

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**CONTROLE POR PLANEJAMENTO E ACOMPANHAMENTO
DE TRAJETÓRIA PARA VEÍCULO REMOTAMENTE OPERADO**

Por

Ana Carolina dos Santos Paulino

Brasília, dezembro de 2015



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**CONTROLE POR PLANEJAMENTO E ACOMPANHAMENTO
DE TRAJETÓRIA PARA VEÍCULO REMOTAMENTE OPERADO**

Por

Ana Carolina dos Santos Paulino

*Relatório submetido como requisito parcial de obtenção
de grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Prof. Eugênio Libório F. Fortaleza, ENM/UnB _____
Orientador

Prof. Eduardo Stockler Tognetti, ENE/UnB _____
Examinador interno

Prof. Adriano Todorovic Fabro, ENM/UnB _____
Examinador interno

Brasília, dezembro de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

DOS SANTOS PAULINO, ANA CAROLINA

Controle por planificação e acompanhamento de trajetória para Veículo Remotamente Operado , [Distrito Federal] 2015.

x, 73p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2015). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1. Veículo subaquático | 2. Identificação de parâmetros |
| 3. Sistemas Diferencialmente Planos | 4. Controle |
| I. Mecatrônica/FT/UnB | II. Título (Série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DOS SANTOS PAULINO, A. C., (2015). Controle por planificação e acompanhamento de trajetória para Veículo Remotamente Operado. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-n°015/2015, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 73p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ana Carolina dos Santos Paulino

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Controle por planejamento e acompanhamento de trajetória para Veículo Remotamente Operado

GRAU: Engenheiro

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Ana Carolina dos Santos Paulino

QS 7 Rua 610 Casa 16 - Águas Claras.

71971-180 Brasília – DF – Brasil.

Dedicatória

Ao Primeiro Engenheiro, que criou a luz e detém o controle da minha vida.

Ana Carolina dos Santos Paulino

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Natanael e Ana Lúcia Paulino, e à minha avó, Genésia dos Santos, que me ofereceram suporte de todas as formas, celebraram comigo cada etapa de minha formação e foram força nos momentos em que a minha se esvaía. "Se vi mais longe foi por estar de pé sobre ombros de gigantes". O mérito de eu ser a primeira engenheira da família pertence aos senhores.

Sou grata aos meus educadores, que me ensinaram, além de ciência, gosto pela busca do conhecimento. Em especial, agradeço aos professores responsáveis pelo projeto Brafitec (professor Marco de Oliveira e Alexandre Romariz), por viabilizarem uma oportunidade que definiu os meus horizontes profissionais; e ao professor Eugênio Fortaleza, que me tutorou com paciência e generosamente partilhou do seu profundo saber.

Agradeço aos amigos contemporâneos de universidade, que me inspiraram e ensinaram durante toda a minha formação acadêmica. Dentre eles, cito Júlio Seype, que me ensinou bem cedo que "um engenheiro não aprende tudo o que deve saber apenas na sala de aula"; José Oniram, que sempre foi solícito para me orientar e ensinar, e sem o qual eu não teria alcançado os resultados que se encontram neste escrito; Marcela Carvalho, cujo exemplo, companhia e companheirismo me levaram bem mais longe do que eu poderia ir só; Jéssica Favilla e Ícaro Alves, cujos esclarecimentos e apoio dados foram absolutamente fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço aos membros da Equipe DROID por expandirem o propósito da equipe: mais do que um grupo de trabalho que visa divulgar a engenharia mecatrônica e a UnB e expor seus alunos à prática de projetos, a DROID tem se tornado uma família. É lindo ver florescer no grupo tamanho aprendizado.

À Anna Carolina, do Departamento de Engenharia Elétrica, bem como às funcionárias do SAA, sou profundamente grata pela longa escuta e por viabilizarem o andamento da minha formação acadêmica.

Por fim, e principalmente, agradeço a Deus, que tem me conduzido, em meio às vagas desta vida e à toda impossibilidade, ao centro de sua vontade: à confiança e dependência irrestrita em seus desígnios.

Ana Carolina dos Santos Paulino

RESUMO

Veículos Remotamente Operados são equipamentos de grande utilidade na indústria petroleira, e sua aplicação se dá em atividades de manutenção, montagem e inspeção em ambientes hostis a mergulhadores. O presente trabalho apresenta aspectos relativos à dinâmica e ao controle deste tipo de veículo e traz a metodologia empregada para a identificação e o controle de uma planta real usando a técnica *flatness*.

Palavras-chave: Veículo subaquático, identificação, controle, *flatness*.

ABSTRACT

Remote Operated Vehicles play an important role in the offshore oil and gas industry, on which it is used on maintenance, assembling and inspection tasks in hazardous environments. This work presents some of the dynamics and control on such type of vehicles and depicts the methodology employed on system identification and control of a real plant using the flatness technique.

Keywords: Unverwater vehicle, system identification, control, flatness.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	1
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO.....	2
1.4	RESULTADOS OBTIDOS	2
1.5	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO.....	2
2	VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS	4
2.1	HISTÓRICO	4
2.2	CARACTERÍSTICAS	5
2.3	PLATAFORMA: <i>VideoRay 4 Pro</i>	5
3	MODELO MATEMÁTICO	8
3.1	CINEMÁTICA	8
3.2	DINÂMICA	12
3.2.1	VEÍCULO SUBAQUÁTICO.....	12
3.2.2	NAVIO DE SUPERFÍCIE.....	18
3.2.3	CABO UMBILICAL	18
4	CONTROLE POR PLANEJAMENTO E ACOMPANHAMENTO DE TRAJETÓRIA	21
4.1	CONTROLE EM MALHA ABERTA.....	24
4.2	RASTREAMENTO DE TRAJETÓRIA.....	25
5	PROCEDIMENTOS DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS	27
5.1	IDENTIFICAÇÃO DE RUÍDOS E PERTURBAÇÕES	27
5.2	IDENTIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE CADA VARIÁVEL DE ESTADO PARA ÚNICA ATUAÇÃO	28
5.3	IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DO NAVIO DE SUPERFÍCIE, ENVOLVENDO ATUAÇÕES EM AVANÇO E GUINADA	33
6	PROCEDIMENTOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE	36
6.1	SIMULAÇÃO	36
6.2	ASPECTOS DE IMPLEMENTAÇÃO NA PLANTA REAL	39

7	RESULTADOS DA IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS	41
7.1	DADOS OBTIDOS DA ETAPA DE IDENTIFICAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE RUÍ- DOS E PERTURBAÇÕES (SEÇÃO 5.1)	41
7.2	DADOS OBTIDOS DA ETAPA DE IDENTIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂ- MICO DE CADA VARIÁVEL DE ESTADO PARA ÚNICA ATUAÇÃO (SEÇÃO 5.2)	42
7.3	DADOS OBTIDOS DA ETAPA DE IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DO NAVIO DE SUPERFÍCIE (SEÇÃO 5.3)	46
8	RESULTADOS OBTIDOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE	48
8.1	RESPOSTA ÀS TRAJETÓRIAS PROPOSTAS	48
8.2	RESPOSTA A PERTURBAÇÕES	49
9	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

LISTA DE FIGURAS

2.1	ROV Kaiko - Fonte: <i>www.mbari.org</i>	4
2.2	ROV VideoRay 4 Pro.....	6
3.1	Sistemas de coordenadas fixo e móvel.	9
3.2	Esforços externos dispostos no modelo de cabo apresentado.	20
5.1	Sinal pseudoaleatório em avanço.....	28
5.2	Autocorrelação do sinal de avanço	28
6.1	Malha de controle de navio de superfície	39
6.2	Detalhe do bloco <i>Gerando T1 e T2 via Flatness</i> da Figura 6.1	40
7.1	Comparação entre as respostas dos modelos linear e quadrático e a do sistema real... ..	44
8.1	Trajетórias de velocidades nominais e obtidas do modelo do navio de superfície para perfis constantes de velocidade em avanço e em guinada	49
8.2	Acionamentos nominais e efetuados nas trajetórias da Figura 8.1	50
8.3	Trajетórias de velocidades nominais e obtidas do modelo do navio de superfície para perfil de velocidade polinomial em avanço e constante em guinada.....	50
8.4	Acionamentos nominais e efetuados nas trajetórias da Figura 8.3	51
8.5	Trajетórias de velocidades nominais e obtidas do modelo do navio de superfície para perfil de velocidade constante e avanço e polinomial em guinada	51
8.6	Acionamentos nominais e efetuados nas trajetórias da Figura 8.5	52
8.7	Curva polinomial usada como entrada em ensaios com perfis polinomiais	52
8.8	Trajетória espacial referente à Figura 8.1: perfis de velocidade constantes	53
8.9	Trajетória espacial referente à Figura 8.3: perfil polinomial em avanço e constante em guinada	53
8.10	Trajетória espacial referente à Figura 8.5: perfil constante em avanço e polinomial em guinada	54
8.11	Trajетórias de velocidades sob efeito de perturbação degrau em avanço	54
8.12	Acionamentos sob efeito de perturbação degrau em avanço	55
8.13	Trajетórias de velocidades sob efeito de perturbação degrau em deriva	55
8.14	Acionamentos sob efeito de perturbação degrau em deriva	56
8.15	Trajетórias de velocidades sob efeito de perturbação degrau em guinada	56
8.16	Acionamentos sob efeito de perturbação degrau em guinada	57

