



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Michele Nunes Morgado

**Modelagem, Identificação e Simulação da Dinâmica de um Pequeno
Veículo Flutuante**

Rio de Janeiro

2016

Michele Nunes Morgado

**Modelagem, Identificação e Simulação da Dinâmica de um Pequeno Veículo
Flutuante**



Projeto de graduação apresentado, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, à Faculdade de Engenharia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. José Paulo Vilela Soares da Cunha

Rio de Janeiro

2016

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M847 Morgado, Michele Nunes.
Modelagem, identificação e simulação da dinâmica de um
pequeno veículo flutuante / Michele Nunes Morgado. - 2016.
82 f.

Orientador: José Paulo Vilela Soares da Cunha.
Projeto final (Graduação) – Universidade do Estado do Rio
de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
Bibliografia p. 80-82.

1. Engenharia Elétrica. 2. Modelagem e simulação. 3.
Embarcação. I. Cunha, José Paulo Vilela Soares da. II.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 621.3

Michele Nunes Morgado

**Modelagem, Identificação e Simulação da Dinâmica de um Pequeno Veículo
Flutuante**

Projeto de graduação apresentado, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, à Faculdade de Engenharia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovado em 27 de julho de 2016.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Paulo Vilela Soares da Cunha (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Paulo Bulkool Batalheiro
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Andrei Giordano Holanda Battistel
Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro
2016

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, José Paulo, pela paciência, esforço, ensinamentos e dedicação sem os quais não seria possível a realização deste projeto.

A Rafael Vida pela ajuda no projeto.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste projeto.

Superar é preciso.
Seguir em frente é essencial.
Olhar para trás é perda de tempo.
Passado se fosse bom era presente.

(Clarice Lispector)

RESUMO

MORGADO, Michele Nunes. *Modelagem, Identificação e Simulação da Dinâmica de um Pequeno Veículo Flutuante*. 82f. Projeto Final (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

Neste projeto são apresentados a modelagem e a identificação de parâmetros do modelo dinâmico para uma pequena embarcação de superfície. Para a aquisição da posição da embarcação foi utilizado o sistema de captura de movimento da Vicon. O modelo descrito para a embarcação foi validado pela comparação de simulações com resultados experimentais.

Palavras-chave: Modelagem, identificação de parâmetros, embarcação de superfície, sistema de captura de movimento, Vicon.

ABSTRACT

MORGADO, Michele Nunes. *Modeling, Identification and Simulation of a Small Floating Vehicle Dynamics*. 82f. Final Monography (Electrical Engineering Graduation) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

This project modeling and identification of dynamic model parameters for a small surface boat are presented. For acquisition of the boat position a motion capture system Vicon was used. The model described for the boat was validated by comparing the simulation with experimental results.

Keywords: Modeling, identification parameters, surface boat, motion capture system, Vicon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Charlie USV em Gênova-----	14
Figura 2 - Stingray USV-----	14
Figura 3 - Trimarã-----	15
Figura 4 - Projeto desenvolvido por Schultze-----	16
Figura 5 - Embarcação utilizada no projeto-----	17
Figura 6 - Diagrama em blocos do sistema utilizado no projeto-----	18
Figura 7 - Rotações entre sistemas de referência-----	23
Figura 8 - Sistemas de referência-----	27
Figura 9 - Embarcação e os sistemas de coordenadas-----	28
Figura 10 - Disposição dos propulsores instalados no barco-----	34
Figura 11 - Layout do sistema-----	44
Figura 12 - Câmeras-----	45
Figura 13 - Mx Giganet-----	45
Figura 14 - Máscaras-----	48
Figura 15 - Tela de calibração-----	48
Figura 16 - Calibrador-----	49
Figura 17 - Tela de calibração-----	50
Figura 15 - Marcadores-----	51
Figura 19 - Marcadores fixados no barco-----	51
Figura 20 - Sistema de coordenadas do barco -----	51
Figura 21 - Driver baseado no CI L298-----	53
Figura 22 - Motor Shield-----	54
Figura 23 - Modo de seleção de jumpers-----	55
Figura 24 - Terminais do motor-----	55
Figura 25 - Microcontrolador Arduino Uno-----	57
Figura 26 - Aplicações do Zigbee-----	59
Figura 27 - Xbee ligado a uma placa Arduino sem o microcontrolador-----	60
Figura 28 - Movimento longitudinal-----	62
Figura 29 - Movimento lateral-----	62

Figura 30 - Movimento rotacional-----	62
Figura 31 - Diagrama em blocos para a identificação de parâmetros desenvolvido no Simulink-----	63
Figura 32 - Casamento da posição da embarcação para obtenção de C_x^+ -----	65
Figura 33 - Casamento da posição da embarcação para obtenção de C_x^- -----	66
Figura 34 - Casamento da posição da embarcação para obtenção de C_y^+ -----	67
Figura 35 - Casamento da posição da embarcação para obtenção de C_y^- -----	68
Figura 36 - Casamento da posição da embarcação para obtenção de C_ψ^+ -----	69
Figura 37 - Casamento da posição da embarcação para obtenção de C_ψ^- -----	70
Figura 38 - Validação da posição da embarcação em C_x^+ -----	73
Figura 39 - Validação da posição da embarcação em C_x^- -----	74
Figura 40 - Validação da posição da embarcação em C_y^+ -----	75
Figura 41 - Validação da posição da embarcação em C_y^- -----	76
Figura 42 - Validação da posição da embarcação em C_ψ^+ -----	77
Figura 43 - Validação da posição da embarcação em C_ψ^- -----	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Notação de SNAME(1950) para embarcações -----	21
Tabela 2 - Programa em Matlab para a inicialização dos motores-----	56
Tabela 3 - Função em Matlab para o acionamento dos motores-----	56
Tabela 4 - Características dos motores PM 100-SG-----	57
Tabela 5 - Valores obtidos de C_x, C_y e C_ψ -----	71
Tabela 6 - Valores de α_i^* -----	72

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
Objetivo	17
Descrição do projeto	17
Organização do Texto	18
1 MODELAGEM DE EMBARCAÇÕES MARINHAS	19
1.1 Equações de Movimento de Embarcações Marinhas	19
1.1.1 Variáveis do Movimento	20
1.2 Transformações entre o Sistema de Coordenada Fixo no Corpo e o Sistema Inercial	21
1.2.1 Ângulos de Euler	22
1.2.2 Transformação de Rotação	23
1.2.3 Rotação Principal	24
1.2.4 Transformação de Velocidade Linear	24
1.2.5 Transformação de Velocidade Angular	25
1.2.6 Equação Cinemática	25
1.3 Modelo da Dinâmica da Embarcação	26
1.3.1 Sistemas de Coordenadas Adotados	27
1.3.2 Matriz de Inércia	29
1.3.3 Momentos de Inércia	30
1.3.4 Matriz de Inércia do Corpo Rígido	30
1.3.5 Matriz Coriolis-centrípeta	31
1.3.6 Matriz de Massas Adicionais	31
1.4 Amortecimento	32
1.5 Esforços Ambientais	32
1.6 Identificação do Empuxo Real Aplicado pelos Propulsores	33
1.6.1 Modelo dos Propulsores	33
1.7 Modelo Simplificado para Três Graus de Liberdade	35
2 SISTEMA DE CAPTURA DE MOVIMENTO	39
2.1 Exemplos de Sistemas de Captura de Movimento	39

2.1.1	Sistemas Acústicos	40
2.1.2	Sistemas Eletromecânicos	40
2.1.3	Sistemas Magnéticos	41
2.1.4	Sistemas Ópticos Eletrônicos	41
2.2	Descrição e Caracterização de Sistemas Ópticos Eletrônicos	42
2.3	Sistema Vicon	43
2.3.1	Câmeras	45
2.3.2	MX Gigaset	45
2.3.3	<i>Software Vicon Tracker</i>	46
2.4	Calibração do Sistema	46
2.4.1	Definição da Origem das Coordenadas	50
2.4.2	Criando Objetos	50
3	ACIONAMENTO DOS PROPULSORES, MICRONTROLADOR E COMUNICAÇÃO DE UM PEQUENO BARCO	53
3.1	Acionamento dos propulsores	53
3.2	Microcontrolador	57
3.3	Comunicação sem Fio	58
3.4	Xbee	59
3.5	Pacote de suporte do Matlab para o Arduino	60
4	IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS	62
4.1	Identificação de C_x^+ e C_{nx}^+	64
4.2	Identificação de C_x^- e C_{nx}^-	66
4.3	Identificação de C_y^+ e C_{ny}^+	67
4.4	Identificação de C_y^- e C_{ny}^-	68
4.5	Identificação de C_ψ^+	69
4.6	Identificação de C_ψ^-	70
4.7	Identificação de Parâmetros dos Propulsores	71
5	VALIDAÇÃO DO MODELO IDENTIFICADO	73
5.1	Resultados obtidos para C_x^+	73
5.2	Resultados obtidos para C_x^-	74

5.3	Resultados obtidos para C_y^+	74
5.4	Resultados obtidos para C_y^-	76
5.5	Resultados obtidos para C_ψ^+	77
5.6	Resultados obtidos para C_ψ^-	78
	CONCLUSÃO	79
	Propostas para trabalhos futuros	79
	REFERÊNCIAS	80

INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais causados pelo homem ao meio ambiente, principalmente nos rios, mares e as mudanças climáticas têm motivado cientistas, pesquisadores e engenheiros de todo mundo a desenvolverem projetos voltados para o monitoramento ambiental, a fim de entender os complexos processos associados ao meio ambiente.

De acordo com Schultze (2012), grande parte das medições ambientais são realizadas através de embarcações de pesquisa, cuja a manutenção e operação para este fim tem um custo muito alto, e por boias que têm o inconveniente de demandarem muito trabalho para seu lançamento, operação e manutenção. Outros inconvenientes são as dificuldades de se coletar dados em situações de clima e tempo adversos e o risco de exposição a áreas inapropriadas.

Os avanços nas áreas de instrumentação, automação e controle, e os interesses de se estudar a qualidade das águas e atmosfera têm estimulado um progresso na área de veículos de pesquisa não tripulados tais como aviões, submarinos e embarcações de superfície.

Os USV's (*Unmanned Surface Vehicles*) são veículos de superfície não tripulados com comando humano realizado à distância. Veículos de superfície não tripulados preenchem um espaço cada vez mais importante no desenvolvimento dos veículos robóticos, equipados com sensores apropriados podem coletar informações sobre o ambiente e transmitir os dados coletados a uma alta taxa de transmissão. Como parte de uma rede de veículos autônomos, um USV pode fornecer uma interface móvel entre terra, ar e espaço, agindo sozinho ou em equipe, pode caracterizar um ambiente e fornecer mapas batimétricos para um supervisor humano, por exemplo.

Na Figura 1 pode-se ver um exemplo deste tipo de veículo o Charlie USV, um pequeno protótipo de catamarã autônomo com 2,40 m de comprimento, 1,70 m de largura, 300 kg. O veículo foi originalmente designado e desenvolvido pelo *Consiglio Nazionale delle Ricerche-Istituto di Studi sui Sistemi Intelligenti per l'Automazione* (CNR-ISSIA), para coletar amostras de microcamadas do oceano e dados da

interface entre ar-oceano na Antártica, (Bibuli, et al., 2011).



Figura 1 - Charlie USV em Gênova. Extraído de: (Bibuli, et al., 2011).

Outro exemplo é apresentado na Figura 2, uma embarcação que a marinha Israelense utiliza, o *Stingray*. O *Stingray* USV foi projetado para aplicações de segurança interna e aplicações da guarda costeira, incluindo rotas de navegação e missões de busca subaquática. Aplicações potenciais de combate navais incluem também identificação de alvo, reconhecimento e vigilância.

O *Stingray* USV pode operar de forma autônoma ou ser controlado remotamente por um operador localizado da estação na terra ou a bordo do navio. A velocidade máxima é de até aproximadamente 74 km/h, com autonomia de mais de oito horas de operação, (Bibuli, et al., 2011).



Figura 2 - Stingray USV. Extraído de: (Bibuli, et al., 2011).

No Brasil uma embarcação não tripulada, mostrada na Figura 3, está sendo desenvolvida no Laboratório de Instrumentação Virtual e Microprocessadores (LIVMP), sediado no Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da USP. Controlado à distância o Trimarã, poderá realizar observações de peixes e da qualidade da água sem necessidade de reabastecimento frequente devido ao uso de velas, motor elétrico e energia solar, (Almeida, 2014).

A embarcação é projetada para águas fluviais (rios, lagos, represas), sem quedas d'água. A utilização em águas marítimas poderá ser viabilizada com a construção de um veículo de maior porte. O protótipo possui uma estrutura com três cascos, denominada trimarã, com um casco principal e dois laterais. Essa distribuição permite maior estabilidade lateral.

O veículo pode ser dirigido automaticamente. A navegação é feita com auxílio de GPS (*Global Positioning System*). Os indicadores de posicionamento servem para ajustar os ângulos da vela e do leme, conduzindo o Trimarã ao local desejado.

Quando o veículo é impulsionado pelas velas, a energia de deslocamento é resgatada para uma bateria, para uso nos motores. O funcionamento pode prosseguir por até 48 horas, caso não haja luz solar ou ventos.

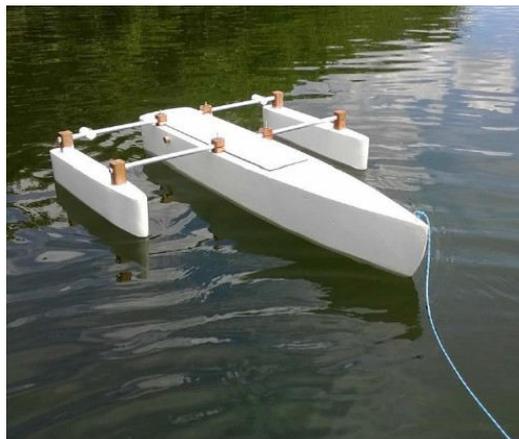


Figura 3 - Trimarã. Extraído de: (Almeida, 2014).

Outro exemplo de embarcação, mostrada na Figura 4, foi desenvolvida por Schultze (2012), uma embarcação aquática de superfície, de pequeno porte,

teleoperada e de baixo custo que poderá realizar monitorações ambientais e medições meteorológicas. A embarcação é composta por um casco único, dois motores na popa (porção traseira da embarcação), uma bateria e uma caixa estanque onde todos os equipamentos eletrônicos estão contidos.



Figura 4 - Projeto desenvolvido por Schultze. Extraído de: (Schultze, 2012).

Outro exemplo de veículo de superfície não tripulado brasileiro é o que foi utilizado neste projeto, que pode ser observado na Figura 5. A embarcação foi desenvolvida por Amaral (2008) para estudos de sistema de posicionamento dinâmico. Posteriormente a mesma embarcação foi utilizada por Sokal (2010) para o desenvolvimento de um sistema de posicionamento dinâmico baseado em controle a estrutura variável e servovisão. Anos depois a embarcação foi modernizada por Buoro (2013), que desenvolveu o controle e a comunicação da embarcação sem fio, utilizando um protocolo denominado Zigbee.

A embarcação consiste basicamente de uma base de madeira onde encontram-se instalados os três propulsores: dois deles posicionados lateralmente de maneira a controlar o movimento lateral da embarcação e o ângulo de rumo, e o outro propulsor posicionado na popa (parte traseira) que é responsável pelos movimentos para frente e para trás. Embaixo da base de madeira está fixada uma placa de isopor que funciona como flutuador.



Figura 5 - Embarcação utilizada no projeto.

Objetivo

O presente projeto visa a identificação dos parâmetros do modelo dinâmico de um pequeno barco. O modelo será validado pela comparação de simulações com resultados experimentais. Tem-se em vista que o modelo poderá ser utilizado no desenvolvimento de controladores para embarcações.

Descrição do projeto

A Figura 6 apresenta o diagrama em blocos do sistema utilizado no projeto para a aquisição da posição e orientação do barco, para posteriormente ser realizada a identificação dos parâmetros do mesmo. O sistema utilizado para aquisição da posição e orientação da embarcação é o sistema de captura de movimento da Vicon. Para a comunicação sem fio entre a embarcação e o computador foi utilizado o protocolo ZigBee. Para agregar os *drivers*, utilizados no acionamento dos motores, e o sistema de comunicação sem fio foi utilizado o microcontrolador Arduino Uno.

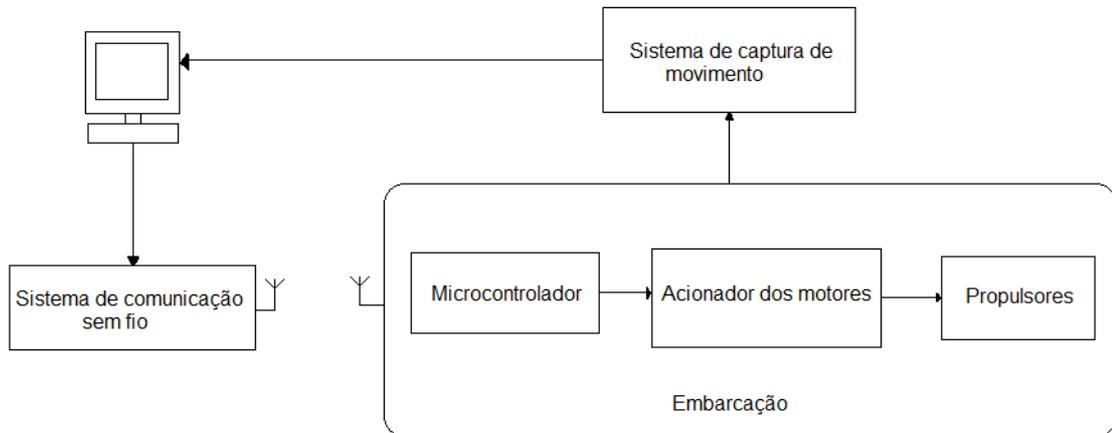


Figura 6 - Diagrama em blocos do sistema utilizado no projeto

Organização do Texto

O texto é organizado em cinco capítulos: O Capítulo 1 trata da modelagem de embarcações marítimas. No Capítulo 2 são apresentados exemplos de sistemas de captura de movimento e é descrito o sistema escolhido para o projeto. No Capítulo 3 é apresentado o sistema de acionamento dos propulsores da embarcação. O Capítulo 4 apresenta o procedimento para a identificação de parâmetros e os experimentos de identificação. No Capítulo 5 é apresentada a validação do modelo identificado. Ao final são discutidas as conclusões obtidas durante o desenvolvimento do projeto e as propostas para trabalhos futuros.

