi feita por meio do Método dos Mínimos Quadrados.

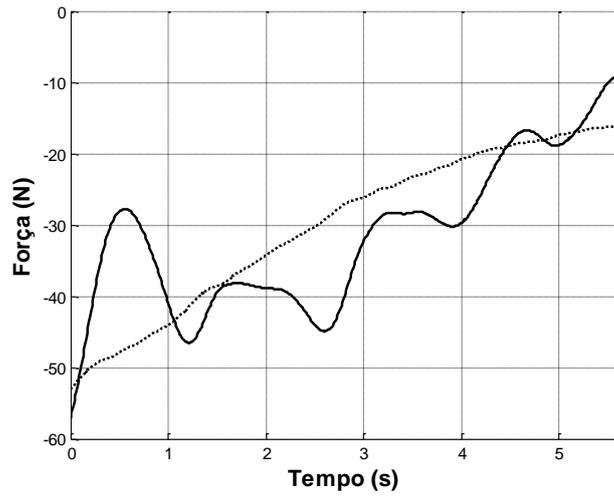


Figura 45: Trecho da força de arrasto VS tempo. Em linha contínua tem-se o produto massa-aceleração ($m_s a_s$) enquanto em linha descontinua tem-se o produto da constante de arrasto com o quadrado da velocidade (KV_b^2).

Apêndice D: Ficha de Aquisição de Dados

- Dados Gerais

Nome do remador: _____

Data da aquisição: ____/____/____ Peso da embarcação: _____ Kg

Modalidade/Nome do barco: _____

Peso do remador: _____ Kg Idade: _____ anos Altura: _____ cm

Aquecimento: _____ Km Quantidade de tiros: _____ Tiro: _____ Km

- Condições Climáticas:

Chuva:

- Forte; Fraco; Sem chuva;

Vento:

- Forte; Fraco; Sem vento;
- À favor; Contra; Lateral;

Lagoa:

- Marola forte; Marola fraca; Sem marola
- À favor; Contra; Lateral;

Neblina:

- Com neblina; Sem neblina;

- Regulagem

Alavanca Interna: _____ cm Alavanca Externa: _____ cm

Distância entre forquetas: _____ cm Altura da braçadeira: _____ cm

Distância longitudinal entre as forquetas e o finca-pé: _____ cm

Observações: _____