LISTA DE TABELAS

2.1	Dados recebidos dos sensores e suas unidades de medida, com notação segundo a Tabela 3.1	7
2.2	Dados técnicos do sistema	7
3.1	Variáveis de estado para os diferentes referenciais do problema.	9
7.1	Leituras de sensores para ROV fora e dentro d'água	41
7.2	Erros quadráticos médios para cada um dos ensaios de identificação do comportamento dinâmico de cada variável de estado para única atuação	43
7.3	Resultados de identificação para cada eixo.....	45
7.4	Resultados de identificação para eixos onde ocorre atuação direta	45
7.5	Resultados de identificação do navio de superfície	47
7.6	Erros quadráticos médios para os experimentos com resultados convergentes dos ensaios do Navio de Superfície	47
8.1	Dados obtidos dos gráficos de perturbação.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

B	Empuxo hidrostático sobre o veículo	$[N]$
l_{0_i}	Comprimento natural do i -ésimo elemento do cabo umbilical	$[m]$
m	Massa do robô	$[Kg]$
p, q, r	Velocidades angulares no referencial do robô, conforme Tabela 3.1	$[rad/s]$
O	Referencial	$[m]$
r	Vetor distância	$[m]$
S	Área molhada do veículo	$[m^2]$
T	Esforço de tensão	$[N]$
u, v, w	Velocidades lineares no referencial do robô, conforme Tabela 3.1	$[m/s]$
W	Peso do veículo	$[N]$
x, y, z	Coordenadas dos centros de massa ou de empuxo	$[m]$

Símbolos Gregos

β	Sinal de atuação dos motores a nível de <i>software</i>	Adimensional
∇	Volume de fluido deslocado pelo veículo	$[m^3]$
v_c	Velocidade de correnteza	$[m/s]$
η_1	Vetor de coordenadas lineares com relação a $Oxyz$. $\eta_1 = [xyz]^T$	$[m]$
η_2	Vetor de coordenadas angulares com relação a $Oxyz$. $\eta_2 = [\psi\theta\phi]^T$	$[rad]$
λ	Atraso da resposta do sistema dinâmico do ROV	$[s]$
ν_1	Vetor de velocidades lineares com relação a $Ox_my_mz_m$. $\nu_1 = [uvw]^T$	$[m/s]$
ν_2	Vetor de velocidades angulares com relação a $Ox_my_mz_m$. $\nu_2 = [pqr]^T$	$[rad/s]$
ρ	Massa específica do fluido que circunda o veículo	$[Kg/m^3]$
ϕ, θ, ψ	Velocidades angulares no referencial inercial, conforme Tabela 3.1	$[rad/s]$
τ	Vetor de esforços externos. $\tau = [\tau_1^T \tau_2^T]^T$	$[N]$

Matrizes

C	Matrizes que contém componentes de esforços da dinâmica do robô, ou matriz de rotação
F	Matrizes que contém componentes de esforços da dinâmica do robô
I_0	Matriz de momentos e produtos de inércia do robô em relação a $Ox_my_mz_m$
J	Matriz que reúne todas as rotações entre os sistemas de coordenadas do robô e do referencial inercial
M	Matriz de massa
$O_{m \times n}$	Matriz de zeros $n \times m$

Subscritos

A	Relativo à massa adicionada
B	Relativo ao centro de empuxo
c	Relativo à correnteza
$cabo$	Relativo ao cabo
CR	Corpo Rígido
D, d	Valor desejado, ou relativo ao arrasto hidrodinâmico
dl	Arrasto hidrodinâmico linear
dnl	Arrasto hidrodinâmico não-linear
G	Restaurativo, ou relativo ao centro de massa
m	Relativo à massa adicionada
n	Componente normal de um esforço
NS	Navio de superfície
r	Relativo
t	Componente tangencial de um esforço
xyz	Referencial inercial
$x_m y_m z_m$	Referencial com relação ao robô (móvel)

Siglas

LTI	Sistemas Lineares Invariantes no Tempo (<i>Linear Time-Invariant Systems</i>)
LVT	Sistemas Lineares Variantes no Tempo (<i>Linear Time-Variant Systems</i>)
MIMO	Várias entradas, várias saídas (<i>Multiple Inputs, Multiple Outputs</i>)
ROV	Remote Operated Vehicle
SISO	Única entrada e única saída (<i>Single Input, Single Output</i>)
SNAME	<i>Society of Naval Architects and Marine Engineers</i>
MEMS	<i>Microelectromechanical systems</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Veículos Remotamente Operados (*Remoted Operated Vehicles* - ROVs) são equipamentos relevantes no processo de inspeção em ambientes aquáticos. Seu uso massivo teve início na década de 60, pela Marinha dos Estados Unidos, e se estendeu a aplicações em extração de petróleo em ambientes *offshore*. Poucas décadas depois, seu uso tornou-se imprescindível para a indústria petrolífera, pois a extração de petróleo em águas profundas e ultra-profundas não mais permitia o emprego de mergulhadores para as tarefas de supervisão, guiagem e montagem dos equipamentos *in loco*, pela enorme pressão hidrostática à qual estariam submetidos.

1.2 Definição do problema

Atualmente, o controle de ROVs é largamente conduzido por operadores humanos, tarefa que requer treinamento e destreza. Um objetivo natural e esperado desse contexto é a automatização do controle de trajetórias do veículo. Assim, enquanto o controle autônomo calcula o acionamento a ser dado aos motores, operadores terão apenas a prerrogativa de selecionarem as trajetórias a serem efetuadas pelo robô submarino.

Sendo o modelo dinâmico do ROV caracterizado por um sistema não-linear e acoplado, convém procurar uma categoria de controladores que sane ao máximo possível os fatores que elevam a complexidade na controlabilidade do robô. O controle *flatness* revela-se como uma alternativa promissora. Através de um formalismo que descreve o sistema (ou um subconjunto dele) por um conjunto de saídas planas, é possível resolver não-linearidades e alcançar o controle independente de estados.

Dentre outras alternativas de controle na literatura, tem-se controle P e PI com o uso de *feed-forward* [3], controladores adaptativos, em cascata e com redes neurais, por exemplo [8].

1.3 Objetivos do projeto

O presente trabalho tem como inspiração o interesse de elevar o nível de abstração do controle de veículos subaquáticos, e visa discorrer sobre os pontos cuja compreensão é necessária para o desenvolvimento de um controlador para o veículo subaquático *VideoRay 4 Pro*. Além disso, apresenta-se o formalismo do controle por seguimento de trajetórias *Flatness* e vários aspectos práticos necessários para aplicá-lo na referida planta.

Como interesses específicos de resultados a apresentar, tem-se:

- Seleção dos aspectos significativos do modelo do ROV para a faixa de baixas velocidades;
- Identificação dos parâmetros do sistema dinâmico da planta real disponibilizada para o navio de superfície;
- Concepção de controlador de trajetórias em velocidade usando a técnica *flatness*.

Para alcançar os objetivos supracitados, foi feita uma revisão bibliográfica para se conhecer os efeitos significativos para a faixa de operação; testes de identificação a seco e em água utilizando-se a planta real; e simulações computacionais para o teste do controlador.

1.4 Resultados obtidos

Os resultados apresentados neste trabalho abrangem dois principais aspectos: a identificação do modelo dinâmico do robô e o controle por meio de trajetórias de velocidade propostas. Estes resultados são coerentes com a realidade, conforme discutido ao longo do texto, mas sugerem aprimoramentos para trabalhos futuros.

Foram identificados os modelos dinâmicos de cada variável de estado para atuação individual em avanço, guinada e afundamento; e o modelo do navio de superfície, que compreende acoplamentos entre as variáveis de estado e atuações conjuntas em avanço e em guinada.

Os dados de identificação foram usados no controlador *flatness*, do qual foram extraídos os resultados de controle sem e com a ação de perturbações em degrau.