1 MODELAGEM DE EMBARCAÇÕES MARINHAS

A importância de determinar a capacidade de manobra e o comportamento de uma embarcação nas mais diversas condições é fundamental para o sucesso de um novo projeto, para a segurança da navegação, e de todos os que estão a bordo.

A existência de um modelo para qualquer sistema que se pretende controlar é crucial, já que permite um conhecimento profundo do processo a ser controlado, bem como das suas limitações, permitindo uma avaliação mais rigorosa do desempenho do sistema.

O modelo matemático descreve o comportamento dinâmico do veículo marinho. A mecânica Newtoniana é geralmente utilizada para a referida modelagem, onde a principal dificuldade consiste na determinação de diversos coeficientes que permitirão conhecer os esforços que atuam sobre os corpos. De acordo com Santana (2010), a modelagem matemática é complexa e pode ser dividida em vários modelos tais como: o modelo cinemático; o modelo dinâmico; modelos dos sistemas de controle (atuadores, propulsores e sensores); e modelos de perturbações que atuam sobre o veículo. O modelo matemático de um veículo marinho é importante, visto que a maioria dos métodos para previsão do comportamento precisam do conhecimento deste.

1.1 Equações de Movimento de Embarcações Marinhas

As equações de movimentação de embarcações marinhas demandam estudos em campos fundamentais da mecânica: estática e dinâmica. A Estática manipula as forças que produzem o equilíbrio nos corpos em estudo, tais como empuxo e gravidade, enquanto a dinâmica tem como objetivo a análise de esforços no contexto da movimentação produzida no corpo.

De acordo com Fossen (2002), as equações de movimento de embarcações marinhas podem ser escritas em notação vetorial como:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + g_0 + w, \quad (1)$$

e

$$\dot{\eta} = J(\eta)v. \quad (2)$$

Nas quais:

M é a matriz de inércia do sistema incluindo massas adicionais;

$C(v)$ é a matriz de Coriolis-centrípeta incluindo massas adicionais;

$D(v)$ é a matriz de amortecimento;

v é a velocidade do veículo;

\dot{v} é a aceleração do veículo;

$g(\eta)$ é o vetor de momentos, forças gravitacionais e flutuação;

η representa a posição e atitude do veículo;

τ é o vetor de forças e momentos gerados pelos propulsores;

g_0 é o vetor utilizado em controle de lastro;

w é o vetor referente a distúrbios ambientais (ventos, ondas e correntezas);

$J(\eta)$ é a matriz Jacobiana de transformação cinemática.

1.1.1 Variáveis do Movimento

Para embarcações em movimento com seis graus de liberdade (*Degrees Of Freedom* - DOF), seis coordenadas independentes são necessárias para determinar a posição e a orientação. As três primeiras coordenadas e suas derivadas correspondem à posição e ao movimento de translação ao longo dos eixos x , y , e z , enquanto que as últimas três coordenadas e as suas derivadas são utilizadas para descrever a orientação e movimentos de rotação. Para embarcações, as seis componentes de movimento são convenientemente definidas como: avanço (*surge*), deriva (*sway*), afundamento (*heave*), jogo (*roll*), arfagem (*pitch*) e guinada (*yaw*), conforme Tabela 1 (Fossen, 2002).

Para o barco utilizado no projeto, serão realizadas posteriormente considerações e o modelo do movimento do barco será simplificado para três graus

de liberdade.

Tabela 1 - Notação SNAME (1950) para embarcações marítimas.

DOF		Forças e Momentos	Velocidade Linear e Angular	Posição e Ângulos de Euler
1	Movimento na direção x (surge)	X	u	x
2	Movimento na direção y (sway)	Y	v	y
3	Movimento na direção z (heave)	Z	w	z
4	Rotação sobre o eixo x (roll)	K	p	ϕ
5	Rotação sobre o eixo y (pitch)	M	q	θ
6	Rotação sobre o eixo z (yaw)	N	r	ψ

1.2 Transformações entre o Sistema de Coordenadas Fixo no Corpo e o Sistema de Coordenadas Inercial

As relações cinemáticas são obtidas por meio de três transformações lineares sucessivas, que representam as rotações necessárias para coincidir as direções dos eixos do sistema de referência fixo com aquelas do sistema móvel. Como as matrizes finais são obtidas por operações que envolvem o produto das matrizes de rotação (que é uma operação não necessariamente comutativa), a ordem escolhida para as rotações influencia o resultado final (Fossen, 2002).

A matriz de rotação R entre dois sistemas de coordenadas a e b é denotada como R_b^a , e é um elemento em $SO(3)$, que é o grupo ortogonal especial de ordem 3:

$$SO(3) = \{R/R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, R \text{ é ortogonal e } \det(R) = 1\}. \quad (3)$$

O grupo $SO(3)$ é um subconjunto de todas as matrizes ortogonais de ordem 3, isto é, $SO(3) \subset O(3)$ onde $O(3)$ é definido como:

$$O(3) = \{R/R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, RR^T = R^T R = I\}. \quad (4)$$

Matrizes de rotação são úteis ao derivar as equações da cinemática do movimento de uma embarcação marítima. Como uma consequência de (3) e (4), as propriedades a seguir podem ser indicadas:

Propriedade 1 (Matriz de Rotação): A rotação da matriz $R \in SO(3)$ satisfaz:

$$RR^T = R^T R = I, \det(R) = 1. \quad (5)$$

Propriedade 2 (Matriz de Rotação Inversa)

A Propriedade 1 implica que R é ortogonal. Assim, a matriz de rotação inversa é dada por: $R^{-1} = R^T$, (Fossen, 2002)

1.2.1 Ângulos de Euler

O modelo cinemático é uma descrição do movimento e da geometria do veículo. O modelo é baseado em rotações progressivas ao redor dos diferentes eixos, conforme Figura 7. Esta progressão é usada para construir a matriz de rotação, que permite a conversão de vetores entre os sistemas de referência. Esta matriz de rotação pode ser obtida mediante diferentes métodos, cada um com vantagens e desvantagens. O método comumente empregado para construir esta matriz utiliza três rotações consecutivas sob uma progressão dos eixos, este método é denominado de Ângulos de Euler, “*Euler Angles*”.

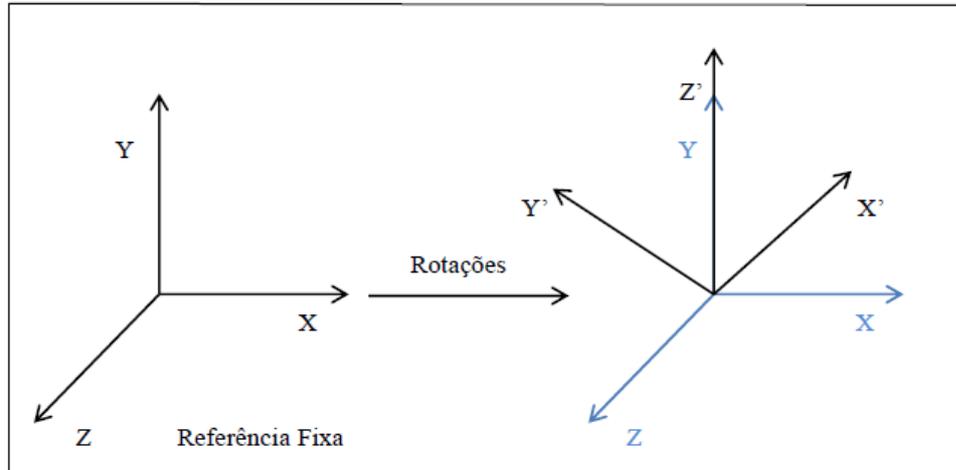


Figura 7 - Rotações entre os sistemas de referência. Extraída de: (Santana, 2010).

Trabalhando-se com ângulos de Euler, a transformação é obtida a partir de uma sequência de rotações em torno de cada um dos eixos coordenados, Figura 7. Com isso, gera-se uma matriz de transformação cujos elementos são funções trigonométricas dos ângulos de orientação do corpo rígido. Multiplicando a matriz de transformação pelo vetor expresso num referencial, obtém-se a representação desse vetor em outro referencial.

A ordem em que as rotações acontecem, determina a localização final do corpo no espaço tridimensional. Os ângulos de Euler proporcionam uma descrição física da atitude do veículo.

1.2.2 Transformação de Rotação

Os ângulos de Euler: *roll* (ϕ), *pitch* (θ) e *yaw* (ψ) podem agora ser usados para decompor o vetor de velocidade fixo no corpo v_o^b no referencial inercial. $R_b^n(\Theta): S^3 \rightarrow SO(3)$ denota a matriz de rotação do ângulo de Euler com argumento $\Theta = [\phi, \theta, \psi]^T$. Assim:

$$v_o^n = R_b^n(\Theta)v_o^b. \quad (6)$$

1.2.3 Rotação Principal

De acordo com Fossen (2002), a equação (7) descreve as matrizes de rotação principal, em relação aos eixos x , y e z .

$$R_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix} \quad R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

nas quais $s \cdot = \text{sen}(\cdot)$ e $c \cdot = \text{cos}(\cdot)$.

1.2.4 Transformação de Velocidade Linear

Costuma-se descrever $R_b^n(\Theta)$ por três rotações sobre os eixos z , y e x (zyx-convensão). Nota-se que a ordem em que estas rotações são realizadas não é arbitrária. A transposição da matriz implica que o mesmo resultado é obtido da transformação de um vetor, isto é, invertendo a ordem da transformação. Esta sequência de rotação é equivalente ao produto:

$$R_b^n(\Theta) := R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi} \quad (8)$$

A transformação inversa é dada por:

$$R_b^n(\Theta)^{-1} = R_n^b(\Theta) = R_{x,\phi}^T R_{y,\theta}^T R_{z,\psi}^T. \quad (9)$$

Finalmente da equação (8), tem-se:

$$R_b^n(\Theta) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}. \quad (10)$$

1.2.5 Transformação de Velocidade Angular

O vetor de velocidade angular $\omega_{nb}^b = [pqr]^T$ e o vetor de Euler $\dot{\Theta} = [\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$ estão relacionados por uma matriz de transformação $T_{\Theta}(\Theta)$ de acordo com:

$$\dot{\Theta} = T_{\Theta}(\Theta)\omega_{nb}^b . \quad (11)$$

Deve notar-se que o vetor de velocidade angular do corpo não pode ser integrado diretamente para obter as coordenadas angulares atuais. Isto é devido ao fato de que a integral do vetor não tem nenhuma interpretação física imediata. No entanto, o vetor $\Theta = [\phi, \theta, \psi]^T$ representa coordenadas angulares generalizadas. A matriz de transformação pode ser derivada de vários modos, por exemplo:

$$\omega_{nb}^b = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x,\phi}^T \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x,\phi}^T R_{y,\theta}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} := T_{\Theta}^{-1}(\Theta)\dot{\Theta} \quad (12)$$

Expandindo (12) obtém-se:

$$T_{\Theta}^{-1}(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\phi & c\theta s\phi \\ 0 & -s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \Rightarrow T_{\Theta}(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix}, \quad (13)$$

nais quais: $s \cdot = \text{sen}(\cdot)$, $c \cdot = \text{cos}(\cdot)$ e $t \cdot = \text{tan}(\cdot)$.

1.2.6 Equação Cinemática

Resumindo os resultados, a equação cinemática pode ser expressa na forma vetorial como:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad (14)$$

que pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}^n \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_b^n(\theta) & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & T_\theta(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0^b \\ \omega_{nb}^b \end{bmatrix}. \quad (15)$$

1.3 Modelo da Dinâmica da Embarcação

Fossen (2002) propôs um modelo clássico baseado na analogia com a robótica, na qual a dinâmica é determinada a partir dos princípios das leis de Newton, aplicadas a um corpo rígido que se move em um fluido. O modelo dinâmico é composto por dois sistemas de coordenadas: um deles fixo a um ponto do casco (x_B, y_B, z_B) e outro fixo a terra (x_E, y_E, z_E) e seis graus de liberdade, conforme ilustrado na Figura 8.

Na modelagem de veículos marítimos também é conveniente trabalhar com estes dois sistemas de referência. Com isso, a dinâmica é modelada no referencial do corpo.

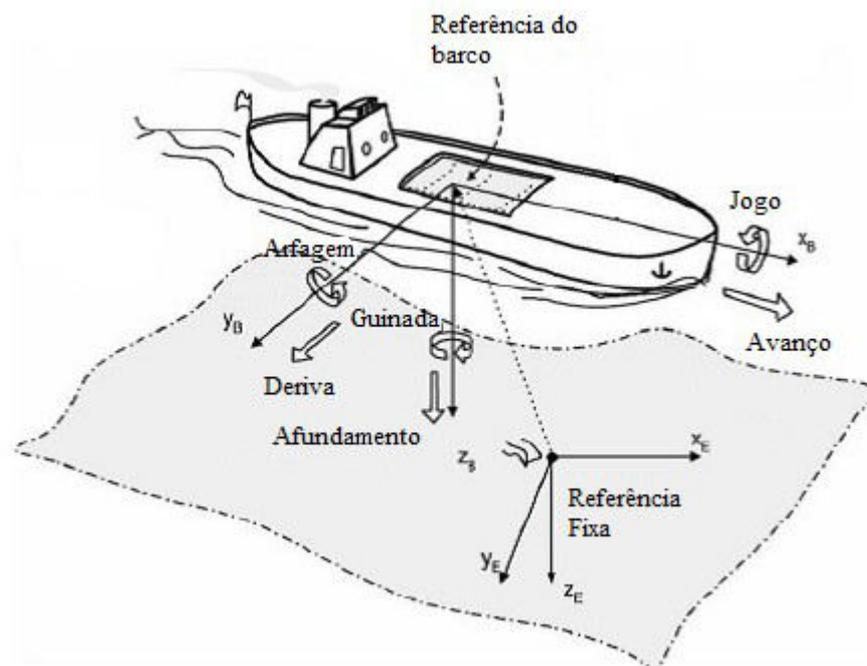


Figura 8 - Sistemas de referência. Extraído de: (Santana, 2010).

1.3.1 Sistemas de Coordenadas Adotados

Os sistemas de coordenadas adotados no presente trabalho são representados na Figura 9.

O barco utilizado como referência para o desenvolvimento da modelagem foi construído por Amaral (2008) e possui apenas um propulsor na popa e dois laterais. Todos os propulsores podem operar tanto no sentido direto como reverso.

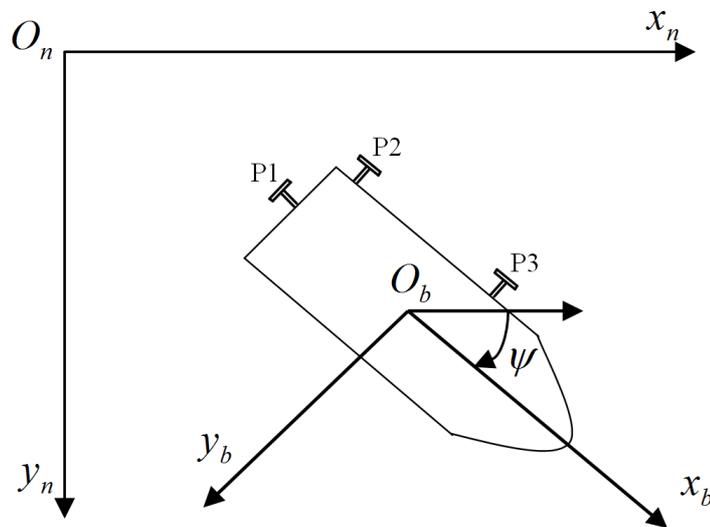


Figura 9 - Embarcação e os sistemas de coordenadas. Extraída de: (Sokal, 2010).

Na Figura 9 pode-se observar a disposição dos propulsores instalados no barco, representados por P1, P2 e P3. O sistema de coordenadas móvel, fixo no barco, é representado por $x_b O_b y_b$. O sistema estacionário é representado por $x_n O_n y_n$. O ângulo de rumo é representado por ψ (Sokal, 2010).

Segundo Fossen (2002), a equação dinâmica genérica de um veículo marinho, considerando o movimento com seis graus de liberdade pode ser representada pela:

Equação Cinética que considera as forças que provocam o movimento:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + g_0 + w, \quad (16)$$

e pela Equação Cinemática que trata apenas os aspectos geométricos do movimento:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad (17)$$

e

$$\eta = \begin{bmatrix} p^e \\ \Theta \end{bmatrix}, \quad (18)$$

nas quais η o vetor de posição e orientação, $p^e = [x, y, z]^T$ é a posição da embarcação em relação ao sistema estacionário, determinada a partir de x, y e z, e $\Theta = [\phi, \theta, \psi]^T$ contém os ângulos de Euler, também conhecidos como ângulos de atitude, que definem a orientação da embarcação,

$$v_o^b = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad \omega_{nb}^b = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} v_o^b \\ \omega_{nb}^b \end{bmatrix}, \quad (19)$$

nas quais v_o^b é o vetor da velocidade linear e ω_{nb}^b o vetor da velocidade angular representados no sistema de coordenadas móvel.

Note que nos esforços nas equações (1) e (16) os operadores $C(v)$ e $D(v)$ são funções da velocidade do veículo e caracterizam esforços não lineares. Adicionalmente, estes sistemas estão sujeitos a variações paramétricas com as condições de operação, ou seja, é possível que ocorram variações dos coeficientes de arrasto hidrodinâmico em função da velocidade ou de massa adicionada em função da aceleração e da inércia com a variação da posição, velocidade e aceleração.

As dinâmicas das velocidades nos diferentes graus de liberdade são acopladas, ou seja, a velocidade em uma direção ou grau de liberdade contribui para a dinâmica ou movimento do veículo em um grau de liberdade diferente.

1.3.2 Matriz de Inércia

A matriz de inércia para embarcações considera não apenas a massa do barco e seus momentos de inércia, mas também a água deslocada pelo movimento do barco. Deste modo a matriz de inércia é dada por:

$$M = M_{RB} + M_A, \quad (20)$$

sendo:

M_{RB} a matriz de inércia do corpo rígido;

M_A a matriz de massa adicional.