1.5 Apresentação do manuscrito

No Capítulo 2, figuram características sobre ROVs e a planta real em estudo, o submarino *VideoRay 4 Pro*, plataforma de base para o presente trabalho; no Capítulo 3 deste documento, discorre-se sobre os modelos cinemático e dinâmico de um veículo subaquático; no Capítulo 4, são

evocados os conceitos de planicidade diferencial e seus aspectos de interesse para a implementação em vista; no Capítulo 5, são descritos os procedimentos para identificação da dinâmica do veículo; o Capítulo 6 versa sobre aspectos práticos da implementação da lei de controle; os Capítulos 7 e 8 figuram os resultados obtidos, respectivamente, nos processos de identificação do modelo e simulação do controle; e no Capítulo 9, consta um breve apanhado geral do presente documento, bem como os próximos objetivos do projeto em questão.

Capítulo 2

Veículos subaquáticos

2.1 Histórico

Veículos Remotamente Operados (ROVs) passaram a ser amplamente utilizados a partir dos anos 60 pela marinha americana, mas logo depois foram acolhidos pela indústria petroleira para dar suporte a operações offshore. Esta categoria de veículos tornou-se fundamental para a indústria do petróleo nos anos 80, quando o desenvolvimento das tecnologias de exploração em grandes profundidades excederam as limitações operacionais de mergulhadores humanos.

O progresso no desenvolvimento de ROVs ampliou o seu domínio de atuação, de modo que atualmente há tecnologias disponíveis para inspeção de estruturas e conexão de peças. A evolução da capacidade de navegar em águas profundas também tem sido campo de aprimoramentos. Como exemplo, pode-se mencionar o ROV Kaiko, Figura 2.1, projetado para grandes profundidades, tendo alcançado 10909m nas Fossas Marianas [6].



Figura 2.1: ROV Kaiko - Fonte: www.mbari.org

Uma lista com modelos comerciais de ROVs pode ser encontrada em [5].

2.2 Características

Veículos Remotamente Operados são robôs subaquáticos dotados de cabo umbilical que permitem que o operador esteja em ambiente seguro, enquanto os referidos equipamentos trabalham em locais de risco.

O sistema completo de um ROV abrange:

- O veículo, que permanece conectado por um cabo umbilical;
- Um cabo umbilical: grupo de cabos que fornecem energia e transportam dados entre o robô e o centro de comando, eventualmente com sistema que controla a dinâmica do cabo;
- Fontes de tensão.

Aplicações de grande porte podem utilizar acionamento hidráulico em vez de elétrico.

A maior parte dos ROVs é equipada com, pelo menos, uma câmera e lanternas. As possibilidades de trabalho do robô são expandidas com o uso de sensores, tais como sonares, magnetômetros, braços manipuladores, coletores de amostras, ou ainda, instrumentos de medição da transparência da água e temperatura.

Há ROVs de diversos tamanhos, desde pequenos veículos para observação até sistemas complexos com manipuladores e câmeras.

Existem ainda veículos subaquáticos que dispensam o uso de cabo umbilical, reduzindo-se assim suas restrições de movimentação. Tais sistemas, chamados Veículos Subaquáticos Autônomos (*Autonomous Underwater Vehicles - AUV*), são mantidos por bateria e possuem processamento embarcado [7].

Como limitações severas à operação autônoma dos veículos subaquáticos, tem-se o ruído dos diversos captores, a dinâmica não-linear associada à movimentação e as desfavoráveis condições de visibilidade. Por isso, operadores humanos ainda são largamente requisitados para conduzirem os robôs e lidarem com a miríade de incertezas do ambiente em tempo real [8].

2.3 Plataforma: *VideoRay 4 Pro*

O presente trabalho tem em vista o controle de um submarino comercial: o ROV *VideoRay 4 Pro*, exibido na Figura 2.2. Ele é tido como o mais popular submarino de pequeno porte, possui interface amigável via *software VideoRay Cockpit control* e também é operável via linguagem de programação [9].



Figura 2.2: ROV VideoRay 4 Pro

No modelo de veículo em questão, os dados são transmitidos pelo cabo umbilical ao veículo. Embora o robô possa ser totalmente controlado por um operador, considera-se desejável apenas fornecer as trajetórias de referência, deixando a tarefa de estabilizar e guiar suavemente o robô, em toda a segurança, a estratégias de processamento e a controladores.

O robô possui as seguintes interfaces de comando: controle remoto, que pode ser adquirido à parte; um computador dedicado; e/ou o *software VideoRay Cockpit*. Este programa permite controle via teclado e a emissão de mensagens pela porta serial (USB). Contudo, as mensagens enviadas resumem-se à escrita de dados na tela do computador. Elas não são capazes de alterar os parâmetros do robô, nem fornecer-lhe comandos. Apesar disso, através do *software* é possível controlar manualmente os propulsores, bem como sua sensibilidade aos comandos (recurso disponível para as direções avanço - *surge*, guinada - *yaw*, subida e descida). O *software* exibe as imagens captadas da câmera e possui indicadores de suprimento de energia, comunicação, umidade e temperatura.

Pela impossibilidade de interfacear um controlador automático com o *software VideoRay Cockpit control*, não é possível utilizá-lo para o objetivo deste trabalho. Com efeito, para esse tipo de implementação, o fabricante fornece um código *C#* base e uma biblioteca que acessa os diversos sensores e atuadores do robô [10].

A implementação via código *C#* é conveniente, uma vez que a linguagem permite a criação de objetos e classes. Com os objetos e classes disponíveis, a abordagem do problema torna-se bastante intuitiva, dado que vários controladores podem ser criados e monitorados, e embora sejam diferentes, podem conservar os mesmos mnemônicos e macros, conforme for adequado à estratégia.

O ROV disponível também pode incorporar controle autônomo do fabricante, através do recurso *VideoRay CoPilot by SeeByte*. Ele permite monitoramento em tempo real e posicionamento

Acerações lineares X, Y e Z (ν_1)	$0, 1^\circ/s^2$
Acerações angulares X, Y e Z (ν_2)	cm/s^2
Profundidade (z_m)	cm
Orientações angulares (ϕ_m, θ_m e ψ_m)	$0, 1^\circ$

Tabela 2.1: Dados recebidos dos sensores e suas unidades de medida, com notação segundo a Tabela 3.1

Tensão de alimentação	Bivolt, 50 ou 60Hz - IEC macho
Massa em operação	6,5Kg
Protocolo de comunicação	RS-485
Máxima profundidade	305m
Dimensões	37,5 x 28,9 x 22,3cm
Propulsores	<i>Brushless</i> Velocidade máxima: 4,2 nós Diâmetros: 2 com 100mm, 1 com 65mm Atuações possíveis: <i>Avanço, guinada e afundamento</i>
Período de amostragem	0,1s

Tabela 2.2: Dados técnicos do sistema

dinâmico.

Os dados analisados neste trabalho encontram-se na Tabela 2.1, bem como suas unidades de medida. Dados técnicos do robô encontram-se na Tabela 2.2.

O veículo possui os seguintes sensores embarcados:

- Sensor de pressão;
- Bússola 3 eixos;
- Acelerômetro 3 eixos;
- Giroscópio MEMS;
- Sensor de temperatura da água;
- Sensor de temperatura interna;
- Sensor de umidade interna.

Capítulo 3

Modelo matemático

O modelo matemático de veículos submarinos é um assunto já bem estabelecido e difundido na literatura. Conhecê-lo é necessário, dado que as estratégias de controle utilizadas (controles tipo PID, *flatness*) são fundamentadas no modelo matemático do sistema a se controlar. Além disso, é conveniente determinar o modelo matemático da planta em questão para que análises em estabilidade sejam conduzidas.

O tópico aqui discutido tem como base os trabalhos de [3] e [2]. A Tabela 3.1 foi modificada, com a inserção dos termos em português e as nomenclaturas η_1 , η_2 , ν_1 e η_2 , com o objetivo de facilitar o acesso das informações ao leitor. Foram referidos conceitos de cinemática direta e inversa para justificar o equacionamento encontrado na literatura; os esforços hidrodinâmicos foram discriminados conforme a definição de forças de Morison e os fenômenos que influenciam a dinâmica do robô foram classificados conforme a zona de velocidade.

A dinâmica de um veículo submarino tem como características peculiares a não-linearidade e o acoplamento entre graus de liberdade. Nesta seção, serão apresentados os formalismos empregados nos modelos cinemáticos e dinâmicos dele.

3.1 Cinemática

No sistema em análise, dois referenciais são utilizados, conforme a Figura (3.1):

- Um referencial com relação à terra (fixo, inercial): $Oxyz$;
- Um referencial com relação ao robô (móvel, não-inercial): $Ox_my_mz_m$, que geralmente é colocado em seu centro de gravidade.

Cada sistema de coordenadas possui nomenclaturas diferentes, porém análogas, para a posição e a orientação do veículo, bem como para suas derivadas. A Tabela 3.1 exibe a notação-padrão,

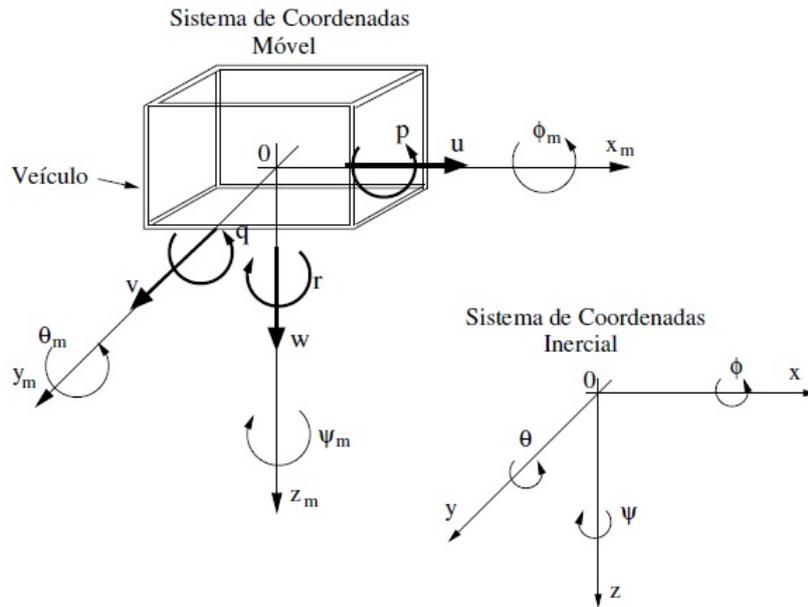


Figura 3.1: Sistemas de coordenadas fixo e móvel.

definida pela SNAME¹. Para ampliar o entendimento, foi acrescentada a ela a nomenclatura em português dos diferentes graus de liberdade.

Vars. Est.	Nomes	Ref. Inercial		Referencial Robô				
		Pos.	Veloc.	Pos.	Veloc.			
1	<i>surge</i> ou avanço	η_1	x	\dot{x}	-	x_m	ν_1	u
2	<i>sway</i> ou deriva		y	\dot{y}		y_m		v
3	<i>heave</i> ou afundamento		z	\dot{z}		z_m		w
4	<i>roll</i> ou rolagem	η_2	ϕ	$\dot{\phi}$	-	ϕ_m	ν_2	p
5	<i>pitch</i> ou arfagem		θ	$\dot{\theta}$		θ_m		q
6	<i>yaw</i> ou guinada		ψ	$\dot{\psi}$		ψ_m		r

Tabela 3.1: Variáveis de estado para os diferentes referenciais do problema.

Da Tabela 3.1, podemos escrever ainda:

¹Society of Naval Architects and Marine Engineers

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad (3.1)$$

$$\nu = \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{bmatrix} = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \quad (3.2)$$

A abordagem para deslocamentos e velocidades angulares baseia-se em uma representação com ângulos de Euler. Sendo assim, velocidades lineares e angulares relacionam-se pela expressão (3.10). Dela, aferimos os pontos singulares $\theta = \pm 90^\circ$, e assim nos restringimos aos intervalos:

$$-90^\circ < \theta < 90^\circ \quad (3.3)$$

$$-180^\circ < \phi, \psi < 180^\circ \quad (3.4)$$

Apesar do inconveniente que os pontos singulares representam, o uso de ângulos de Euler é de simples compreensão e, além disso, esses pontos encontram-se distantes do intervalo de operação da planta real. Com efeito, o ROV² possui um projeto mecânico que visa à estabilidade passiva em ϕ e θ , conforme discutido adiante.

Para se utilizar os ângulos de Euler para a obtenção das relações entre posições dadas por dois referenciais diferentes, algumas premissas devem ser consideradas:

1. Os ângulos ψ, θ, ϕ dados efetuam rotações, um por vez, no referencial presente, representado por $Ox_{mi}y_{mi}z_{mi}$, em que i é o instante ao qual nos referimos;
2. Utilizamos os ângulos de Euler na sequência: rotação de ϕ em torno de x_1 (ou seja, no instante 1 rotacionamos o referencial de ϕ em torno do eixo x), θ em torno de y_2 , e ψ em torno de z_3 .

Para melhor visualização, neste trabalho será utilizada a seguinte notação:

$$\cos(\alpha_1) = c_{\alpha_1} \quad (3.5)$$

$$\sin(\alpha_2) = s_{\alpha_2} \quad (3.6)$$

$$\cos(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) = c_{\alpha_1} s_{\alpha_2} \quad (3.7)$$

Matematicamente, temos:

1. Matrizes de rotação $C_{\text{eixo de rotação, ângulo de rotação}}$:

²Remote Operated Vehicle

$$C_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\phi & s_\phi \\ 0 & -s_\phi & c_\phi \end{bmatrix} \quad C_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$C_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c_\psi & s_\psi & 0 \\ -s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2. Efetuando-se o produto $C = C_{x,\phi} \cdot C_{y,\theta} \cdot C_{z,\psi}$, obtemos a transformação que parte do referencial fixo ($Oxyz$) ao referencial do robô ($Ox_my_mz_m$).
3. Entretanto, para conhecermos a *pose* (posição e orientação) do robô em relação ao referencial inercial, desejamos a transformação inversa à supracitada. Dado que as matrizes são ortonormais, a inversão fornece

$$C^{-1} = J_1(\eta_2) = C_{z,\psi}^T \cdot C_{y,\theta}^T \cdot C_{x,\phi}^T \quad (3.9)$$

em que:

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & s_\phi s_\theta s_\psi - c_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta c_\psi - s_\phi s_\psi \\ c_\theta s_\psi & s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi \\ -s_\theta & s_\psi c_\theta & c_\phi c_\theta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Por sua vez, a relação entre as velocidades angulares dos dois referenciais é dada através da equação (3.11). Similarmente, nosso interesse endereça-se à transformação que traga as informações do referencial do robô ao referencial inercial.

$$\nu_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\theta} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\phi} C_{y,\theta} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2^{-1}(\eta_2) \dot{\eta}_2 \quad (3.11)$$

Temos, da equação (3.11):

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s_\phi \cdot \tan(\theta) & c_\phi \cdot \tan(\theta) \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & s_\phi \cdot \sec(\theta) & c_\phi \cdot \sec(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Por fim, serão empregadas as seguintes notações:

$$J = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1^T & \tau_2^T \end{bmatrix}^T \quad (3.14)$$

em que J aglutina todas as transformações entre os sistemas de coordenadas do robô e inercial, e τ reúne a totalidade de esforços externos considerados na modelagem, sendo τ_1 o vetor de forças e τ_2 , o de momentos.

3.2 Dinâmica

3.2.1 Veículo subaquático

Para um ponto material, é válida a relação:

$$m\ddot{\eta}_1 = \tau_1 \quad (3.15)$$

em que m é a massa do robô.

Entretanto, como as dimensões do robô não são desprezíveis para o problema em questão, ele deve ser tratado como um corpo rígido, e as equações que regem sua dinâmica são dadas em (3.16) e (3.17). Para elas, assume-se:

- Distribuição de massa uniforme;
- Massa constante e posição do centro de massa invariante;
- Origem do sistema de coordenadas móvel ($Ox_my_mz_m$) diferente do centro de gravidade do veículo, para abordagem do caso geral.

- Translação

$$m[\dot{\nu}_1 + \nu_2 \times \nu_1 + \dot{\nu}_2 \times r_G + \nu_2 \times (\nu_2 \times r_G)] = \tau_1 \quad (3.16)$$

- Rotação

$$\underbrace{\frac{d}{dt}(I_0\nu_2)}_{=I_0\dot{\nu}_2+\nu_2 \times (I_0\nu_2)} + mr_G \times (\dot{\nu}_1 + \nu_2 \times \nu_1) = \tau_2 \quad (3.17)$$

em que \times representa a operação produto vetorial, r_G é o vetor distância entre o centro de massa do robô e a origem de $Ox_my_mz_m$ (referencial móvel, do robô) e a matriz I_0 reúne momentos e produtos de inércia do robô em relação a $Ox_my_mz_m$.

Em [3], o autor conclui que é conveniente parametrizar a dinâmica no sistema de coordenadas do robô, uma vez que nele a ação de agentes externos e a inércia do veículo são constantes - o que quer dizer que as matrizes relativas à massa adicionada e ao arrasto permanecem constantes, independentemente das direções de correnteza.