1.3.3 Momentos de Inércia

Para embarcações é comum optar-se por equações de movimento que permitam a escolha arbitrária da origem do sistema móvel de modo que seja possível fazer-se uso das propriedades geométricas do veículo. A matriz de inércia é definida como:

$$I_o = \begin{bmatrix} I_x & I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad I_o = I_o^T > 0, \quad (21)$$

onde I_x , I_y e I_z são momentos de inércia em relação ao sistema de coordenadas móvel, fixo no barco e $I_{xy} = I_{yx}$, $I_{xz} = I_{zx}$ e $I_{yz} = I_{zy}$, são produtos de inércia.

1.3.4 Matriz de Inércia do Corpo Rígido

A matriz de inércia do corpo rígido apresenta as seguintes características:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -ms(r_g^b) \\ ms(r_g^b) & I_o \end{bmatrix}, \quad M_{RB} = M_{RB}^T > 0, \quad M_{RB} = 0 \in R^6, \quad (22)$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_z & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (23)$$

onde r_g^b é o centro de gravidade (CG) definido por:

$$r_g^b = [x_g, y_g, z_g], \quad (24)$$

1.3.5 Matriz Coriolis-centrípeta

A matriz Coriolis-centrípeta do corpo rígido é dada por:

$$C_{RB}(v) = -C_{RB}^T(v), \forall v \in R^6, \quad (25)$$

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -mS(v_o^b) - mS(S(\omega_{nb}^b)r_g^b) \\ -mS(v_o^b) - mS(S(\omega_{nb}^b)r_g^b) & mS(S(v_o^b)r_g^b) - S(I_o \omega_{nb}^b) \end{bmatrix}. \quad (26)$$

1.3.6 Matriz de Massas Adicionais

Segundo Fossen (2002), as massas adicionais representam forças inerciais induzidas pela pressão resultante do movimento harmônico da embarcação na água.

A matriz de massas adicionais será positiva e definida por:

$$M_A = M_A^T > 0, M_A \in R^6. \quad (27)$$

1.4 Amortecimento

O efeito do amortecimento hidrodinâmico em embarcações é ocasionado, geralmente, devido aos seguintes fatores: Amortecimento potencial, deslizamento nas ondas e turbulência nas marés (Sokal, 2010).

O amortecimento hidrodinâmico total pode ser expresso como:

$$D(v) = D + D_n(v), \quad (28)$$

onde D é a matriz de amortecimento linear e $D_n(v)$ é a matriz de amortecimento não linear.

1.5 Esforços Ambientais

A ação do vento e das ondas constituem agentes de distúrbios importantes em embarcações de superfície, navios e semisubmersíveis (plataformas marítimas, por exemplo). Ondas de superfície introduzem forças de inércia e de arraste hidrodinâmicos. A contribuição do vento no movimento de um veículo de superfície é um fenômeno típico de incidência do vento na superfície da embarcação.

O efeito ambiental de maior importância para um veículo de superfície resume-se na correnteza marítima. A correnteza pode ser formada a partir de três princípios distintos. Um deles é através do vento, que gera correnteza na camada mais próxima da superfície. Outro fator que contribui para a formação de correnteza constitui na troca de calor por convecção entre as camadas, lâminas d'água, do ambiente marinho e na superfície entre os fluidos ar-água, assim como nas alterações de salinidade (mudanças de concentração e conseqüentemente, do peso específico). Por fim, o efeito da maré provocado pelo satélite da Terra também influi no aparecimento da correnteza marítima, (Souza, 2003).

1.6 Identificação do Empuxo Real Aplicado pelos Propulsores

Define-se em Avila, et al. (2005) o empuxo nominal de um propulsor como aquele que é produzido com o propulsor em condição de amarramento, isto é, parado. Quando o propulsor está funcionando preso ao veículo que se desloca com certa velocidade, o empuxo produzido pelo propulsor é reduzido em relação ao seu valor nominal. Esta redução de empuxo é devido à velocidade de avanço do veículo e também à interação com os outros propulsores. Para o projeto não foi considerado a redução do empuxo produzido pelo propulsor.

1.6.1 Modelo dos Propulsores

A modelagem dos propulsores deve ser independente para cada propulsor, pois os mesmos podem ter detalhes construtivos bastante diversificados (características das hélices, tipo de acionamento das hélices etc) (Cunha et al., 2000).

Segundo Cunha et al. (2000), a ação dos propulsores é dada pela força resultante:

$$F_p = \sum_{i=1}^n F_{pi} P_{pi}, \quad (29)$$

e pelo momento resultante:

$$M_p = \sum_{i=1}^n [M_{pi} P_{pi} + R_{pi} \times (F_{pi} P_{pi})], \quad (30)$$

onde a posição de cada propulsor é representada pelo vetor R_{pi} e sua orientação é representada pelo vetor unitário P_{pi} , conforme ilustrado na Figura 10.

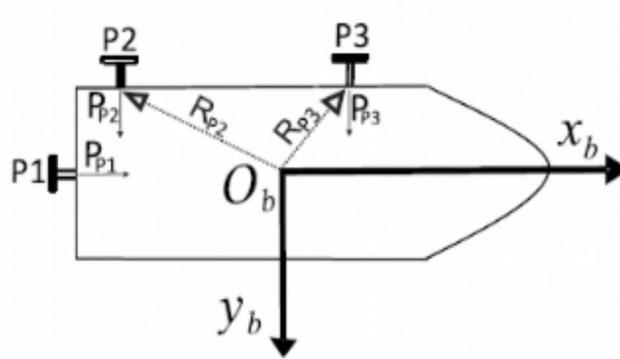


Figura 10 - Disposição dos propulsores instalados no barco. Extraída de: Sokal, 2010.

Na formulação acima é feita uma simplificação. o acoplamento cruzado devido à interferência do fluxo de água de um propulsor em outro propulsor é desprezado.

Entretanto, o momento axial M_{pi} produzido por hélice será desprezado por ser muito pequeno, de modo que a equação (30) pode ser expressa como:

$$M_p = \sum_{i=1}^n [R_{pi} \times (F_{pi} P_{pi})]. \quad (31)$$

Nas equações (29)-(31), a força escalar gerada por propulsor é dada por:

$$F_{pi} = \alpha^* n_{pi}^2; \quad \alpha^* = \begin{cases} \alpha_i^+ & \text{se } n_{pi} \geq 0 \\ \alpha_i^- & \text{se } n_{pi} < 0 \end{cases} \quad (i = 1, \dots, n), \quad (32)$$

onde α_i^+ e α_i^- são os coeficientes do empuxo da hélice, respectivamente, no sentido direto e reverso (N/rps^2) e n_{pi} é a velocidade de rotação da hélice (rps). É importante destacar que os propulsores afetam diretamente o desempenho do sistema, visto que podem causar um atraso na atuação da malha de controle.

Finalmente, o vetor de controle na equação (1) é:

$$\tau := \begin{bmatrix} F_p \\ M_p \end{bmatrix}. \quad (33)$$

1.7 Modelo Simplificado para Três Graus de Liberdade

Nas seções anteriores foram apresentadas as equações dinâmicas para um modelo com seis graus de liberdade. Conforme descrito em Fossen (2002) e Sokal (2010), para uma embarcação de superfície, o modelo com seis graus de liberdade pode ser simplificado. Assumindo uma distribuição de massa homogênea e fazendo a origem do referencial coincidir com o centro de massa do veículo alguns cálculos podem ser simplificados.

Como a embarcação utilizada no projeto é um veículo marinho de superfície e os movimentos ocorrem com amplitude reduzida, admite-se que *heave*, *roll* e *pitch* podem ser desprezados (Fossen, 2002).

Considerando estas simplificações, é possível então obter um sistema de equações mais simples, com apenas três graus de liberdade, e que sintetiza o movimento do veículo.

É necessário então adaptarmos o modelo apresentado na equação (1) para três graus de liberdade, redefinindo-se os vetores:

$$\eta = [x, y, \phi]^T, \quad (34)$$

e

$$v = [u, v, r]^T. \quad (35)$$

Assume-se que o barco balance pouco, isto é, $\theta \approx 0^\circ$ e $\phi \approx 0^\circ$, tem-se que $\cos(\theta) \approx 1$, $\cos(\phi) \approx 1$, $\sin(\theta) \approx 0^\circ$ e $\sin(\phi) \approx 0^\circ$. Logo, as matrizes de transformação(10) e (13) podem ser aproximadas por:

$$R_b^n = R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi} \approx R_{z,\psi}, \quad R(\psi) = R_{z,\psi}, \quad (36)$$

e

$$T_{\theta}(\Theta) \approx I_{3 \times 3}. \quad (37)$$

Como está sendo analisada uma embarcação que flutua na superfície, o termo $g(\eta)$ que representa o empuxo e o peso atuando no sistema, será desprezado, pois estes idealmente cancelam-se. Deve-se também remover o termo (*pretrimming*), utilizado para realizar o controle de lastro, que neste barco é inexistente.

Devido ao fato de os experimentos serem realizados em um local fechado com quase que total ausência de perturbações oriundas do ambiente (vento, ondas e correntezas), as perturbações ambientais representadas por w também serão desprezadas.

Então, para um sistema com três graus de liberdade as equações dinâmicas simplificadas são da seguinte forma:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau, \quad (38)$$

e

$$\dot{\eta} = J(\eta)v. \quad (39)$$

Uma vez que no modelo em três graus de liberdade (3 DOF) as oscilações em *roll* e *pitch* serão desprezadas e, pode-se utilizar (39), considerando ($\cos \theta \approx 1$, $\cos \phi \approx 1$) e ($\sin \theta \approx 0$, $\sin \phi \approx 0$), tem-se então para três graus de liberdade:

$$J(\eta) = R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (40)$$

A matriz de inércia do corpo rígido, equação(23), e a matriz Coriolis-centrípetas, equação (26), serão adaptadas para três DOF considerando um barco com distribuição de massa uniforme e simetria no plano xz, o que resulta em:

$$I_{xy} = I_{yz} = 0, \quad (41)$$

e

$$y_g = 0. \quad (42)$$

Os termos Coriolis-centrípetas da velocidade quadrática do sistema representado por $C(v)v$ são desprezados para aplicações que operam em baixa velocidade. Aplicando as considerações feitas, tem-se então:

$$M\dot{v} + D(v)v = \tau \Rightarrow \dot{v} + M^{-1}D(v)v = M^{-1}\tau, \quad (43)$$

equação utilizada para a identificação dos parâmetros, e

$$\dot{\eta} = R(\psi)v, \quad (44)$$

com o vetor de controle:

$$\tau = \begin{bmatrix} F_{px} \\ F_{py} \\ M_{pz} \end{bmatrix}. \quad (45)$$

Como não tinha a disposição um instrumento que permitisse o cálculo da massa adicional imposta ao barco durante a realização dos experimentos, a equação (43) será aproximada, onde somente é considerado o arraste quadrático em $D(v)$.

$$\dot{v} + \begin{bmatrix} C_x(\gamma_{rc})V_{rc}^2 \\ C_y(\gamma_{rc})V_{rc}^2 \\ C_\psi(r)r^2 \end{bmatrix} = M^{-1}\tau. \quad (46)$$

onde γ_{rc} é o ângulo da correnteza em relação a proa do barco, sendo determinado por:

$$V_{rc} = \sqrt{u_{rc}^2 + v_{rc}^2} = \sqrt{(u - u_c)^2 + (v - v_c)^2}, \quad (47)$$

$$\gamma_{rc} = -atan2(v_{rc}, u_{rc}). \quad (48)$$

onde u_c e v_c são respectivamente a componente x e y da velocidade da correnteza, as componentes u e v correspondem às velocidades no referencial do barco. Como os experimentos são realizados em uma piscina sem presença de correnteza as equações (47) e (48) podem ser reescritas como (Sokal, 2010).

$$V_{rc} = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (49)$$

$$\gamma_{rc} = -atan2(v, u). \quad (50)$$

Os coeficientes das matrizes M , D e dos propulsores são identificados a partir de resultados experimentais no Capítulo 4.

2 SISTEMAS DE CAPTURA DE MOVIMENTO

Os sistemas utilizados na mensuração e análise do movimento, também conhecidos como sistemas de captura e análise de movimentos (SCAM), têm cada vez mais despertado interesse nos pesquisadores e cientistas da comunidade acadêmica devido ao seu grande número de aplicações. Em seu artigo, Moeslund *et al.* (2006) fez um levantamento bibliográfico dos principais trabalhos e linhas de pesquisas envolvidas na construção de sistemas desta natureza. Segundo este autor, de 2000 a 2005 foram publicados cerca de 350 artigos sobre SCAM em importantes veículos de divulgação científica internacional. Estes trabalhos abordaram em sua maioria aspectos técnicos e construtivos de sistemas de captura e análise de movimentos.

De um modo geral, os SCAMs são capazes de calcular a trajetória dos segmentos de um corpo. Dispondo destes valores de trajetória e do intervalo de tempo gasto para realizá-las é possível o cálculo da velocidade e aceleração destes segmentos, que têm sua posição e orientação no espaço definidos por um conjunto de sensores fixados ao segmento em análise.

O processo de captura consiste de uma forma geral, na fixação de sensores em pontos de interesse no objeto. Vale ressaltar que estes sistemas capturam não só o movimento de objetos, como também o movimento animal e o de humanos de um modo geral (Pinheiro, 2008). Como exemplos podem-se citar o desenvolvimento de jogos e a indústria cinematográfica, que captura o movimento de um ator, para posteriormente realizar a animação dos filmes.

2.1 Exemplos de Sistemas de Captura de Movimento

Dependendo da tecnologia empregada na aquisição de dados relativos ao movimento, os sistemas de captura de movimento que utilizam sensores fixados aos objetos, podem ser classificados em quatro categorias: (1) sistemas acústicos, (2) eletromecânicos, (3) eletromagnéticos e (4) sistemas óptico eletrônicos.

2.1.1 Sistemas Acústicos

Os sistemas baseados na tecnologia acústica geralmente empregam ultrassom ou radiofrequência na aquisição dos dados do movimento. Nestes sistemas emprega-se o par transmissor/receptor onde geralmente os transmissores encontram-se nos principais pontos de interesse, enquanto que os receptores (geralmente três) são posicionados no local de captura.

Os transmissores são sequencialmente acionados para produzir sinais sonoros característicos que serão captados pelos receptores, que então calcularão a posição de cada transmissor.

Um dos problemas dos sistemas acústicos é a dificuldade de obter uma descrição correta dos dados em um instante desejado devido ao caráter sequencial do disparo dos transmissores. Além disso, nos sistemas acústicos o número de transmissores utilizados é limitado e esta tecnologia está sujeita a problemas de reflexões do som que podem afetar a qualidade dos dados. Como vantagem, este tipo de sistema não possui problemas de oclusão, típico de sistemas ópticos e interferência por objetos metálicos, percebido em sistemas magnéticos (Pinheiro, 2008).

2.1.2 Sistemas Eletromecânicos

Nos sistemas eletromecânicos são empregados potenciômetros (eletrogoniômetros) que, posicionados nos lugares desejados, fornecem suas posições e orientações em altas taxas de amostragem.

A vantagem de sistemas desta natureza reside no fato de que eles não exigem muito poder computacional o que facilita o projeto de um sistema em tempo real além de exigirem pouca ou nenhuma calibração. Também apresentam custo acessível. Uma desvantagem é que atrapalham os movimentos devido às conexões mecânicas do aparelho (Pinheiro, 2008).

2.1.3 Sistemas Eletromagnéticos

Os sistemas eletromagnéticos caracterizam-se pela velocidade de processamento na estimativa do movimento. Nesse tipo de método, emprega-se um conjunto de sensores que são posicionados nos pontos de interesse. Tais sensores medem a posição tridimensional e orientação dos pontos de interesse em relação a antenas transmissoras, que emitem sinais pulsados (Pinheiro, 2008).

Os sistemas eletromagnéticos são mais acessíveis em termos de preço. Sua tecnologia é menos sofisticada que a utilizada nos sistemas ópticos. A maior desvantagem deste método é a interferência causada por objetos metálicos próximos ao local de captura. Sua exatidão é também fortemente influenciada pela distância entre a antena e os sensores. Mesmo assim, este método apresenta uma das melhores relações entre precisão e exatidão.

2.1.4 Sistemas Ópticos Eletrônicos

Nesse tipo de sistema, marcadores que se destacam na cena através de seu contraste de cor, são fixados nos principais pontos de interesse do objeto. Neste sentido, câmeras de vídeo são empregadas como dispositivos óptico eletrônico para registrar o movimento dos marcadores. Essas câmeras são posicionadas estrategicamente no espaço para permitir o rastreamento desses marcadores durante o movimento. As imagens destes marcadores são processadas por um programa de computador que rastreará a posição dos marcadores nas imagens geradas pelas câmeras. Em seguida, analisará a variação das posições de cada marcador e, através de um conjunto de formulações matemáticas, reconstruirá tridimensionalmente a trajetória de cada marcador no espaço.

Os sistemas ópticos têm custo elevado devido à alta tecnologia utilizada no processo. As câmeras, geralmente de alta resolução, e os programas sofisticados são os principais responsáveis pelo preço maior que os demais sistemas baseados em outros métodos. Sua vantagem é a liberdade de movimentação oferecida ao

objeto durante a execução do movimento, já que os marcadores não oferecem resistência ao movimento. Esse método também contribui para que não exista um limite para o número de marcadores posicionados no objeto, o que permite alcançar um maior nível de detalhe e precisão na representação dos movimentos. Uma desvantagem é a possibilidade da oclusão de marcadores durante o processo de captura (Pinheiro, 2008).

Além disto, este tipo de sistema necessita de um programa para calcular as coordenadas tridimensionais dos marcadores a partir de imagens bidimensionais, o que pode dificultar a reconstrução do movimento em tempo real.

2.2 Descrição e Caracterização de Sistemas Ópticos Eletrônicos

A reconstrução do movimento na maioria dos sistemas mais sofisticados é feita por dispositivos óptico eletrônicos que utilizam imagens para registrar o movimento e calcular seus parâmetros cinemáticos. Durante o processo de aquisição de uma imagem pelo dispositivo óptico eletrônico, informações métricas da cena são suprimidas ou perdidas. Existem ainda imperfeições na lente que geram distorções nas imagens, fazendo com que os objetos presentes na cena não possam ser medidos com precisão diretamente na imagem (Pinheiro, 2008).

As imagens do movimento deverão ser analisadas por um programa de computador que compensará as distorções sofridas e calculará as coordenadas dos marcadores fixados no objeto. É por meio destes marcadores que o movimento será reconstruído e analisado. Assim, o que é reconstruído são os movimentos feitos pelos marcadores que correspondem ao movimento do objeto no ponto onde estão fixados. É interessante que os marcadores se destaquem na cena por meio de um alto-contraste de modo a permitir que um programa de computador possa localizá-los (rastreá-los) mais facilmente na cena.