Assim, objetiva-se encontrar uma expressão matricial que descreva a dinâmica do robô.

Das equações (3.16) e (3.17), podemos separar os termos relativos ao movimento do centro de massa do corpo (M_{CR}) daqueles devidos às forças centrípeta e de Coriolis (C_{CR}). Reagrupando-os sob a forma (3.18), temos (3.19) e (3.21), em que $[x_G, y_G, z_G]^T$ são as coordenadas do centro de massa do veículo.

$$M_{CR}\dot{\nu} + C_{CR}(\nu)\nu = \tau \quad (3.18)$$

$$M_{CR}\dot{\nu} = \begin{bmatrix} m\dot{\nu}_1 + m\dot{\nu}_2 \times r_G \\ I_0 m\dot{\nu}_2 + m r_G \times \dot{\nu}_1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$M_{CR} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & mz_G & -my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -mz_G & 0 & mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ my_G & -mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$C_{CR}(\nu)\nu = \begin{bmatrix} m\nu_2 \times \nu_1 + m\nu_2 \times (\nu_2 \times r_G) \\ \nu_2 \times (I_0\nu_2) + m r_G \times (\nu_2 \times \nu_1) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

A parametrização de M_{CR} é única, diferentemente de C_{CR} . Observam-se as seguintes relações, considerando ausência de partes móveis no interior do veículo:

$$M_{CR} = M_{CR}^T > 0 \quad (3.22)$$

$$\dot{M}_{CR} = 0 \quad (3.23)$$

$$C_{CR}(\nu) = -C_{CR}^T, \forall \nu \in \mathbb{R}^6 \quad (3.24)$$

Das equações, verifica-se que os termos centrípeta e Coriolis envolvem produtos vetoriais entre as componentes dos vetores velocidade ν_1 e ν_2 . Esses termos contribuem para o comportamento não-linear e acoplado que o sistema apresenta.

Prosseguindo com o modelo do comportamento dinâmico do robô, é necessário precisar ainda diferentes categorias de esforços atuantes:

- Esforços restaurativos: correspondem ao peso (W) e ao empuxo hidrostático (B). São dados por (3.25) e (3.26),

$$W = mg \quad (3.25)$$

$$B = \rho g \nabla \quad (3.26)$$

e podem ser descritos no referencial do veículo por (3.27).

$$\tau_G(\nu) = J_1^{-1}(\nu_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \tau_B(\nu) = -J_1^{-1}(\nu_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Nas equações acima, ρ é a massa específica do fluido circundante e ∇ representa o volume de fluido deslocado por ele. Segundo a convenção dos referenciais, ilustrada na Figura 3.1, z é crescente no sentido para baixo.

A expressão geral de forças e momentos restaurativos é dada por:

$$G(\nu) = - \begin{bmatrix} \tau_G(\nu) + \tau_B(\nu) \\ r_G \times \tau_G(\nu) + r_B \times \tau_B(\nu) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

em que, além das convenções já adotadas, r_G e r_B são os vetores distância entre a origem do sistema de coordenadas do robô $Ox_my_mz_m$ e os centros de massa e de empuxo, respectivamente. O sinal negativo de $G(\nu)$ apenas indica que a expressão está colocada no lado esquerdo da igualdade da formulação geral da segunda lei de Newton.

Com relação à flutuabilidade na água, a maior parte dos veículos é projetada de maneira a possuir o módulo do empuxo hidrostático maior que o da força peso quando totalmente submersos. Essa é uma condição de segurança, pois facilita a recuperação do veículo caso ocorram falhas nos propulsores ou dispositivos de acionamento. Essa estratégia tem como contrapartida o consumo de energia adicional para que o robô se mantenha submerso.

Os centros de massa r_G e de empuxo r_B também são determinados de forma estratégica, de modo a permitir que as forças restaurativas gerem momentos que estabilizem passivamente os ângulos de rolagem (*roll*, ϕ) e de arfagem (*pitch*, θ). Assim, para que nesses eixos sejam alcançadas condições de equilíbrio estável, r_B é colocado sobre r_G , e ambos são dispostos em uma mesma reta vertical.

- Esforços ambientais: são dados pela ação da correnteza, que pode ser produzida por vento, convecção, diferenças de salinidade e marés.

A velocidade de correnteza ($\dot{\nu}_c$) é geralmente especificada em um sistema de coordenadas fixo. Rememorando o interesse em fornecer uma expressão da dinâmica do sistema no referencial do robô, expressamos a correnteza como (3.29). Essa formulação considera o fluido irrotacional, por isso $\dot{\nu}_{2_c} = [0, 0, 0]^T$.

$$\nu_{1_c} = J_1^{-1}(\nu_2)\nu_{1_c} \quad (3.29)$$

Os esforços de correnteza podem ser parametrizados com uma componente inercial (M_c) e outra centrípeta/Coriolis (C_c), em (3.30):

$$M_c\dot{\nu}_c + C_c(\nu_c)\nu = -\tau_c \quad (3.30)$$

onde $M_c\nu_c$ e $C_c(\nu_c)\nu$ são dados abaixo. Neles, ρ é a massa específica do fluido circundante, ∇ representa o volume de fluido deslocado pelo robô, e r_B é o vetor distância entre a origem do sistema de coordenadas do robô $Ox_my_mz_m$ e o centro de empuxo.

$$M_c\dot{\nu}_c = \begin{bmatrix} \rho \nabla \nu_{1_c} \\ \rho \nabla r_B \times \nu_{1_c} \end{bmatrix} + M_A\dot{\nu}_c \quad (3.31)$$

$$C_c(\nu_c)\nu = \begin{bmatrix} \rho \nabla \nu_2 \times \nu_1 \\ \rho \nabla r_B \times (\nu_2 \times \nu_{1_c}) \end{bmatrix} + C_A(\nu_c)\nu \quad (3.32)$$

$$(3.33)$$

Para veículos que possuem simetria, distribuição de massa homogênea e peso W e empuxo hidrostático B com mesma magnitude, a aproximação (3.34) é válida.

$$M_c \approx M_{CR} \quad (3.34)$$

- Esforços hidrodinâmicos

- *Devidos à massa adicionada:* Estão relacionados com a movimentação do fluido circundante a um corpo quando ele possui aceleração. Dependem da forma do veículo, de sua frequência de oscilação e da profundidade de operação. Podem ser modelados com uma componente inercial e uma centrípeta/Coriolis, como:

$$M_A\dot{\nu} + C_A(\nu)\nu = -\tau_A \quad (3.35)$$

sendo os elementos de M_A as derivadas hidrodinâmicas com relação à aceleração do veículo.

Embora, na prática, M_A não seja constante, seu cálculo em tempo real é bastante custoso, e por isso, ela é considerada constante. Caso o veículo possua três planos de simetria, M_A simplifica-se a uma matriz diagonal.

A matriz C_A , por sua vez, também contribui para a não-linearidade e acoplamento do modelo, de maneira análoga à matriz C_{CR} , referida na equação (3.18).

- *Devidos ao arrasto hidrodinâmico*: estão relacionados aos fenômenos de fricção de superfície e arrasto devido à pressão. Apresentam dependência com a forma e com a frequência de movimento do veículo, e possuem dependência quadrática com a velocidade de deslocamento relativa à correnteza - ν_c , comentada em *Esforços ambientais* , por (3.36).

$$\nu_r = \nu - \nu_c \quad (3.36)$$

O esforço de arrasto F_D pode ser calculado pela expressão (3.37)

$$F_D = -0.5\rho C_d S |\nu| \nu \quad (3.37)$$

e aproximado por uma estrutura desacoplada descrita em (3.38), em que ρ é a massa específica do fluido circundante, C_d é uma matriz de coeficientes de arrasto hidrodinâmico e S , a área molhada do veículo.

$$F_D(\nu) \approx D(\nu)\nu = C_{dl}\nu + C_{dnl}|\nu|\nu \quad (3.38)$$

Na equação 3.38, C_{dl} e C_{dnl} são matrizes constantes e diagonais com coeficientes de arrasto linear e não linear, respectivamente.

- *Devidos aos esforços de sustentação*: são esforços perpendiculares ao deslocamento relativo de um corpo em um fluido. São desprezíveis para operações em baixas velocidades e para veículos com geometria indefinida.

* Forças de Morison

Duas das forças hidrodinâmicas supracitadas - *de arrasto hidrodinâmico e de massa adicionada* - são aglutinadas na literatura pelo termo *Forças de Morison*.