Para que este contraste exista, os marcadores deverão emitir luz (marcadores ativos) ou apenas refletir com eficiência a luz incidente sobre sua superfície (marcadores passivos). Marcadores passivos operam pelo registro da luz incidente e

refletida por sua superfície dispensando a utilização de fios. Sistemas passivos geralmente trabalham com a combinação de luz visível e infravermelha. Isto porque os marcadores são cobertos por uma fita retro reflexiva, que reflete a luz infravermelha com alta eficiência e baixa dispersão, dando ao marcador um forte contraste de cor em relação ao plano de fundo.

Um SCAM baseado em vídeo pode medir o movimento em duas (2D) ou três dimensões (3D). Isto depende do número de câmeras e algoritmos empregados no processo de calibração e reconstrução do movimento. Sistemas 2D geralmente utilizam uma única câmera ao contrário dos 3D que devem utilizar pelo menos duas câmeras. Os sistemas 2D são capazes de estimar apenas os movimentos feitos em um único plano de movimento ao contrário dos sistemas 3D onde o movimento pode ter até seis graus de liberdade.

Geralmente nos sistemas tridimensionais, cada marcador deve ser visualizado por, pelo menos, duas câmeras em um mesmo intervalo de tempo, para que suas coordenadas possam ser reconstruídas em três dimensões. Deve-se ter, pelo menos, duas imagens, feitas sobre diferentes ângulos de visão, do mesmo marcador.

Uma grande variedade de sistemas baseados em vídeo tem sido propostos para rastrear o movimento humano e de outros corpos. Estes sistemas variam quanto ao número e configurações de câmeras utilizadas, representação da informação reconstruída, tipos de algoritmos.

Dentre os principais sistemas, pode-se destacar a Vicon, a BTS, *Qualisys* e a *Motion Analysis Corporation*.

2.3 Sistema Vicon

O sistema utilizado neste trabalho foi o da Vicon, um sistema de captura de movimento óptico. O sistema proporciona maior precisão, maior desempenho e maior praticidade. Os dados obtidos pelo sistema Vicon podem ser aplicados à engenharia, entretenimento, etc.

Os componentes principais do sistema são: as câmeras, o módulo de controle de *hardware*, o *software* para analisar e apresentar os dados, e o computador *host* para executar o *software* *Vicon Tracker*. A Figura 11 apresenta o *layout* do sistema presente no laboratório utilizado para o desenvolvimento do projeto.

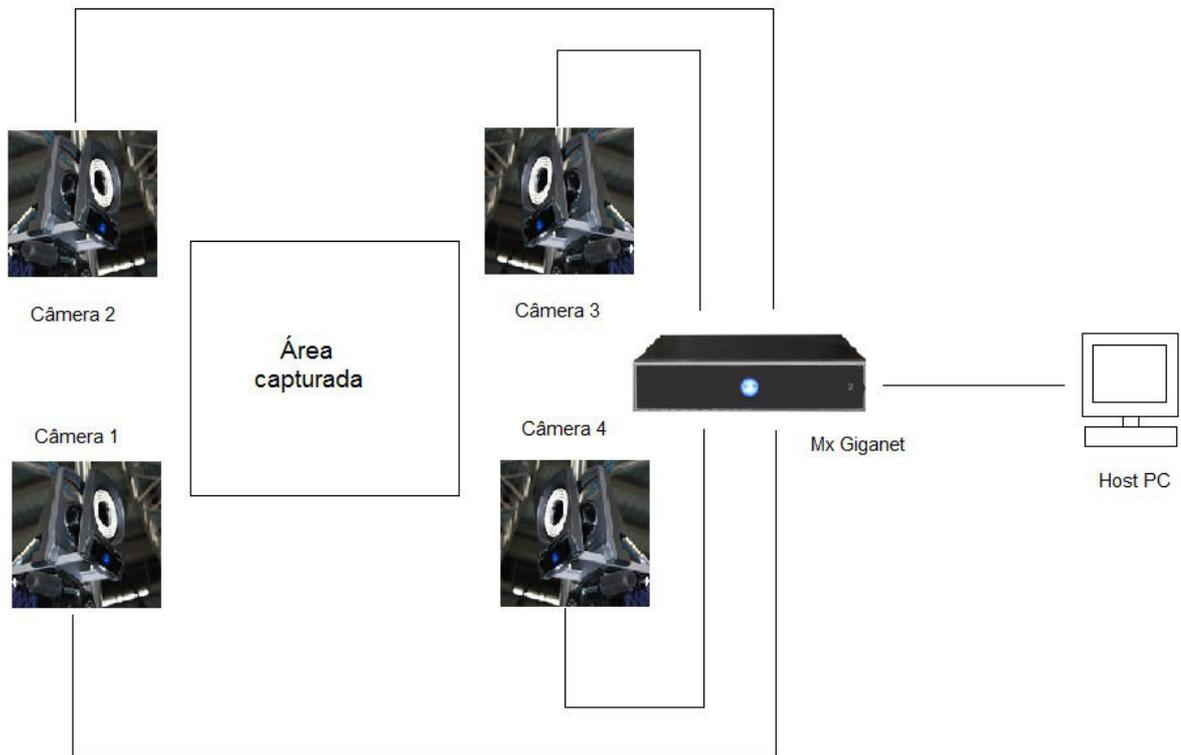


Figura 11 - *Layout* do sistema

O sistema Vicon foi projetado para ser flexível, expansível e fácil de integrar em um ambiente de trabalho. Com uma combinação de componentes do sistema, pode-se criar qualquer tamanho de sistema e vinculá-lo facilmente para os dispositivos externos que se deseja usar.

Cada sistema Vicon Mx inclui pelo menos um MX *Giganet* para fornecer comunicação de dados e de energia, com um máximo de 10 câmaras e outros dispositivos. O *Giganet* também gerencia o fluxo de dados para o computador *host* executando o *software* que vai ser usado para analisar os dados. Se o sistema tivesse mais de 10 câmaras, seria necessário outro *Giganet* para as câmaras adicionais.

2.3.1 Câmeras

As câmeras oferecem alta resolução e precisão, permitindo captura de dados em diversos ambientes. A câmera T10-S, conforme a mostrada na Figura 12, possui resolução de 1 megapixel e pode realizar a captura de dados a uma velocidade de até 1000 quadros por segundo, perfeita para capturar movimentos mais rápidos.



Figura 12 – Câmera Vicon T10-S

2.3.2 MX *Giganet*

Na Figura 13 pode-se ver o MX *Giganet*, unidade central que faz a conexão das câmeras com o equipamento de captura de dados. Possui 5 portas *Ethernet gigabyte* para a conexão com o computador *host* e outros dispositivos.



Figura 13 - MX *Giganet*.

2.3.3 Software Vicon Tracker

O *software Vicon Tracker* é uma poderosa solução de rastreamento de objetos fornecendo uma precisão de dados incomparável em integração de aplicações 3D. Foi projetado para aplicações tão diversas tais como monitoramento de robôs, engenharia de fatores humanos; método de projeto de otimização, engenharia virtual e pré-visualização.

Pode seguir até 50 objetos de forma simultânea. Reconhece corpos rígidos também em 3D, com isso, mesmo que os marcadores fiquem visíveis para apenas uma câmera, os dados não serão perdidos. Como resultado ocorrem menos falhas e os dados serão mais confiáveis.

O *software Tracker* possui interface que divide-se em: a parte de configuração das câmeras, calibração das câmeras, calibração e manipulação de objetos.

Possui latência de 2,5 ms. Seja qual for a aplicação, pode capturar rapidamente o fluxo de dados em tempo real.

Para a correta utilização do *software Tracker* é necessário seguir alguns passos. Inicialmente quando iniciamos a execução do *software Tracker* é realizado automaticamente a inicialização das câmeras, para comprovar se todas as câmeras estão operando.

2.4 Calibração do Sistema Vicon

Antes da calibração do Sistema Vicon deve-se ajustar parâmetros das câmeras, tais como, frequência, *strobe intensity* e *threshold*, que determinam a qualidade da imagem (Dinis, 2011).

onde

- *Strobe intensity* - Representa a intensidade da luz dos *leds* emitidos pela câmera. O valor pode ser ajustado entre 0 e 1 para minimizar as reflexões e obter imagens nítidas dos marcadores. O ajuste em valor alto pode causar

borrões, produzidos pela reflexão de outros marcadores. Por outro lado o ajuste em valor baixo poderá tornar os marcadores menos visíveis para as câmeras (*Vicon Tracker Guide*, 2013);

- *Threshold* - É o limiar de percepção de contraste que as câmeras tem sobre os marcadores, o valor pode ser ajustado entre 0 e 1. O ajuste em valor baixo permite a câmera detectar baixos níveis de luz. Já o ajuste em valor alto reduz o ruído, mas faz os marcadores serem menos visíveis (*Vicon Tracker Guide*, 2013).

O processo de calibração do sistema é extremamente importante, pois é através deste processo que o sistema consegue saber onde as câmeras estão posicionadas e conseqüentemente triangular a posição dos marcadores.

Para obtermos uma boa qualidade dos dados capturados é importante termos uma boa calibração.

Antes da realização da calibração das câmeras, é necessário eliminar todos os ruídos presentes na imagem passíveis de serem confundidos com um marcador. Para isso devemos remover todos os objetos e marcas da área de trabalho (volume de captura). Pressionar START abaixo de CREATE CAMERA MASKS em CALIBRATE, conforme apresentado na Figura 14.

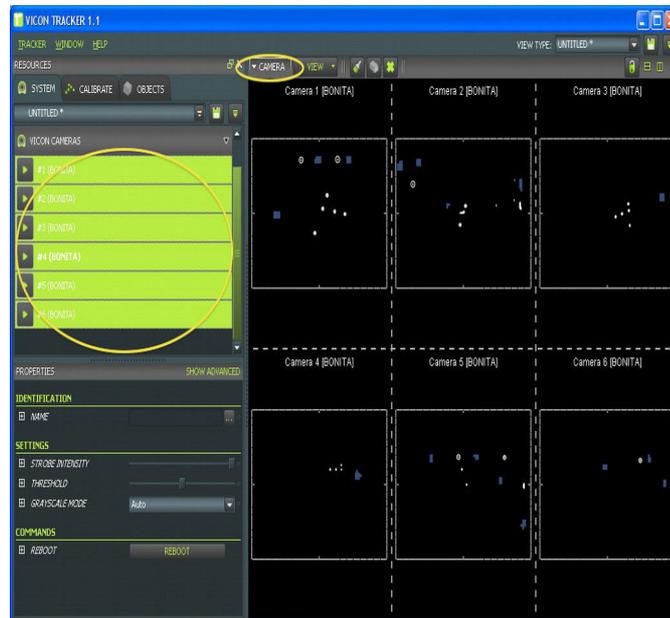


Figura 14 - Máscaras nas imagens das câmeras no *software Vicon Tracker*.

Após a remoção de reflexos indesejados pode-se iniciar a calibração, seguindo os passos no menu da Figura 15.

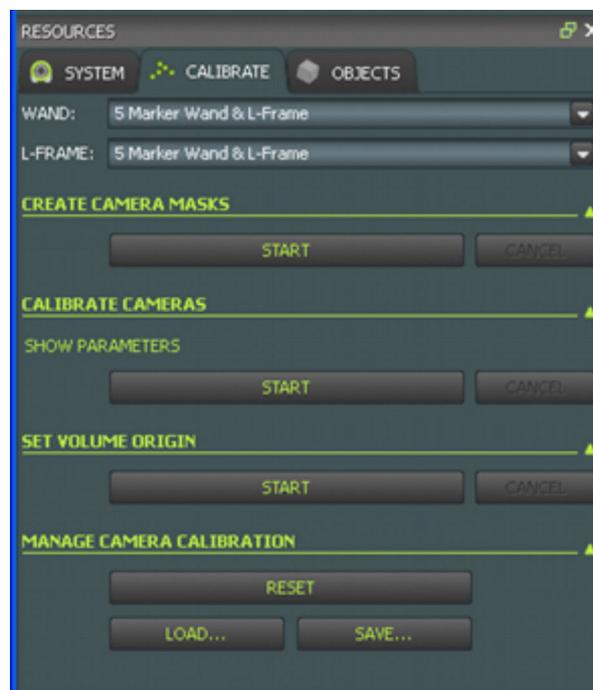


Figura 15 - Tela de calibração do *software Vicon Tracker*.

Para a calibração do sistema devemos utilizar o calibrador, (*wand*, Figura 16) um objeto em forma de T que possui 5 marcadores. O *software Vicon Tracker* sistema conhece as dimensões exatas do calibrador.

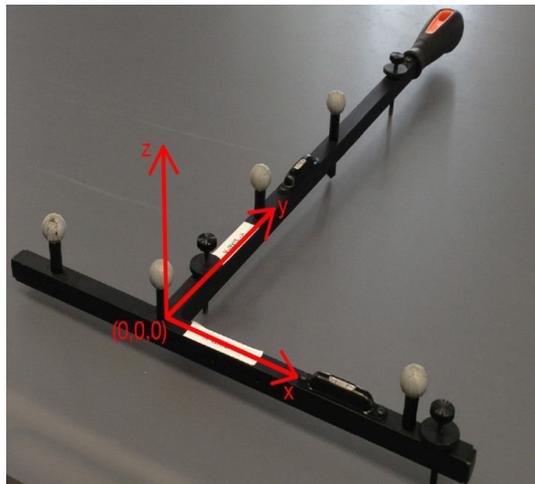


Figura 16 - Calibrador (*wand*) do sistema Vicon.

Deve-se mover o calibrador por toda área de captura, fazendo movimentos circulares de modo a abranger o espaço que pretende-se capturar. O objetivo é preencher a imagem das câmeras com um padrão semelhante ao das imagens na Figura 17.

Para iniciarmos a calibração pressionamos START abaixo de CALIBRATE CAMERAS. Movemos o calibrador pela área de trabalho até os dados do indicador ficarem verdes, quando forem capturadas as imagens de aproximadamente 10000 *wands* por câmera. Pressionamos STOP, então o *software* calculará automaticamente os erros da calibração.

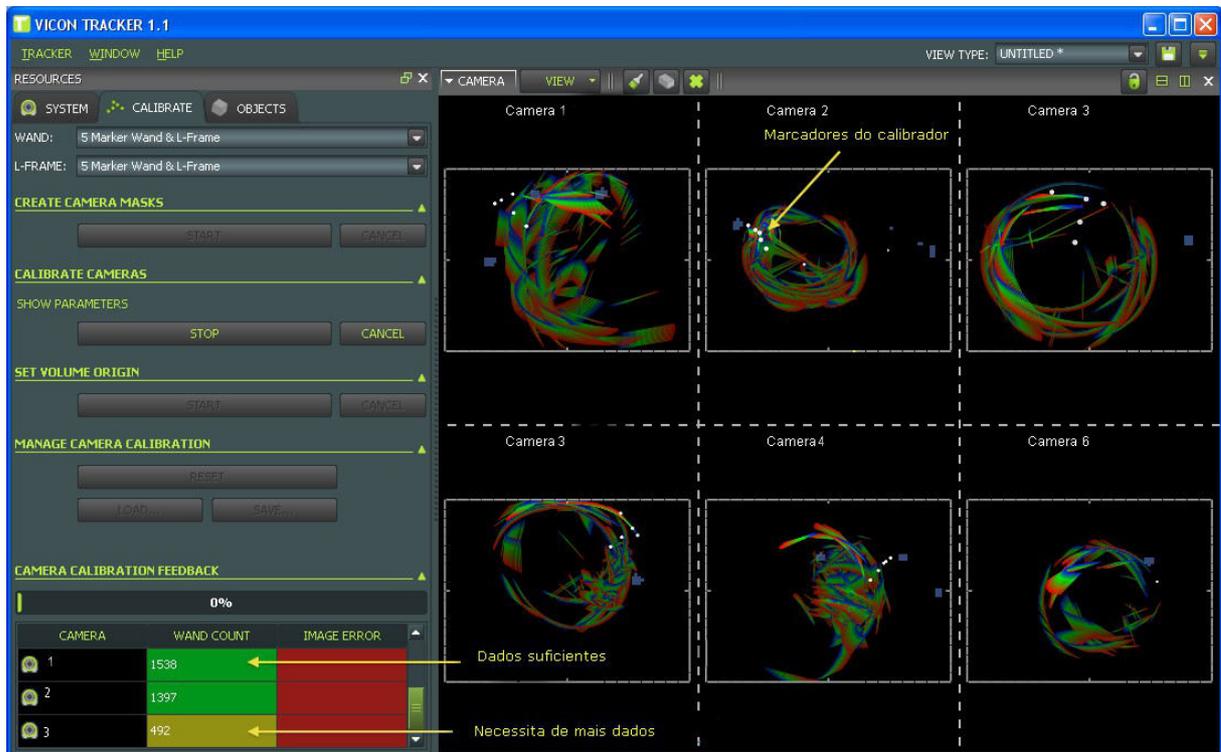


Figura 17 - Tela de calibração do software Vicon Tracker.

2.4.1 Definição da Origem das Coordenadas Estacionárias

Após a calibração do sistema devemos designar a origem das coordenadas estacionárias do mesmo. Para isso colocamos o calibrador no chão, no lugar onde desejamos que se situe a origem das coordenadas (Figura 15) e pressionamos START abaixo de SET VOLUME ORIGIN, depois SET ORIGIN.

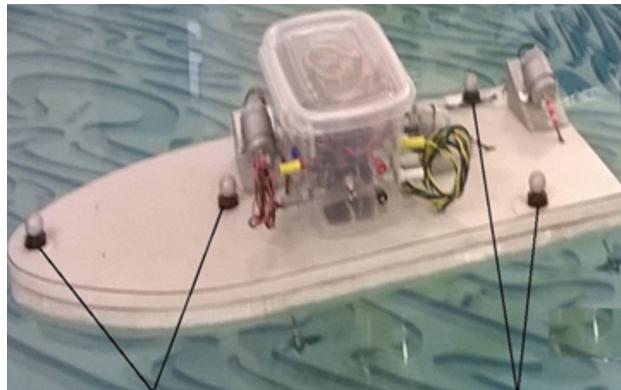
2.4.2 Criação de Objetos

Após a calibração do sistema Vicon, pode-se criar o objeto que será utilizado no presente trabalho e identificá-lo. Antes de criar o objeto e identificá-lo é necessário fixar os marcadores, como os observados na Figura 18. O objeto deve possuir no mínimo 3 marcadores, assimetricamente colocados para que sejam

criados planos triangulares. A assimetria possibilita reconhecer a orientação do objeto. Os planos triangulares permitem obter as rotações (Dinis, 2011). Na Figura 19 podem-se ver os quatro marcadores reflexivos fixados no barco.