As forças de Morison são descritas por:

$$F = \frac{1}{2}C_d\rho S |\nu_c(t) - \nu(t)| \cdot (\nu_c(t) - \nu(t)) + C_m\rho V \left[\dot{\nu}_c(t) - \dot{\nu}(t) \right] \quad (3.39)$$

em que o primeiro termo da soma é relativo ao arrasto, a ser desmembrado conforme a aproximação (3.38) e o segundo é denominado por "termo de inércia", e se refere à massa adicionada.

Na equação (3.39), S , C_d e C_m são matrizes para um problema multidimensional. S é uma matriz diagonal, cujos termos são as áreas projetadas em cada eixo; e C_d e C_m podem ser considerados diagonais para uma análise simplificada.

Os coeficientes de arrasto e de inércia são funções do escoamento, de características geométricas do corpo (comprimento característico em uma dada direção) e superficiais (rugosidade).

A relevância da componente linear ou quadrática sobre o termo de arrasto depende da natureza do escoamento: a componente quadrática torna-se mais importante à medida em que o escoamento apresenta-se turbulento. Para escoamentos laminares, sobressai a componente linear.

Vale ressaltar a importância de se utilizar as equações dinâmicas no referencial do robô: os coeficientes (ou matrizes) de arrasto são mantidos constantes por estarem relacionados a características construtivas do robô.

Reunindo os aspectos discutidos acima, podemos escrever a dinâmica do veículo sob a formulação:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + F_D(\nu) + G(\eta) = \tau \quad (3.40)$$

$$\dot{\nu} = J(\eta)\nu \quad (3.41)$$

Onde:

- As matrizes de massa de corpo rígido (M_{CR}) e de massa adicionada (M_A) são agrupadas em um único termo:

$$M = M_{CR} + M_A \quad (3.42)$$

- As matrizes centrípeta/Coriolis de corpo rígido (C_{CR}) e de massa adicionada (C_A) também estão reunidas em um único termo:

$$C(\nu) = C_{CR}(\nu) + C_A(\nu) \quad (3.43)$$

- A dissipação hidrodinâmica, representada por F_D , é parametrizada por uma estrutura desacoplada, como apresentado em (3.38);
- A resultante de forças restaurativas, representada por $G(\nu)$, é dada em (3.28);
- τ reúne todos os esforços aplicados no veículo: relativos à correnteza, ao cabo e aos propulsores:

$$\tau = \tau_c + \tau_{\text{cabo}} + \tau_{\text{prop}} \quad (3.44)$$

Retomando (3.30), temos que τ_c pode ser parametrizado em uma componente inercial e outra centrípeta/Coriolis. Além disso, considerando os módulos da força peso e da força de empuxo iguais, a aproximação (3.34) é válida e os termos de τ_c podem ser reunidos a M e a C na expressão (3.41).

Temos, por fim,

$$M\dot{\nu} + C(\nu_r)\nu + F_D(\nu_r) + G(\eta) = \tau_{\text{cabo}} + \tau_{\text{prop}} \quad (3.45)$$

Em um modelo simplificado, que visa à síntese de um controlador, os esforços de correnteza são desprezados e os coeficientes de arrasto hidrodinâmico são aproximados por constantes.

No presente trabalho, objetiva-se operar na região de baixas velocidades. Sendo assim, vale destacar os fenômenos que influenciam mais fortemente essa região de operação do robô:

- Esforços de massa adicionada;
- Arrasto hidrodinâmico pelo fenômeno de fricção de superfície;
- Efeitos de correnteza.

Em contrapartida, os fenômenos que influenciam a dinâmica do robô de maneira preponderante na faixa de altas velocidades são:

- Fenômenos viscosos;
- Esforços de sustentação.

3.2.2 Navio de superfície

A dinâmica do navio de superfície consiste em uma simplificação do modelo do veículo subaquático. Nele, considera-se ausência de afundamento (z), rolagem (*roll* - ϕ) e arfagem (*pitch* - θ).

Isso significa que a dinâmica pode ser representada por avanço (x), deriva (y) e guinada (*yaw* - ψ), mantendo-se as considerações feitas para o modelo completo.

3.2.3 Cabo umbilical

A modelagem do cabo umbilical é feita usando-se o modelo de massas concentradas, ou *lumped mass*. Nela, o cabo é aproximado por um modelo discreto, composto de nós e cilindros (ou barras). A massa concentra-se nos nós, e os esforços propagam-se nos elementos até alcançar a ponta do cabo que está conectada ao veículo subaquático. Por fim, os esforços calculados são transformados para o sistema de coordenadas do robô, $Ox_my_mz_m$, e compõem o esforço do cabo umbilical τ_{cabo} , computado em (3.41).

No modelo, são considerados os seguintes esforços:

- Internos, independem do ambiente de operação:
 - Tensão normal T ;
 - Amortecimento axial P .
- Externos:
 - Arrasto hidrodinâmico F_F ;
 - Forças restaurativas F_G .

Contrariamente aos supracitados, os esforços flexionais, torcionais e de sustentação são desconsiderados.

Assim, a dinâmica dos nós do cabo é descrita pela equação:

$$(M_i + M_{Ai})_{\text{cabo}} \ddot{\eta}_{i_{\text{cabo}}} = (T_i + P_i)_{\text{cabo}} + (T_{i-1} + P_{i-1})_{\text{cabo}} + F_i \quad (3.46)$$

em que $\eta_{i_{\text{cabo}}}^{\ddot{\cdot}}$ é a aceleração do i -ésimo nó, M_i e M_{Ai} são as matrizes de massa e de massa adicionada do i -ésimo elemento cilíndrico, e F_i são os esforços externos aplicados no i -ésimo par nó-cilindro.

A ação da tensão normal e do amortecimento em cada elemento do cabo pode ser modelada por um sistema massa - mola - amortecedor. Nesse sentido, a tensão normal sobre o i -ésimo nó ($T_{i_{\text{cabo}}}$) é dada por:

$$T_{i_{\text{cabo}}} = E \frac{A_{i_{\text{cabo}}}}{l_{0_i}} \mathbf{R}_i \left[1 - \frac{l_{0_i}}{\mathbf{R}_i} \right] \quad (3.47)$$

em que E é o módulo de Young do cabo, $A_{i_{\text{cabo}}}$ é a área da seção transversal do cabo, l_{0_i} é o comprimento natural de cada elemento do cabo, e \mathbf{R}_i é a diferença de velocidade entre dois nós consecutivos, descrita por:

$$\mathbf{R}_i = \eta_{(i+1)_{\text{cabo}}} - \eta_{i_{\text{cabo}}}. \quad (3.48)$$

O amortecimento, por sua vez, é considerado linear e proporcional à diferença entre dois nós consecutivos, sob a forma:

$$P_i = C_{\text{cabo}} (\dot{\eta}_{i_s} - \dot{\eta}_{(i-1)_s}) \quad (3.49)$$

em que $\dot{\eta}_{i_s}$ é a velocidade do i -ésimo nó na direção s .

A força resultante externa F é uma composição dos esforços de arrasto hidrodinâmico F_F e restaurativos F_G , como segue:

$$F_i = \frac{1}{2}(F_{F_i} + F_{F_{i-1}}) + F_{G_i} \quad (3.50)$$

Isso se dá pela disposição de forças da Figura (3.2). Verifica-se que, na modelagem, as forças de arrasto hidrodinâmico F_F são colocadas nos elementos cilíndricos, e não nos nós.

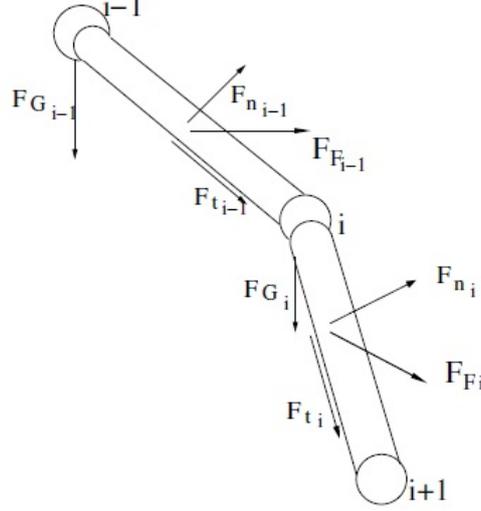


Figura 3.2: Esforços externos dispostos no modelo de cabo apresentado.