Figura 18 – Marcadores reflexivos esféricos.



Marcadores

Figura 19 - Marcadores fixados no barco.

Na Figura 20 pode-se observar os marcadores fixados no barco e o sistema de coordenadas móvel, fixo no barco.

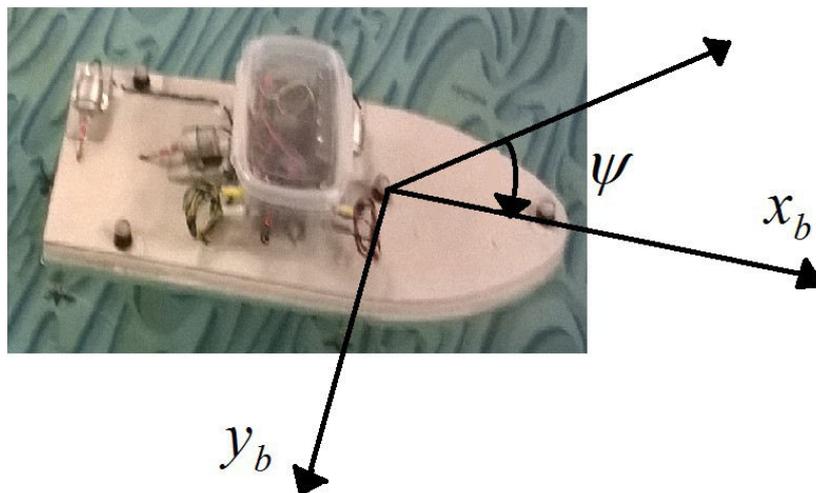


Figura 20 - Sistema de coordenadas do barco

Em OBJECTS clicamos no botão de pausa do rastreamento. Aparecerão as linhas dos marcadores selecionados pelas câmeras no momento em que foi parado o rastreamento. Em 3D PERSPECTIVE selecionamos os marcadores que queremos do objeto. Por fim em CREATIVE OBJECT no painel de RESOURCES, digitamos o nome que queremos dar ao objeto e clicamos em CREATE.

Realizando todo esse processo teremos o objeto pronto para a obtenção dos dados da posição e atitude e assim poder ser controlado.

A realização de todo este processo é extremamente importante pra uma boa obtenção dos dados a serem capturados e posteriormente tratados. Para uma boa qualidade dos dados deve ser realizada uma boa calibração.

3 ACIONAMENTO DOS PROPULSORES, MICRONTROLADOR E COMUNICAÇÃO DO BARCO

3.1 Acionamento dos propulsores

Para possibilitar o acionamento dos motores instalados no barco, já que as saídas digitais de microcontroladores e circuitos lógicos não são capazes de acionar de modo direto cargas com valores elevados de corrente e tensão, é necessário usar circuitos externos para garantir o correto funcionamento dos motores.

O circuito utilizado neste projeto de acionamento sem fio do barco usa placas desenvolvidas com o chip L298, um circuito integrado acionador de dois motores em ponte completa (*Dual full-bridge driver*). Esse circuito integrado é composto por duas pontes do tipo “H” que possibilitam controlar em que sentido os motores são acionados. Esse circuito também possibilita o controle de velocidade e direção de rotação de motores CC. A Figura 21 mostra o *driver* que será utilizado para controlar os motores do barco. Cada placa é capaz de acionar até dois motores. Assim são usadas duas placas para acionar os três motores do barco.

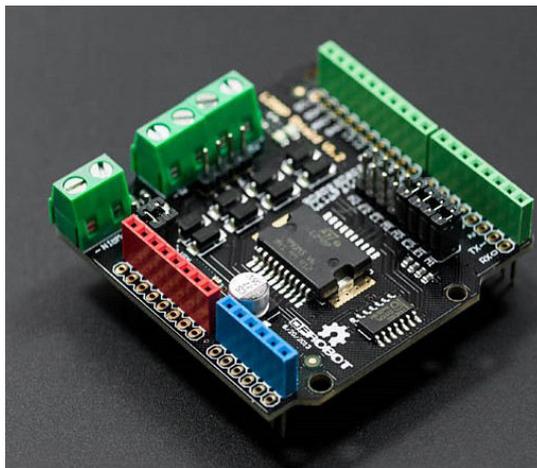


Figura 21 - *Driver* baseado no CI L298. Extraída de: www.dfrobot.com.

Este *driver* pode ser configurado no modo de controle de velocidade PWM (*Pulse-Width Modulation*) e no modo de fase PLL (*Phase-Locked Loop*), por meio de

jumpers apropriados. O fornecimento de energia pode ser feito pelo Arduino ou por fonte externa, no caso uma bateria de 7.2 V.

O controle de velocidade PWM pode ser obtido pelos pinos de saída do Arduino. Os valores são configurados no programa de controle (Matlab), bastando programar a direção com o valor que se deseja de largura de pulso em uma das portas.

A função de habilitação/desabilitação de controle do motor é realizada por pinos digitais do Arduino.

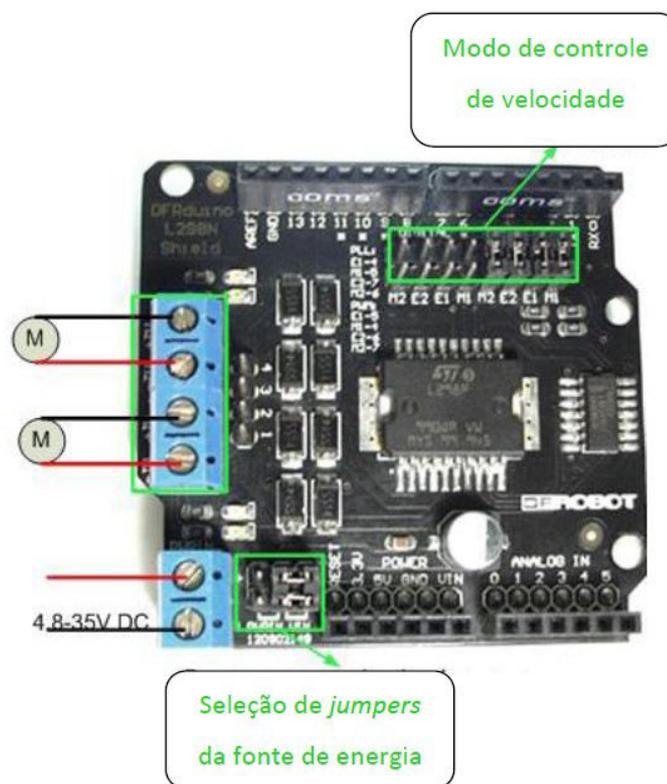


Figura 22 - Motor *Shield*. Extraída de: (D_Robotics, 2011).

O modo PWM usa E1 e E2 para gerar o sinal de controle de velocidade. O modo PLL usa M1 e M2 para gerar o sinal de controle de fase, conforme ilustrado na Figura 23.

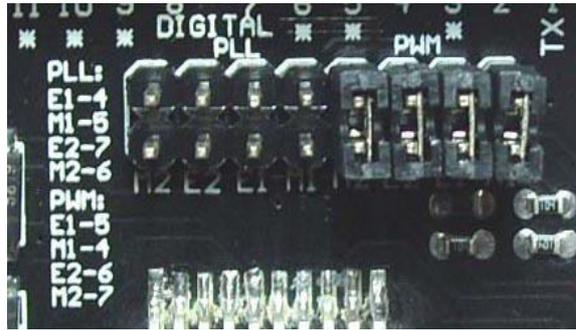


Figura 23 - Modo de seleção de *jumpers*. Extraída de: (D_Robotics, 2011).

Dois motores CC podem ser conectados nos terminais do *driver*, observados na Figura 24.

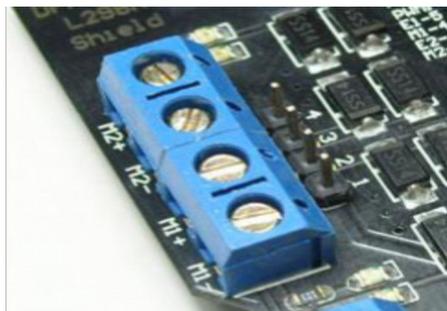


Figura 24 - Terminais do motor. Extraída de: (D_Robotics, 2011).

Na Tabela 2 pode-se visualizar o programa em Matlab para inicialização dos motores e na Tabela 3 uma função e Matlab para acionamento dos motores.

Assim, o comando dos propulsores foi normalizado, então a equação (35) resulta em:

$$F_{pi} = \alpha^* u_{pi}^2; \alpha^* = \begin{cases} \alpha_i^+ & \text{se } 0 \leq u_{pi} \leq 1 \\ \alpha_i^- & \text{se } -1 \leq u_{pi} < 0 \end{cases}, \quad (51)$$

na qual $u_{pi} \in [-1,1]$ são os comandos dos motores e $i = 1, \dots, n..$

Tabela 2 - Programa em Matlab para a inicialização dos motores.

```
% Definição dos pinos do circuito de acionamento dos motores:  
  
E(1) = 8;  
M(1) = 9;  
E(2) = 7;  
M(2) = 6;  
E(3) = 4;  
M(3) = 5;  
  
% Inicialização de pinos digitais como saída:  
  
for i=1:length(E)  
    pinMode(barco, E(i), 'output');  
    digitalWrite(barco, E(i), 0);  
end
```

Tabela 3 - Função em Matlab para acionamento dos motores.

```
%  
% Programa de acionamento dos motores.  
%  
  
for i=1:length(E)  
    PWM = round((u(i)+1)*127.5);  
    if PWM < 0  
        PWM=0;  
    elseif PWM > 255  
        PWM = 255;  
    end  
    analogWrite(barco,M(i),PWM);  
end
```

Os propulsores utilizados são três motores elétricos de corrente contínua, modelo PM 100-SG, cujas características são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características dos motores PM 100-SG. Extraída de: (Amaral, 2008).

Tensão (V)		Em vazio		Máximo rendimento					Bloqueio	
		Rotação	Corrente	Rotação	Corrente	Torque	Potência	Rendimento	Torque	Corrente
Operação	Nominal	RPM	A	RPM	A	g.cm	W	%	g.cm	A
12	12	4870	0,03	3901	0,12	23,1	0,923	63,71	116	0,49

3.2 Microcontrolador

Para agregar o *driver* dos motores e o sistema de comunicação sem fio foi utilizado um microcontrolador Arduino Uno, Figura 25, deste modo tem-se a possibilidade de controlar a velocidade dos propulsores através da saída PWM presente no microcontrolador, o que acrescenta outras possibilidades à embarcação.

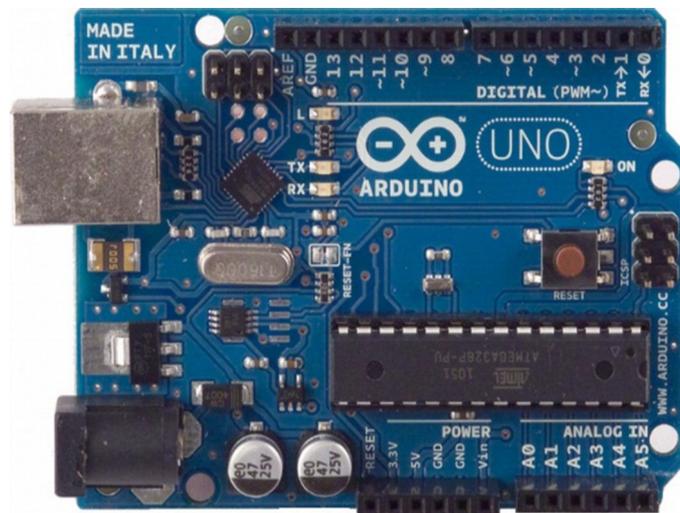


Figura 25 - Microcontrolador Arduino Uno

De acordo com, o Arduino faz parte do conceito de hardware e software livre. O conceito Arduino surgiu na Itália, em 2005, com o objetivo de criar um dispositivo que fosse utilizado em projetos/protótipos construídos de uma forma menos

dispendiosa do que outros sistemas disponíveis no mercado.

O Arduino foi projetado com a finalidade de ser de fácil entendimento, de fácil programação e de fácil aplicação, além de ser multiplataforma, podendo ser configurado em ambientes Linux, Mac OS e Windows. Além disso, um grande diferencial deste dispositivo é ser mantido por uma comunidade que trabalha na filosofia *open-source*, desenvolvendo e divulgando gratuitamente seus projetos.

Ele é baseado em uma placa microcontrolada, com acessos de Entrada/Saída (I/O), sobre a qual foram desenvolvidas bibliotecas com funções que simplificam a sua programação, por meio de uma sintaxe similar ao das linguagens C e C++.

O Arduino utiliza o microcontrolador Atmega e pode atuar no controle ou no acionamento de algum outro elemento eletroeletrônico conectado ao terminal de saída.

3.3 Comunicação sem Fio

Até há pouco tempo não existia no mercado uma solução normalizada para redes sem fios para aplicações de controle e telemetria. Embora a comunicação sem fios já fosse comum, não havia uma solução desenvolvida especificamente para aplicações de controle de sistemas de ar-condicionado, eletrodomésticos, iluminação residencial, sistemas de segurança e vigilância, brinquedos, aquisição de dados de sensores de temperatura, umidade, precipitação, luminosidade, pressão, etc, conforme ilustrado na Figura 26.

O padrão Zigbee veio para suprir essa necessidade, oferecendo a capacidade de controle, através de dispositivos que não possuem uma grande largura de banda para transmissão de volume de dados, mas atuam de forma rápida e consomem pouca energia, possibilitando que fiquem em locais de difícil acesso sem implicar a perda de confiabilidade de uma falta de energia ou esgotamento da mesma (Ey e Saleiro, 2008).



Figura 26 - Aplicações do Zigbee Extraída de: (Ey e Saleiro, 2008).

Independentemente do tipo de rede implementada, o protocolo permite até 65535 dispositivos para cada nó coordenado (*Zigbee Coordinator*).

3.4 Xbee

Os módulos Xbee, fabricados pela Maxstream, são módulos que incluem todo o *hardware* e a lógica necessária para implementar uma rede Zigbee. Pode-se dizer que um módulo Xbee está para o Zigbee tal como uma placa de rede está para uma rede Ethernet.

Para realizarmos a comunicação entre o computador e o módulo Xbee a fim de configurá-lo, criar, gerenciar, controlar e adquirir dados uma rede Zigbee, é preciso utilizar um adaptador que realize a conversão USB/Serial para podermos ligar o módulo ao computador. Existem duas formas de realizar a interface desses módulos Xbee: utilizando uma placa Arduino que se possa retirar o microcontrolador ou aterrar o pino de reset, levando assim o microcontrolador a não iniciar de forma que o módulo Xbee usará o *chip* FTDI (responsável pela conversão de RS-232 serial

para TTL ou *USB*) presente na placa Arduino (responsável pela comunicação serial entre o microcontrolador e o computador) para a interface, ou adquirir um conector específico para conexão de Xbee no computador, que pode ser um Xbee *dongle* ou um Xbee *Explorer* (Buoro, 2013). Para o trabalho, a interface foi realizada através de uma placa Arduino sem o microcontrolador, conforme Figura 27.



Figura 27 - Xbee ligado a uma placa Arduino sem o microcontrolador

No caso deste trabalho o Zigbee foi usado no modo transparente ponto-a-ponto, que se assemelha a uma comunicação serial sem fio.

3.5 Pacote de suporte do Matlab para o Arduino

O programa utilizado para o controle da embarcação é o Matlab um *software* de computação numérica para engenharia e cálculos científicos. Em seu site a Mathworks, responsável pelo desenvolvimento e suporte do Matlab, disponibilizou um pacote de suporte para a plataforma microcontrolada Arduino, que oferece ao

mesmo tempo suporte ao Matlab e suporte ao Simulink, uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos, onde sua interface utiliza diagramas de blocos para representar os processos ou plantas.

O pacote de suporte para Arduino usa os comandos disponíveis por padrão nas ferramentas de interface serial do Matlab para criar os objetos necessários e criar atalhos aos comandos para possibilitar o acesso simples às portas, assim como ser possível com apenas uma linha de comando colocar um valor analógico em uma determinada porta ou ler o estado da mesma (no caso de algum sensor ou medidor de temperatura). Em suma, esse pacote visa facilitar o uso do Arduino no Matlab, fazendo com que as linhas de comando necessárias sejam bem próximas a linguagem de programação padrão do Arduino (Buoro, 2013).

4 IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS

Para determinação das características de uma embarcação, é necessário dispor-se do modelo matemático do movimento da mesma. A identificação de parâmetros de um modelo é a etapa a seguir da modelagem e geralmente é realizada em condições onde a embarcação atuará.

Para a identificação dos coeficientes do modelo efetuou-se manobras com a embarcação, tais como, movimento para frente e para trás, ao longo da direção horizontal, eixo (x), conforme ilustrado na Figura 28, lateralmente, eixo (y) para a esquerda e para a direita, como ilustrado na Figura 29, e movimentos de rotação no sentido horário e anti-horário, eixo (z), conforme Figura 30, os que mais contribuem para excitar a dinâmica do veículo.

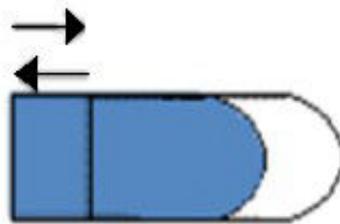


Figura 28 - Movimento longitudinal.

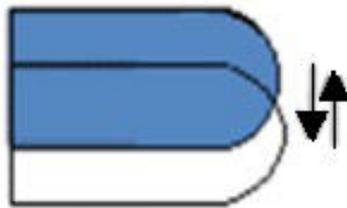


Figura 29 - Movimento lateral.

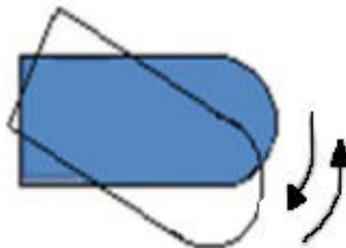


Figura 30 - Movimento rotacional.