A força de arrasto hidrodinâmico possui componentes normal e tangencial, e é descrita pela expressão:

$$F_{F_i} = F_{n_i} + F_{t_i} = \frac{1}{2} \rho d_i (C_n U_{n_i} |U_{n_i}| + C_t U_{t_i} |U_{t_i}|) |\mathbf{R}_i| \quad (3.51)$$

$$U_{t_i} = \frac{[(\dot{\nu}_c - \dot{\nu}_{i_{\text{cabo}}}) \mathbf{R}_i] \mathbf{R}_i}{|\mathbf{R}_i|^2} \quad (3.52)$$

$$U_{n_i} = \dot{\nu}_c - \dot{\nu}_{\text{cabo}} - U_{t_i} \quad (3.53)$$

Nessas expressões, C_n e C_t são os coeficientes de arrasto normal e tangencial.

O modelo aqui discutido possui incertezas, dadas as aproximações e simplificações, e limitações. Ele está restrito a baixas frequências de velocidade, e pode ser difícil quantificar o intervalo frequencial em que o modelo é válido por causa da instrumentação empregada e da relação sinal-ruído mínima requerida.

Capítulo 4

Controle por planejamento e acompanhamento de trajetória

Esta seção toma como base o trabalho de [2], que lança o fundamento teórico para o controle usando o paradigma de sistemas diferencialmente planos e o implementa em variados modelos de sistemas, como o do navio de superfície e o do veículo subaquático. Os Algoritmos 1 e 2 foram acrescentados para facilitar o entendimento da montagem das matrizes C_K e S ; a notação (4.14) foi escrita usando-se a função binomial para a clarificação de seu significado; e a metodologia para se implementar este tipo de controlador foi explicitada em passos, advindos de notas de aula da disciplina Controle de Sistemas Marítimos, ministrada na Universidade de Brasília por Prof. Dr. Eugênio Liborio Feitosa Fortaleza e M. Eng. José Oniram Limaverde Filho, com modificações.

Define-se que um sistema, representado sob a forma

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \quad \mathbf{u} \in \mathbb{R}^m \quad (4.1)$$

é diferencialmente plano se existem funções:

$$\mathbf{h} : \mathbb{R}^n \times (\mathbb{R}^m)^{r+1} \rightarrow \mathbb{R}^m \quad (4.2)$$

$$\boldsymbol{\lambda}_0 : (\mathbb{R}^m)^r \rightarrow \mathbb{R}^n \quad (4.3)$$

$$\boldsymbol{\lambda}_1 : (\mathbb{R}^m)^{r+1} \rightarrow \mathbb{R}^m \quad (4.4)$$

$$(4.5)$$

tais que as seguintes relações sejam válidas:

$$\mathbf{F} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \dots, \mathbf{u}^{(r)}) \quad (4.6)$$

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\lambda}_0(\mathbf{F}, \dot{\mathbf{u}}, \dots, \mathbf{F}^{(r)}) \quad (4.7)$$

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\lambda}_1(\mathbf{F}, \dot{\mathbf{F}}, \dots, \mathbf{F}^{(r)}, \mathbf{F}^{(r+1)}) \quad (4.8)$$

$$(4.9)$$

em que r é um inteiro finito e \mathbf{F} são as saídas planas de (4.1).

Em suma, um sistema diferencialmente plano pode ser descrito por meio de variáveis “endógenas” ao sistema, tais que seus estados e entradas podem ser dados por uma função dessas variáveis e de suas derivadas. Essas variáveis são chamadas de entradas planas do sistema.

Se o sistema é diferencialmente plano, é possível obter dele um sistema linear controlável composto por uma cadeia de integradores puros, cujas entradas planas são as próprias saídas do sistema. Isso se consegue através de uma realimentação linearizante endógena e de um difeomorfismo. Assim, essa propriedade fornece não somente a linearização exata do sistema, mas também permite que problemas de estabilização ou acompanhamento de trajetória sejam reduzidos a um correspondente em relação às entradas planas.

Entretanto, a planicidade diferencial é limitada às condições iniciais e finais do sistema, bem como a restrições físicas, tais como saturação de atuadores.

Para sistemas lineares, controlabilidade implica planicidade diferencial. Com efeito, as saídas planas de um tal sistema podem ser obtidas de sua matriz de controlabilidade por:

$$F = \alpha \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} C_K^{-1} x \quad (4.10)$$

$$C_{K_{LTI}} = \begin{bmatrix} A & A \cdot B & \dots & A^{n-1} B \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

em que $C_{K_{LTI}}$ é a matriz de controlabilidade, dada por (4.11) para o caso LTI¹ - SISO² de ordem n . O valor α , por sua vez, é uma constante escolhida conforme for conveniente. Um valor proposto a α é $\det(C_K)$.

Para o caso de sistemas MIMO³, múltiplas parametrizações são possíveis por dependerem de uma escolha de índices de controlabilidade de Kronecker. Tal escolha é referenciada por considerações físicas do sistema em questão ou por intuição dos profissionais que a conduzem.

Para um sistema dinâmico de ordem m escrito por:

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot u \quad (4.12)$$

em que u é um vetor de entradas $n \times 1$ e B tem dimensões $m \times n$, uma maneira prática de se obter a matriz de controlabilidade para um sistema MIMO é ilustrada no Algoritmo 1. Dele, verifica-se que os índices de controlabilidade de Kronecker estão ligados ao número de vezes que se pode concatenar o vetor coluna $A^{(i-1)}B_j$ com a matriz C_K em construção de modo que ela se mantenha com posto completo.

¹Sistemas Lineares Invariantes no Tempo (*Linear Time-Invariant Systems*)

²Única entrada e única saída (*Single Input, Single Output*)

³Várias entradas, várias saídas (*Multiple Inputs, Multiple Outputs*)

A soma dos índices de controlabilidade de Kronecker é igual à ordem do sistema, e eles também indicam quantas vezes serão derivadas cada entrada plana. Por causa disso, é costume tentar produzir índices de controlabilidade próximos. Ademais, temos o mesmo número de entradas planas que o de entradas no sistema original.

Algorithm 1 Obtenção da (sub)matriz de controlabilidade C_K

```

1: procedure OBTTERCK( $A, B$ )                                ▷ Matrizes de estado do sistema dinâmico
2:    $nb\_Entradas \leftarrow size(B, 2)$ ;
3:    $ordem\_Sistema \leftarrow size(A, 1)$ ;
4:    $i \leftarrow 0$ ;                                           ▷ Variável de iteração
5:    $j \leftarrow 0$ ;                                           ▷ Variável de iteração
6:    $dt \leftarrow 0$ ;                                         ▷ Variável temporária
7:    $C_K \leftarrow []$ ;
8:    $kc \leftarrow zeros(nb\_Entradas, 1)$ ;                    ▷ Vetor com índices de controlabilidade de cada entrada
   plana
9:   for  $i \leftarrow 1 : nb\_Entradas$  do
10:  LacoInterno:
11:    for  $i \leftarrow 1 : ordem\_Sistema$  do
12:       $C_K \leftarrow [C_K, (A^{i-1}) \cdot B(:, j)]$ ;          ▷ Inserção de coluna em  $C_K$ 
13:       $dt \leftarrow det(C_K(min(size(A, 1), i), min(size(A, 1), i)))$ ;  ▷ Determinante da maior
   submatriz quadrada de  $C_K$ 
14:       $kc(j) \leftarrow kc(j) + 1$ ;
15:      if  $det(dt) == 0$  then                                ▷ Se o determinante for nulo, a última coluna
   adicionada é linearmente dependente das demais. Não deve permanecer em  $C_K$ , e o índice de
   controlabilidade associado deve ser corrigido.
16:         $C_K \leftarrow C_K(:, 1 : end - 1)$ ;
17:         $kc(j) \leftarrow kc(j) - 1$ ;
18:        goto LacoInterno

```

No caso de sistemas LVT⁴, as matrizes A e/ou B possuem dependência temporal. Se o sistema for uniformemente controlável, C_K será descrita por (4.13).

$$C_{K_{LVT}} = \begin{bmatrix} B(t) & (A(t) - \frac{d}{dt}) \cdot B(t) & \dots & (A(t) - \frac{d}{dt})^{(n-1)} \cdot B(t) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Na notação usada em (4.13), vale a equivalência em (4.14).

$$\left(A(t) - \frac{d}{dt} \right)^{(j)} \cdot B(t) \equiv \sum_{k=0}^j (-1)^k \binom{j}{k} \cdot \left(A(t)^{(j-k)} \cdot \frac{d^k}{dt} B(t) \right) \quad (4.14)$$

⁴Sistemas Lineares Variantes no Tempo (*Linear Time-Variant Systems*)

Caso o sistema seja não-uniformemente controlável, pode-se aplicar uma realimentação endógena que o torne uniformemente controlável.

Para sistemas não-lineares, a controlabilidade baseia-se na ferramentas matemáticas Parênteses e Derivada de Lie.