Assumimos que a embarcação opera em um ambiente ideal, enquanto os dados de identificação do modelo estão sendo coletadas. Isto é, não há distúrbios, tais como correntes ou vento, e que a embarcação só realiza movimentos em três graus de liberdade: *surge*, *sway* e *yaw*. Assim, não há distúrbios para alterar os movimentos de *pitch* e *roll* ou excitar o movimento de *heave*.

A identificação dos parâmetros da embarcação foi realizada por meio do casamento dos resultados experimentais com os dados de simulação do modelo utilizando o Simulink. O diagrama em blocos desenvolvido no Simulink para o casamento dos dados experimentais, com os dados de simulação pode ser observado na Figura 31. Para a aquisição dos dados de movimento da embarcação para a identificação de parâmetros, foram utilizados o sistema de captura de movimento da Vicon e o Matlab.

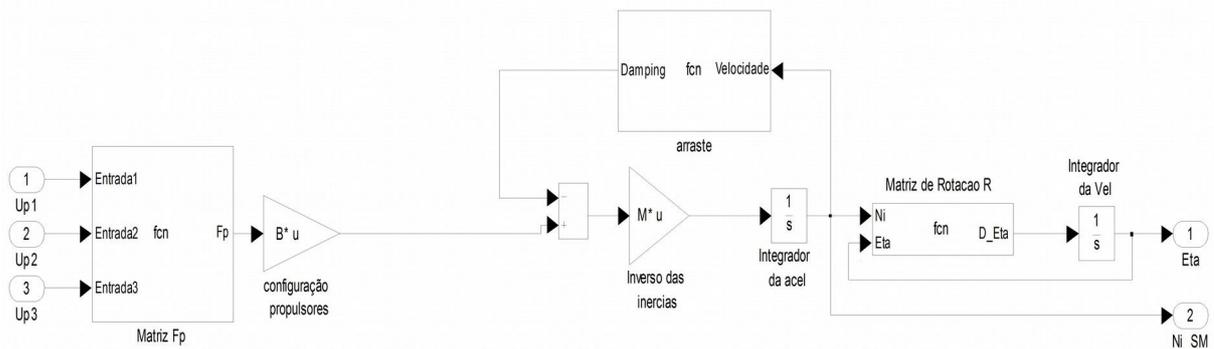


Figura 31 - Diagrama em blocos para a identificação de parâmetros desenvolvido no Simulink

Para a identificação dos parâmetros os coeficientes da matriz de inércia,

$$M = \begin{bmatrix} m_x & 0 & 0 \\ 0 & m_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}, \quad (52)$$

foram considerados como ($m_x = 1kg$, $m_y = 1kg$ e $I_z = 0,011kgm^2$), pois sabe-se que os valores não são iguais para todos os graus de liberdade.

Para cada movimento da embarcação foi gerado um gráfico, contendo a posição da mesma a cada grau de liberdade. Assim, temos que:

- i) C_x^+ e C_x^- (acionando o propulsor traseiro (P1) no modo reverso e direto, respectivamente, permitindo que a embarcação tenha movimentos para frente e para trás);
- ii) C_y^+ e C_y^- (acionando ambos propulsores laterais (P2 e P3) no modo reverso e direto, respectivamente, permitindo que a embarcação tenha movimentos de deslocamento lateral);
- iii) C_ψ^+ e C_ψ^- (acionando os propulsores laterais (P2 e P3) de maneira que eles sempre estivessem trabalhando em modos invertidos, possibilitando movimentos de rotação no sentido horário e anti-horário).

Após a realização dos experimentos verificou-se que as coordenadas do sistema de aquisição de movimento da Vicon é representada de modo diferente ao que estava sendo utilizado no projeto. Foi necessário então modificar as coordenadas utilizadas no projeto para, $x \rightarrow y$, $y \rightarrow x$ e $\psi \rightarrow \psi + \frac{\pi}{2}$.

4.1 Identificação de C_x^+ e C_{nx}^+

O propulsor P1, localizado na popa, foi acionado no modo de operação reverso com um comando degrau, $u(1) = -1$, $u(2) = 0$ e $u(3) = 0$, provocando um movimento longitudinal para frente.

Conforme descrito anteriormente, foi realizado o casamento dos dados obtidos durante o experimento com a simulação, realizada através do *Simulink*. Na Figura 32 são apresentados os gráficos contendo a curva com os valores da posição da embarcação durante o experimento e a aproximação gerada pela simulação, para o levantamento dos valores dos coeficientes C_x^+ e C_{nx}^+ , sendo este último necessário, porque o movimento de translação gera rotação do ângulo de rumo devido ao arraste e assimetrias do barco.

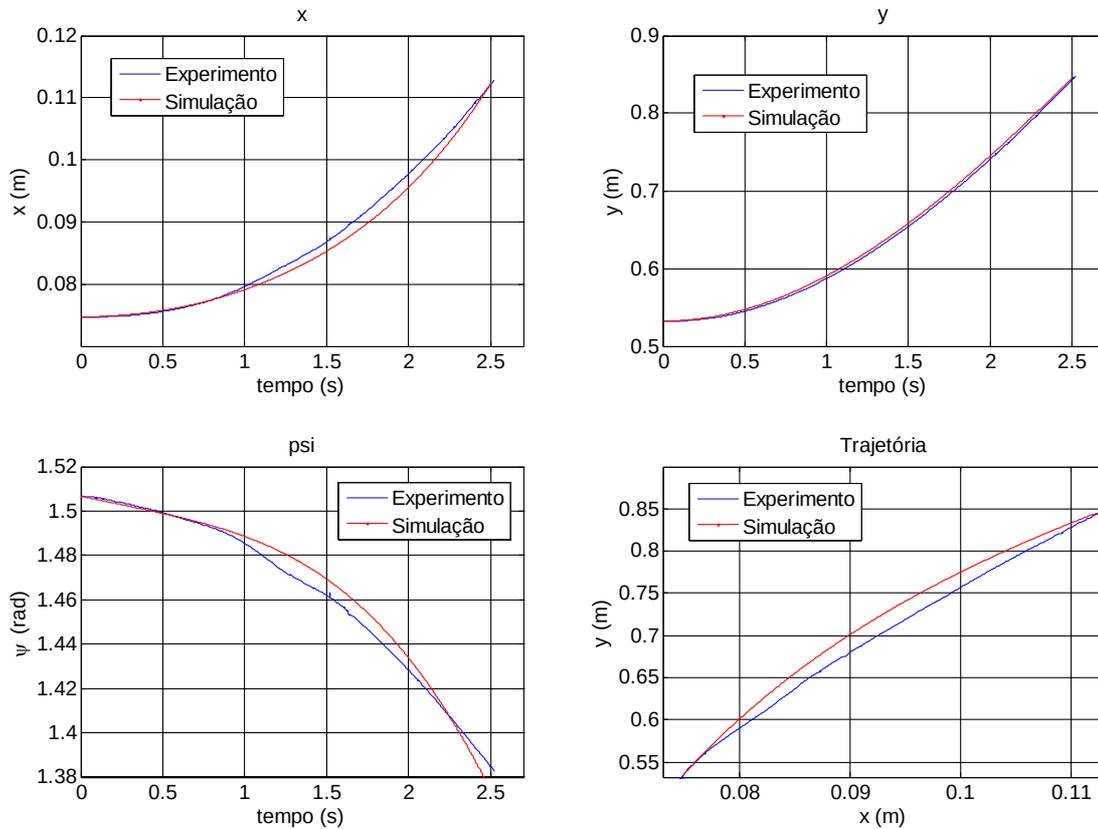


Figura 32 - Casamento da posição da embarcação para obtenção de C_x^+

A linha em azul corresponde a posição da embarcação medida durante o experimento, a linha em vermelho corresponde a aproximação gerada pela simulação em *Simulink*.

Com o procedimento descrito acima obtém-se para o grau de liberdade x

$$C_x^+ = 1,7 \text{ kgs}^2/\text{m} \text{ e } C_{nx}^+ = 0,03 \text{ kgs}^2/\text{m}.$$

Os procedimentos descrito para a obtenção de C_x^+ e C_{nx}^+ repete-se para os demais coeficientes.

4.2 Identificação de C_x^- e C_{nx}^-

O propulsor P1 foi acionado no modo de operação direto com um comando degrau, $u(1) = 1$, $u(2) = 0$ e $u(3) = 0$, provocando um movimento longitudinal para trás.

Na Figura 33 são apresentados os gráficos contendo a curva com os valores da posição da embarcação durante o experimento e a aproximação gerada pela simulação, para o levantamento dos valores dos coeficientes C_x^- e C_{nx}^- .

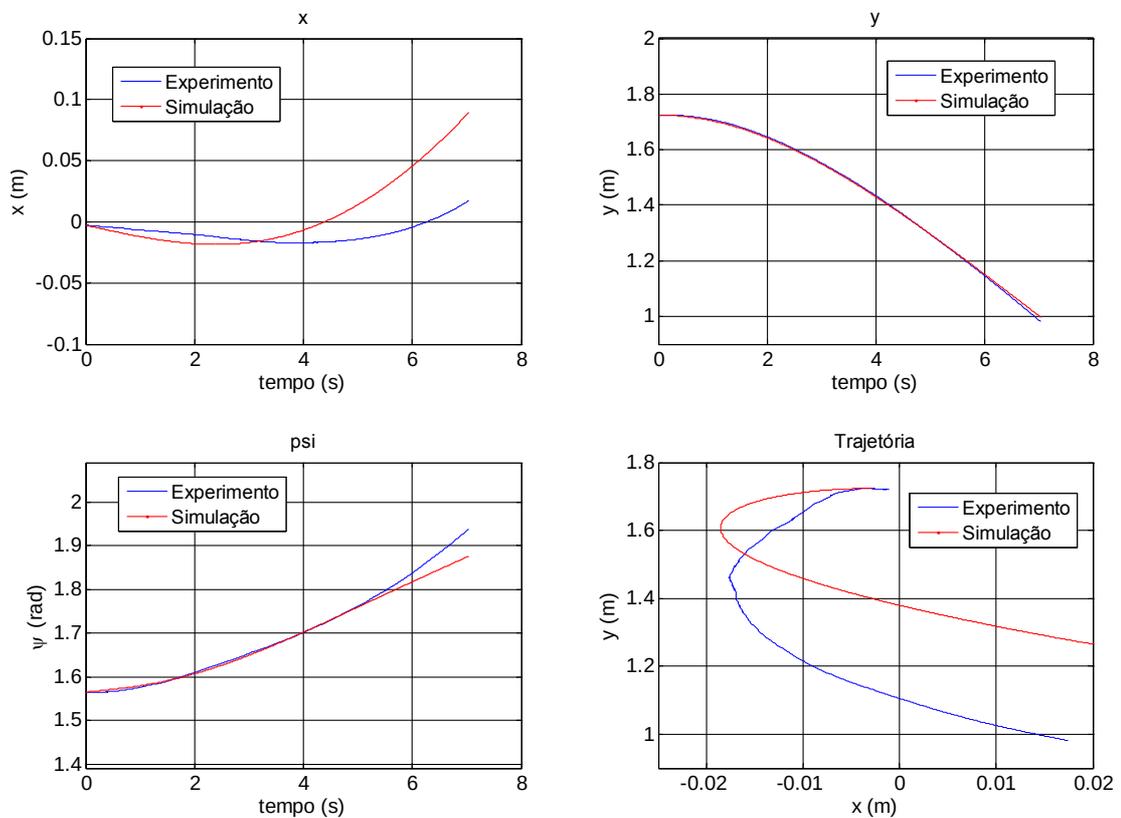


Figura 33 - Casamento da posição da embarcação para obtenção de C_x^-

os valores obtidos foram:

$$C_x^- = -1,5 \text{ kgs}^2/\text{m} \text{ e } C_{nx}^- = 0,0001 \text{ kgs}^2/\text{m}.$$

4.3 Identificação de C_y^+ e C_{ny}^+

Os propulsores P2 e P3 foram acionados com um comando degrau, $u(1) = 0$, $u(2) = -0.8$ e $u(3) = -1$, provocando um movimento lateral para a direita.

Na Figura 34 são apresentados os gráficos contendo a curva com os valores da posição da embarcação durante o experimento e a aproximação gerada pela simulação, para o levantamento dos valores dos coeficientes C_y^+ e C_{ny}^+ .

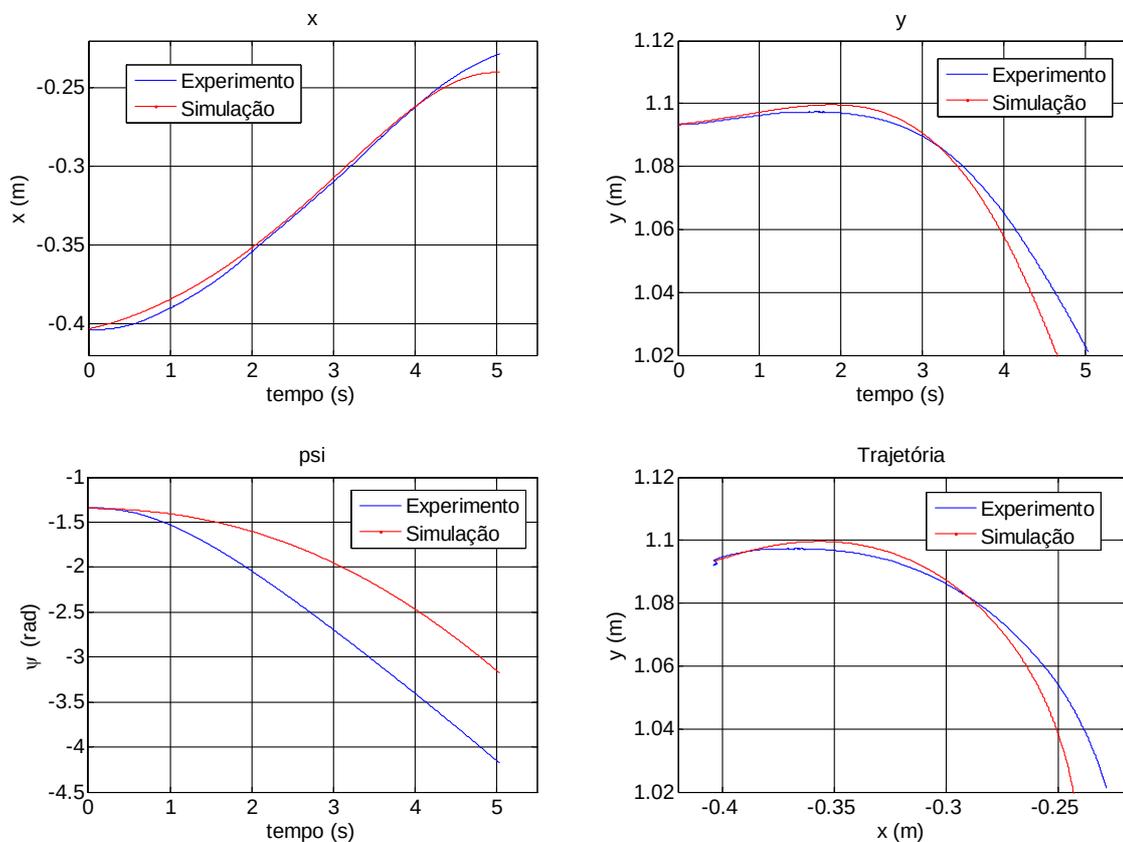


Figura 34 - Casamento da posição da embarcação para obtenção de C_y^+

os valores obtidos foram:

$$C_y^+ = 1.2 \text{ kgs}^2/\text{m} \text{ e } C_{ny}^+ = 0,45 \text{ kgs}^2/\text{m}.$$

4.4 Identificação de C_y^- e C_{ny}^-

Os propulsores P2 e P3 foram acionados com um comando degrau, $u(1) = 0$, $u(2) = 1$ e $u(3) = 1$, provocando um movimento lateral para a esquerda.

Na Figura 35 são apresentados os gráficos contendo a curva com os valores da posição da embarcação durante o experimento e a aproximação gerada pela simulação, para o levantamento dos valores dos coeficientes C_y^- e C_{ny}^- .

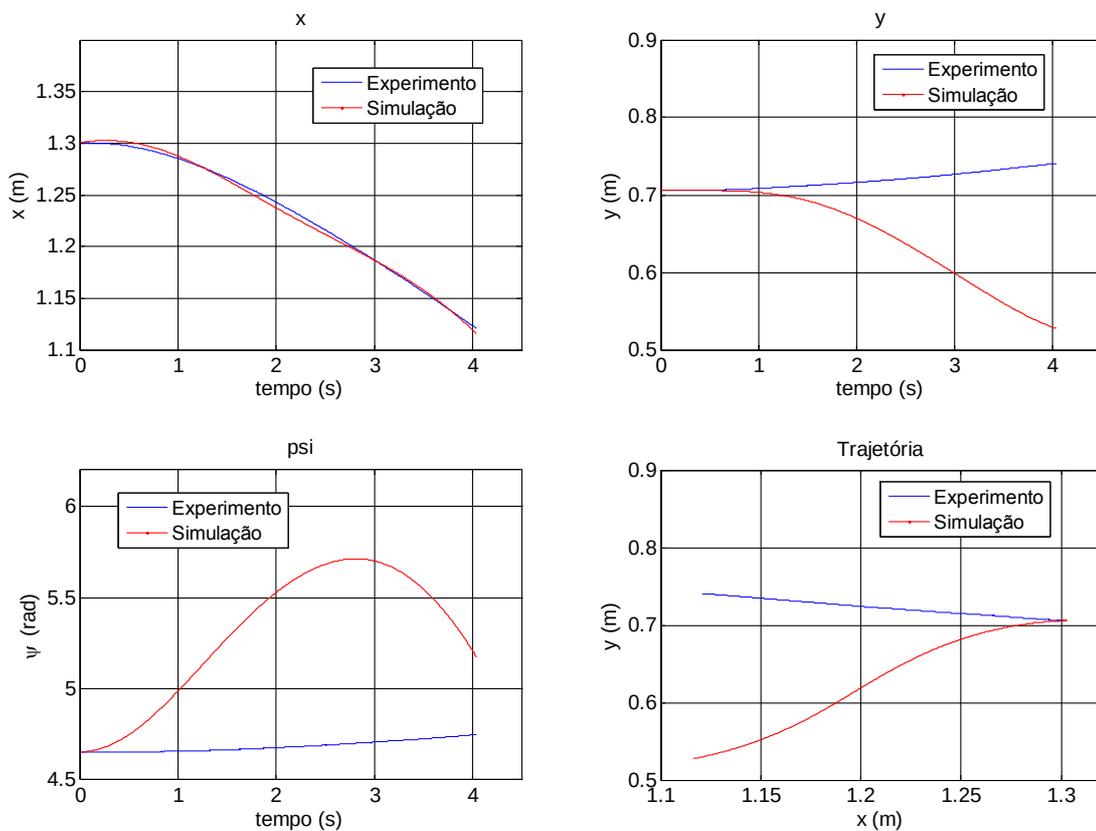


Figura 35 - Casamento da posição da embarcação para obtenção de C_y^-

os valores obtidos foram:

$$C_y^- = -5,4 \text{ kgs}^2/\text{m} \text{ e } C_{ny}^- = 1,8 \text{ kgs}^2/\text{m}.$$

4.5 Identificação de C_{ψ}^+

Os propulsores P2 e P3 foram acionados com um comando degrau, $u(1) = 0$, $u(2) = 0,5$ e $u(3) = -0,5$, provocando um movimento de rotação no sentido horário.

Na Figura 36 são apresentados os gráficos contendo a curva com os valores da posição da embarcação durante o experimento e a aproximação gerada pela simulação, para o levantamento do valor do coeficiente C_{ψ}^+ .

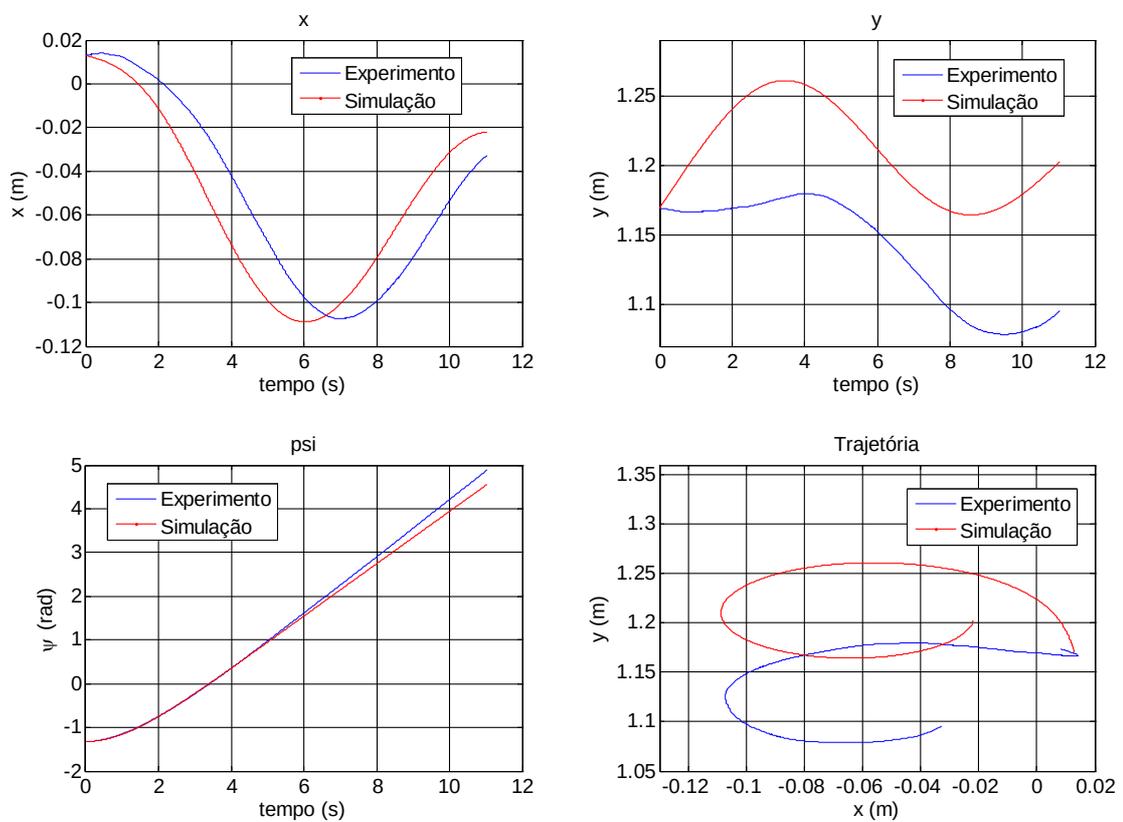


Figura 36 - Casamento da posição da embarcação para obtenção de C_{ψ}^+

o valor obtido foi:

$$C_{\psi}^+ = 0,01 \text{ kgs}^2/\text{rad}.$$

4.6 Identificação de C_{ψ}^{-}

Os propulsores P2 e P3 foram acionados com um comando degrau, $u(1) = 0$, $u(2) = -0,5$ e $u(3) = 0,5$, provocando um movimento de rotação no sentido anti-horário.

Na Figura 37 são apresentados os gráficos contendo a curva com os valores da posição da embarcação durante o experimento e a aproximação gerada pela simulação, para o levantamento dos valores dos coeficientes C_{ψ}^{-} .

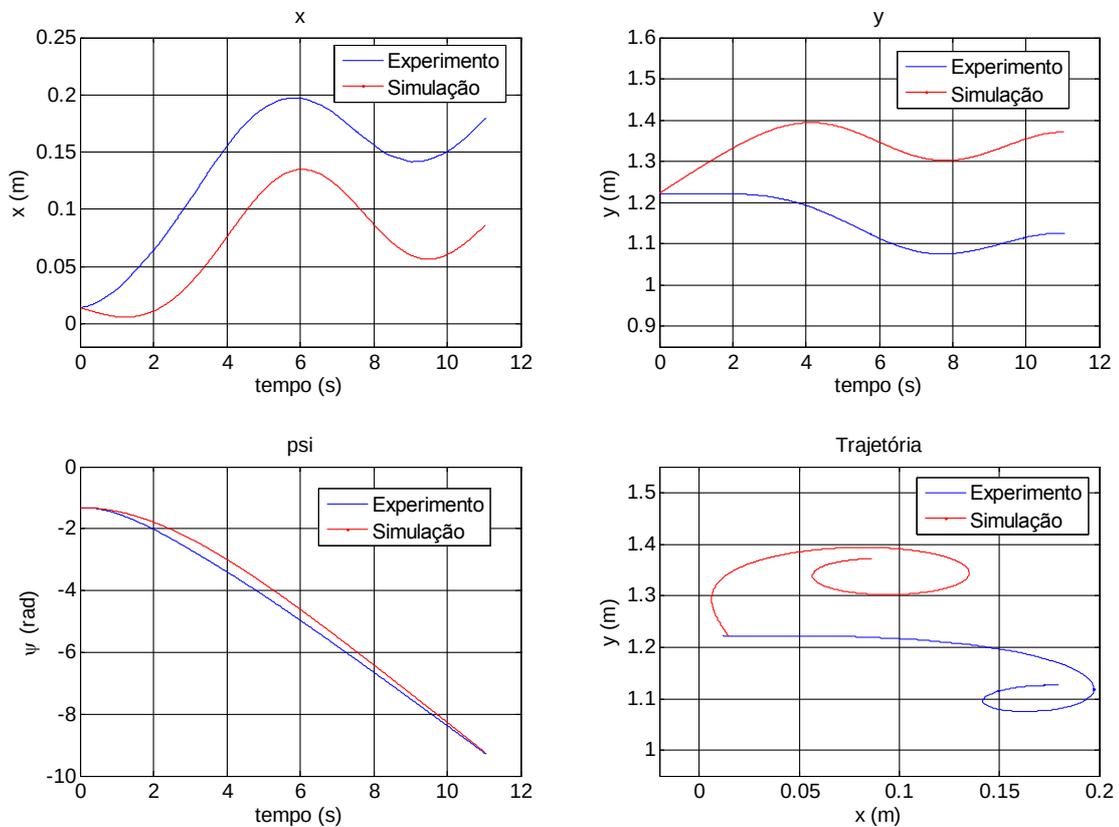


Figura 37 - Casamento da posição da embarcação para obtenção de C_{ψ}^{-}

o valor obtido foi:

$$C_{\psi}^{-} = -0,003 \text{ kgs}^2/\text{rad}$$

Ao final dos procedimentos temos para cada grau de liberdade os valores

apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores obtidos de C_x, C_y e C_ψ .

Grau de Liberdade	Coefficiente Hidrodinâmico	Unidade
C_x^+	1,7	kgs ² /m
C_{nx}^+	0.03	kgs ² /m
C_x^-	-1,5	kgs ² /m
C_{nx}^-	0,0001	kgs ² /m
C_y^+	1.2	kgs ² /m
C_{ny}^+	0,45	kgs ² /m
C_y^-	-5,4	kgs ² /m
C_{ny}^-	1,8	kgs ² /m
C_ψ^+	0,01	kgs ² /rad
C_ψ^-	-0,003	kgs ² /rad

4.7 Identificação dos Parâmetros dos Propulsores

Da equação (46), para a identificação dos parâmetros dos propulsores, a equação dinâmica é reescrita a seguir:

$$\dot{v} + \begin{bmatrix} C_x(\gamma_{rc})V_{rc}^2 \\ C_y(\gamma_{rc})V_{rc}^2 \\ C_\psi(r)r^2 \end{bmatrix} = M^{-1}\tau. \quad (53)$$

Entretanto como o barco opera em velocidade baixa, a componente quadrática do arraste hidrodinâmico pode ser desprezada. Logo a equação (53) pode ser reescrita como

$$\dot{v} = M^{-1}\tau. \quad (54)$$

Conclui-se que o vetor de controle τ para a configuração de propulsores presente no barco como

$$\tau = BF_p, \quad (55)$$

onde

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & R_{p2x} & R_{p3x} \end{bmatrix} \quad (56)$$

é a matriz que representa a disposição dos propulsores no barco sendo $R_{p2x} = -0,3209m$ e $R_{p3x} = 0,1096m$ as coordenadas dos eixos dos propulsores P2 e P3, conforme ilustra a figura (8), e

$$F_p = \begin{bmatrix} F_{p1} \\ F_{p2} \\ F_{p3} \end{bmatrix} \quad (57)$$

é o vetor de força dos propulsores.

O procedimento para identificação dos parâmetros dos propulsores foi realizado através da comparação dos dados obtidos experimentalmente com a simulação.

Ao final tem-se os valores apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de α_i^* .

Coefficientes do empuxo da hélice	(N)
α_1^+	0,12
α_1^-	-0,042
α_2^+	0,026
α_2^-	-0,034
α_3^+	0,032
α_3^-	-0,024

5 VALIDAÇÃO DO MODELO IDENTIFICADO

Para a validação do modelo identificado foram realizadas simulações comparando os parâmetros identificados com outros experimentos, que podem ser observados em seguida.

5.1 Resultados obtidos para C_x^+

O propulsor P1 foi acionado com comando degrau com $u(1) = -0,6$, $u(2) = 0$ e $u(3) = 0$. As condições iniciais referentes ao barco movimentando-se no sentido positivo do eixo x foram: $\eta(0) = [0,0382 \ 0,4812 \ 1,6028]^T$ e $v(0) = [-0,018 \ 0,01 \ -0,025]^T$. Os gráficos da Figura 38 ilustram a comparação entre a posição do barco durante o experimento e a simulação.

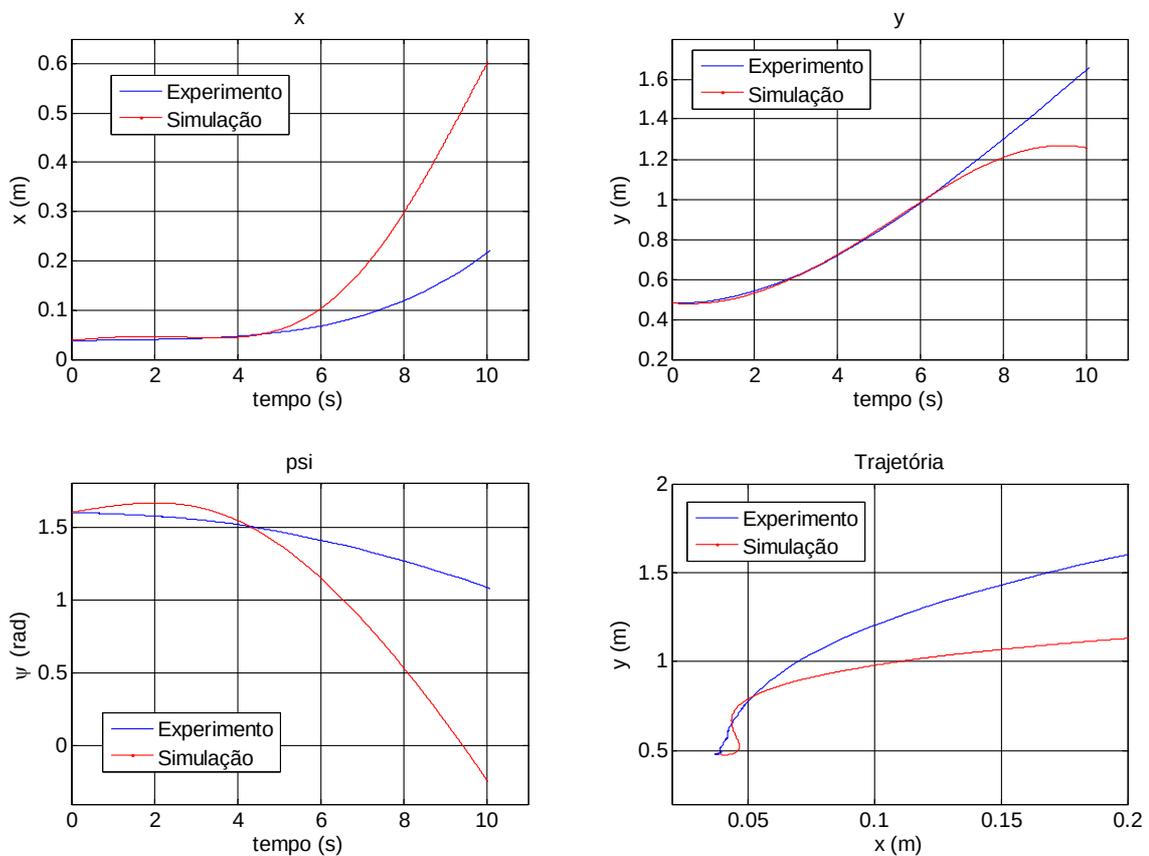


Figura 38 - Validação da posição da embarcação em C_x^+

5.2 Resultados obtidos para C_x^-

O propulsor P1 foi acionado com comando degrau com $u(1) = 1$, $u(2) = 0$ e $u(3) = 0$. As condições iniciais referentes ao barco movimentando-se no sentido negativo do eixo x foram: $\eta(0) = [-0,0135 \ 1,7435 \ 1,6316]^T$ e $v(0) = [-0,012 \ 0,008 \ 0,007]^T$. Os gráficos da Figura 39 ilustram a comparação entre a posição do barco durante o experimento e a simulação.

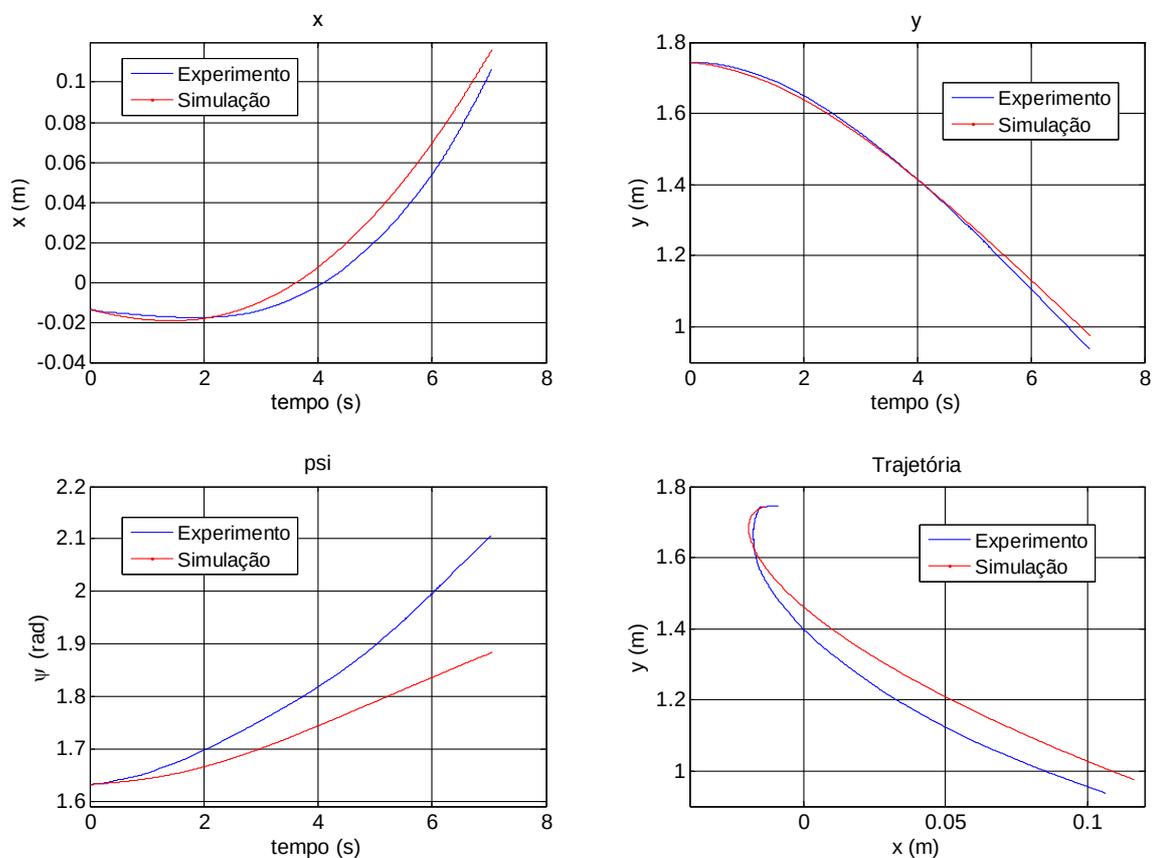


Figura 39 - Validação da posição da embarcação em C_x^-

5.3 Resultados obtidos para C_y^+

Os propulsores P2 e P3 foram acionados com comando degrau com $u(1) = 0$, $u(2) = -0,5$ e $u(3) = -0,5$. As condições iniciais referentes ao barco movimentando-se no sentido positivo do eixo y foram: $\eta(0) = [-0,4396 \ 0,9691 \ -1,4431]^T$ e

$v(0) = [0 \ 0,016 \ 0]^T$. Os gráficos da Figura 40 ilustram a comparação entre a posição do barco durante o experimento e a simulação.

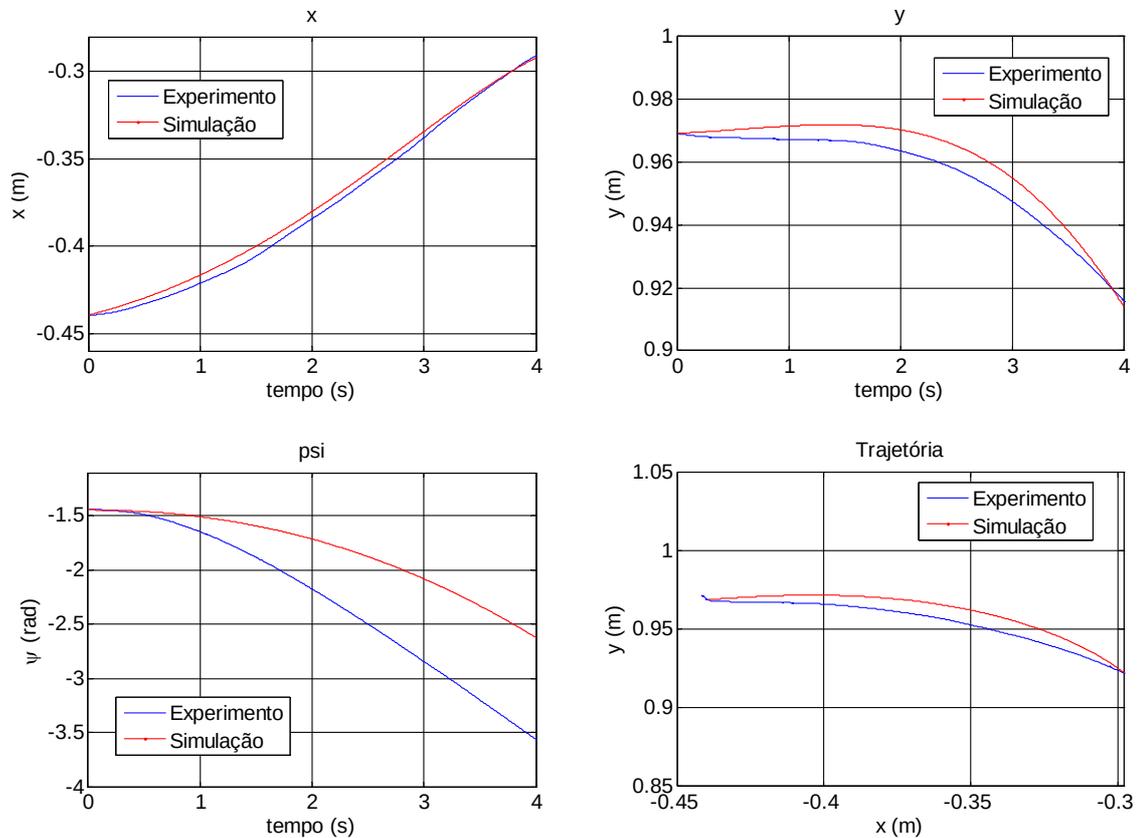


Figura 40 - Validação da posição da embarcação em C_y^+

5.4 Resultados obtidos para C_y^-

Os propulsores P2 e P3 foram acionados com comando degrau com $u(1)$, $u(2) = 0,5$ e $u(3) = 0,5$. As condições iniciais referentes ao barco movimentando-se no sentido negativo do eixo y foram: $\eta(0) = [0,8094 \ 1,4323 \ 4,5963]^T$ e $v(0) = [-0,022 \ -0,015 \ 0,004]^T$. Os gráficos da Figura 41 ilustram a comparação entre a posição do barco durante o experimento e a simulação.

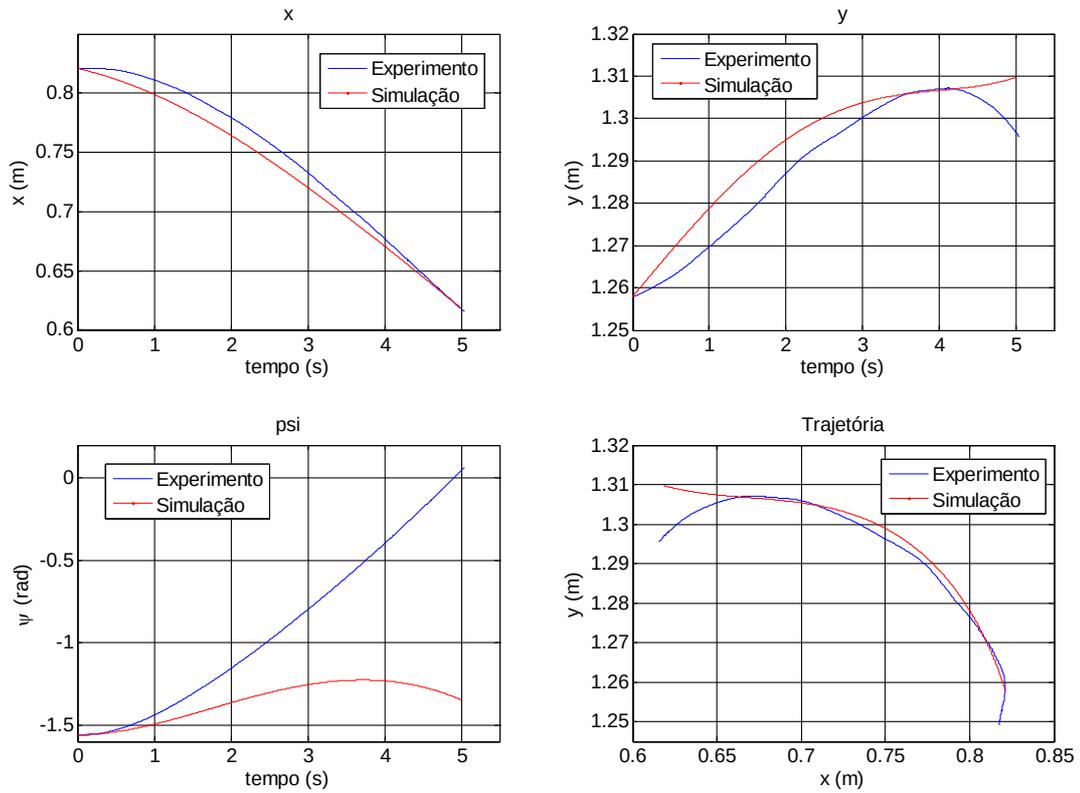


Figura 41 - Validação da posição da embarcação em C_y^-

6.5 Resultados obtidos para C_ψ^+

Os propulsores P2 e P3 foram acionados com comando degrau com $u(1) = 0$, $u(2) = 0,5$ e $u(3) = -0,5$. As condições iniciais referentes à posição de C_ψ quando o barco realiza movimento de rotação no sentido horário foram: $\eta(0) = [0.0145 \ 1.1211 \ -1.3177]^T$ e $v(0) = [-0.04 \ 0.005 \ 0]^T$. Os gráficos da Figura 42 ilustram a comparação entre a posição do barco durante o experimento e a simulação.

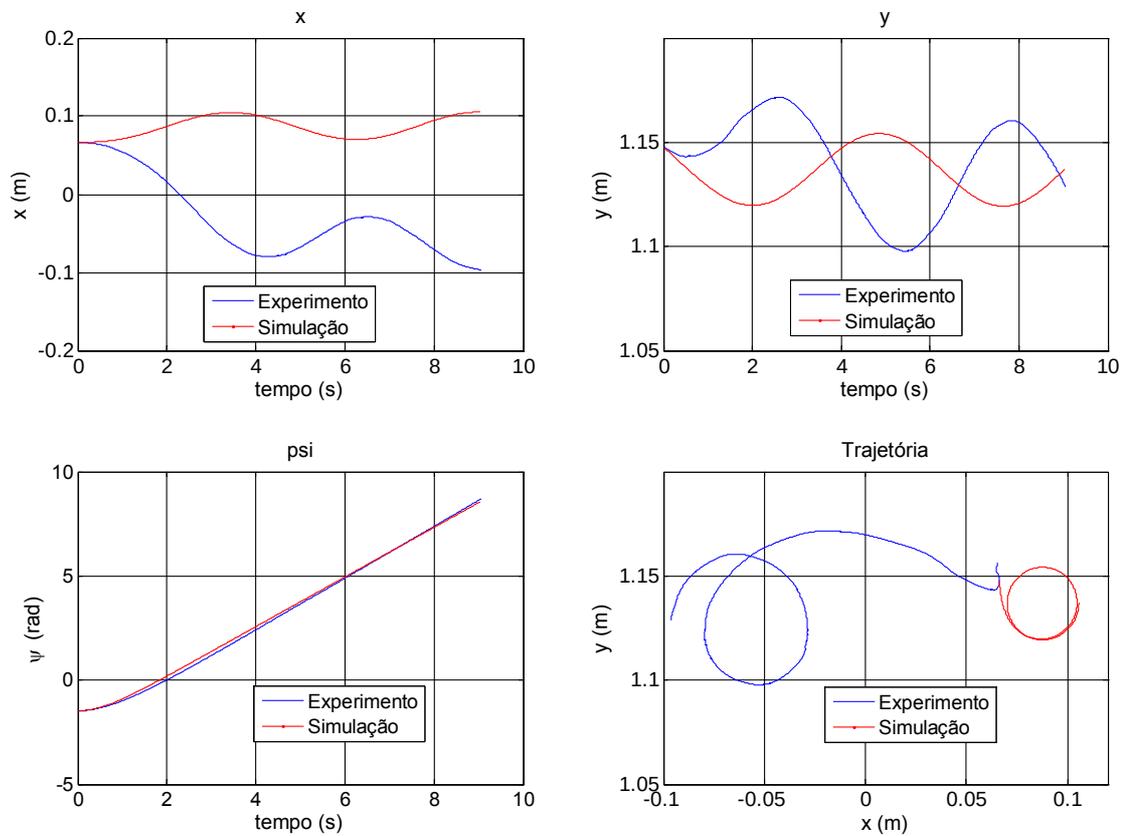


Figura 42 - Validação da posição da embarcação em C_{ψ}^+

5.6 Resultados obtidos para C_{ψ}^-

Os propulsores P2 e P3 foram acionados com comando em degrau com $u(1) = 0$, $u(2) = -0,5$ e $u(3) = 0,5$. As condições iniciais referentes à posição de C_{ψ} quando o barco realiza movimento de rotação no sentido anti-horário foram $\eta(0) = [0,0086 \ 1,1233 \ -1,383]^T$ e $v(0) = [-0,0045 \ 0,03 \ -0,26]^T$. Os gráficos da Figura 43 ilustram a comparação entre a posição do barco durante o experimento e a simulação.

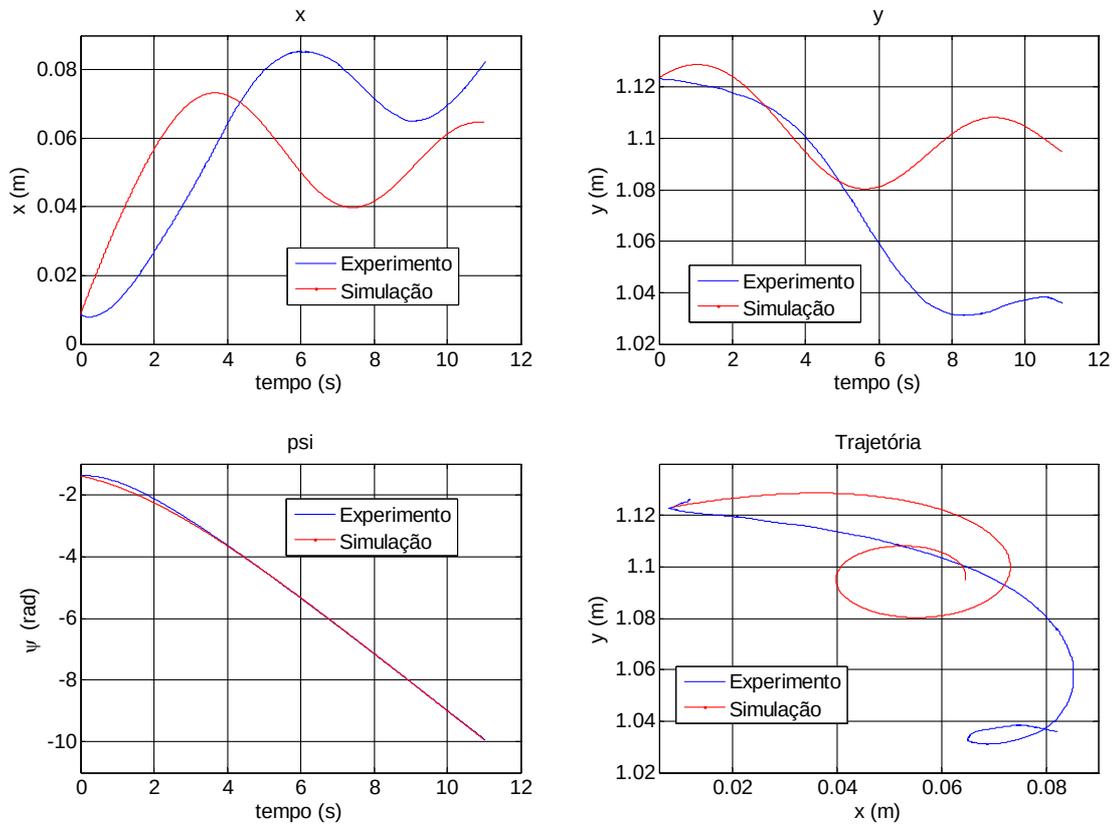


Figura 43 - Validação da posição da embarcação em C_{ψ}^{-}

Apesar de a técnica adotada não ser a ideal, os resultados apresentam uma margem de erro aceitável.

CONCLUSÃO

O procedimento desenvolvido para a identificação dos parâmetros apresentou resultados satisfatórios. O sistema de captura e análise de movimento utilizado apresentou ótimo desempenho.

O acionamento dos motores utilizando o Matlab funcionou plenamente.

A modelagem foi efetuada admitindo-se que os movimentos do barco são independentes, o que não é bem verdade. Assumiu-se para o barco uma distribuição de massa homogênea e que a origem do referencial coincidia com o centro do barco.

Como o experimento foi realizado no laboratório, com quase total ausência de perturbações oriundas do ambiente (vento, onda e correnteza), as mesmas foram desprezadas. Para a utilização do barco em ambiente externo as perturbações devem ser consideradas.

Como não é possível obter um modelo matemático do veículo com exatidão, houve uma dificuldade em se obter o casamento dos dados experimentais com os dados simulados, sendo necessária a identificação de outros parâmetros para um melhor resultado

Propostas para trabalhos futuros

- Utilizar o sistema de captura de movimento da Vicon em outros projetos
- Estudar outros métodos de identificação de parâmetros
- Desenvolver estruturas de controle para o barco utilizando o modelo desenvolvido

REFERÊNCIAS

Almeida, T. E. P. de. (2014) Sistema de sensoriamento de orientação para um veículo aquático de superfície utilizando sensores de baixo custo. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Amaral, G. S. (2008) Sistema de posicionamento dinâmico para um pequeno veículo flutuante. Projeto de Graduação, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações, Rio de Janeiro, Brasil.

Avila, J P. J.; Adamowsky, J. C.; Barbarini, L. H. M. (2005) Estimação de coeficientes hidrodinâmicos de um veículo submarino semi-autônomo.

Bibuli, M; Bruzzone, G; Caccia, M; Lapierre, L. (2012) *Control of Unmanned Surface Vehicles*. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 19, no. 3, p. 92-102, *September*.

Buoro, A. S. (2013) Controle dos motores e acionamento sem fios de uma pequena embarcação. Projeto de Graduação, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações, Rio de Janeiro, Brasil.

Cunha, J. P. V. S.; Lizarralde, F. C.; Costa, R. R., Hsu, L. (2000) Avaliação experimental da modelagem e simulação dinâmica de um veículo submarino de operação remota. *Revista de Controle e Automação*, Vo. 11, no. 2, p. 82-93, Mai., Jun., Jul. e Agosto.

Dinis, J. (2011) Manual de captura de movimentos usando o sistema Vicon e o *software* iQ. Laboratório de Tecnologias e Interação e Interfaces da Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, Portugal. Página consultada em 11 de abril de 2016, <<http://www.interactfields.com/aulas/cadmh/wp->

[content/uploads/2011/04/Manual_IQ.pdf](#)>.

D_Robotics. (2011) Manual Arduino Motor Shield (L298). Página consultada em 15 de junho de 2016, <http://elesson.tc.edu.tw/md221/pluginfile.php/4241/mod_page/content/10/L298_Motor_Shield_Manual.pdf>.

Ey, E; Saleiro, M. (2008) Zigbee Uma Abordagem Prática. Universidade do Algarve, Escola Superior de Tecnologia.

Fossen, T. I. (2002) *Marine control systems: guidance, navigation and control of ship, rigs and underwater vehicles*. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics.

Moeslund, T. B.; Hilton, A. & Krüger V. (2006) *A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis*. *Computer Vision and Image Understanding*, no. 104, p. 90-126.

Pinheiro, A. P. (2008) Desenvolvimento de captura e análise de movimentos baseado em técnicas de visão computacional. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

Santana, A. V. (2010) Estudo do comportamento dinâmico aplicável a veículos de localização, investigação e resgate submarino. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.

Schultze, H. J. (2012) Projeto e construção de uma embarcação teleoperada. Projeto de Graduação, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações, Rio de Janeiro, Brasil.

SNAME (*Society of Naval Architects and Marine Engineers*) (1950) *Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid*.

Sokal, G. J. (2010) Posicionamento dinâmico utilizando controle a estrutura variável e servovisão. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Souza, E. C. (2003) Modelagem e controle de veículos submarinos não tripulados. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecatrônica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Vicon *Tracker Guide*. (2013) Página consultada em 12 de junho de 2016, <<http://andrewd.ces.clemson.edu/courses/cpsc412/manuals/Vicon%20Tracker%20%20Manual.pdf>>.