Enquanto controlabilidade implica planicidade diferencial para sistemas lineares, esta relação não se mantém para sistemas não-lineares: controlabilidade não é uma condição suficiente para que o sistema apresente planicidade diferencial. Contudo, se o sistema não-linear for diferencialmente plano, as entradas planas são obtidas de maneira similar à dos sistemas lineares.

Entretanto, sistemas não-lineares e não-diferencialmente planos também podem ser controláveis, como é o caso do pêndulo duplo invertido. Nessa categoria, encontram-se os Sistemas Liouvillianos, nos quais se pode definir um subconjunto diferencialmente plano que parametriza as variáveis fora dele, chamadas de “defeito” do sistema.

O veículo subaquático em estudo faz parte da categoria de sistemas não-lineares e, por ser subatuado, é não-diferencialmente plano. Ele faz parte da categoria de sistemas liouvillianos, e pode ser comandado por meio de um sistema de controle baseado na planicidade diferencial do sistema linearizado em torno de suas trajetórias nominais.

O controle a se propor divide-se em duas etapas: planejamento e acompanhamento da trajetória. O planejamento visa propor uma evolução das variáveis de estados que esteja de acordo com as restrições dinâmicas do robô, e que respeite as condições iniciais e finais delas. Também chamado controle em malha aberta, é suficiente caso o sistema não seja submetido a nenhum tipo de perturbação.

Dado que o robô é sujeito a perturbações resultantes dos efeitos de correnteza, e há incertezas e ruído nos dados dos sensores, não é possível assegurar que o sistema obedeça perfeitamente às trajetórias planejadas. Assim, a etapa de acompanhamento de trajetória se faz necessária para fechar a malha de controle e corrigir os erros em relação à trajetória planejada (ou nominal).

4.1 Controle em malha aberta

A etapa em questão se dá a partir da definição das trajetórias planejadas para as entradas planas. São propostos os seguintes passos para um sistema linear⁵:

1. Obter a matriz de controlabilidade C_K do sistema original;

⁵Fonte: Notas de aula da disciplina Controle de Sistemas Marítimos - Prof. Dr. E. Fortaleza e M. Eng. J. Limaverde Filho

2. Formar a matriz S conforme o Algoritmo 2. Esta pode ser vista como uma matriz de seleção de colunas de C_K ;

3. Obter as entradas planas por:

$$F = \alpha \cdot S \cdot C_K^{-1} \cdot X \quad (4.15)$$

4. Obter as derivadas das entradas planas F ;

5. Montar a equação (4.16);

$$\begin{bmatrix} F_1, & \dot{F}_1 & \dots & F_1^{(kc_1)} & \dots & F_n, & \dot{F}_n & \dots & F_n^{(kc_n)} \end{bmatrix}^T = M \cdot \begin{bmatrix} X \\ U \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

em que os índices i de F_i indicam a i -ésima entrada plana.

6. A partir das condições iniciais e finais de X e U , encontrar as condições iniciais e finais de F e suas derivadas, por meio de M ;

7. Realizar o planejamento de trajetória para F respeitando as condições iniciais e finais. Isso pode ser feito, por exemplo, propondo trajetórias polinomiais para F e suas derivadas, restritas às condições iniciais e finais calculadas.

Algorithm 2 Obtenção da matriz S , referida na equação (4.15)

```

1: procedure OBTTERS( $kc$ )                                ▷ Vetor de índices de controlabilidade
2:    $nb\_Entradas \leftarrow comprimento(kc)$ ;
3:    $ordem\_Sistema \leftarrow soma(kc)$ ;
4:    $i \leftarrow 0$ ;                                       ▷ Variável de iteração
5:    $acc \leftarrow 0$ ;                                     ▷ Acumulador
6:    $S \leftarrow zeros(nb\_Entradas, ordem\_Sistema)$ ;
7:   for  $i \leftarrow 1 : nb\_Entradas$  do
8:      $S(i, acc + kc(i)) \leftarrow 1$ ;
9:      $acc \leftarrow acc + kc(i)$ 

```

4.2 Rastreamento de trajetória

Esta etapa define o comportamento dinâmico do erro através de um termo de correção na ação de controle. Efetuam-se os seguintes passos:

1. A partir de M^{-1} , obter a parametrização de X e de U em função de F e suas derivadas temporais;
2. Produzir o termo de correção:

- Definamos o vetor de trajetórias planejadas como $F^{(j)*}$, e a dinâmica do erro como:

$$e_{r+1}^{(r+1)} + K_r \cdot e_r^{(r)} + \dots + K_1 \cdot \dot{e} + K_0 \cdot e = 0 \quad (4.17)$$

- A igualdade conduz à escrita:

$$F_{r+1}^{(r+1)} - F_{r+1}^{(r+1)*} + K_r \cdot (F_r^{(r)} - F_r^{(r)*}) + \dots + K_1 \cdot (\dot{F}_1 - \dot{F}_1^*) + K_0 \cdot (F_0 - F_0^*) = 0 \quad (4.18)$$

- Sabendo que as entradas planas são descritas na forma canônica de Brunovsky, elas consistem em cadeia de integradores, em que o sinal de entrada aparece na derivada de ordem mais alta. Assim,

$$F_{r+1}^{(r+1)} = \nu \quad (4.19)$$

$$F_{r+1}^{(r+1)*} = \nu^* \quad (4.20)$$

- Então, pode-se reescrever (4.18) como (4.22):

$$\nu - \nu^* + K_r \cdot (F_r^{(r)} - F_r^{(r)*}) + \dots + K_1 \cdot (\dot{F}_1 - \dot{F}_1^*) + K_0 \cdot (F_0 - F_0^*) = 0 \quad (4.21)$$

$$\nu = \nu^* - K_r \cdot (F_r^{(r)} - F_r^{(r)*}) - \dots - K_1 \cdot (\dot{F}_1 - \dot{F}_1^*) - K_0 \cdot (F_0 - F_0^*) \quad (4.22)$$

3. Por fim, calcular U a partir de (4.23) e de (4.22).

$$\begin{bmatrix} X \\ U \end{bmatrix} = M^{-1} \cdot \left[F_1 \quad \dots \quad F_1^{(kc_1-1)}, \quad \nu_1 \quad \dots \quad F_n \quad \dots \quad F_n^{(kc_n-1)}, \quad \nu_n \right]^T \quad (4.23)$$

Os coeficientes K_r, \dots, K_0 que descrevem a dinâmica do erro devem ser dados por polinômios com raízes cuja parte real é negativa. Para o presente trabalho, eles são invariantes no tempo. Não foram verificados problemas de estabilidade decorrentes dessa restrição.

Capítulo 5

Procedimentos de Identificação de Parâmetros

A metodologia adotada para identificação dos parâmetros do modelo segue as seguintes etapas:

- Identificação de características de ruídos e perturbações;
- Identificação do comportamento dinâmico de cada variável de estado para única atuação;
- Identificação do modelo do navio de superfície, envolvendo atuações em avanço e guinada.

As considerações comuns aos diferentes casos de identificação são:

- Os esforços restaurativos representados por $G(\eta)$ estão presentes apenas em afundamento (z);
- O veículo é axi-simétrico em seus três eixos;
- Os efeitos de correnteza ($\nu_c(t)$, $\dot{\nu}_c(t)$) e os esforços do cabo (τ_{cabo}) foram desconsiderados.

Os efeitos de correnteza foram desconsiderados por não poderem ser diretamente medidos; e os esforços do cabo, por dependerem de sua posição com relação ao referencial inercial. Isso faz com que o modelo saia da parametrização relativa ao robô, aumentando sua complexidade.

5.1 Identificação de ruídos e perturbações

Foram feitas leituras com o ROV fora da água para obter os valores de *offset* (erro estático) dos sensores e suas variâncias. Depois, efetuaram-se leituras com o robô dentro da água, sem atuação, para uma estimativa do comportamento estatístico das perturbações.

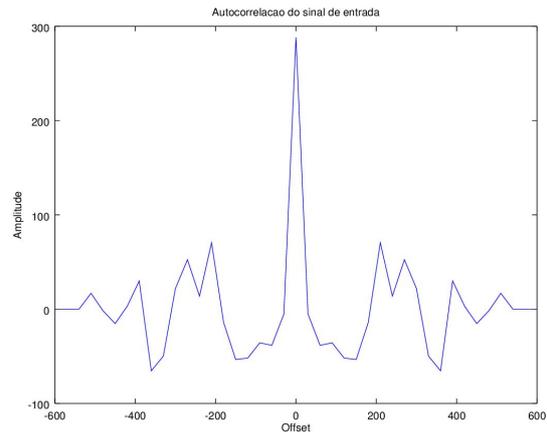
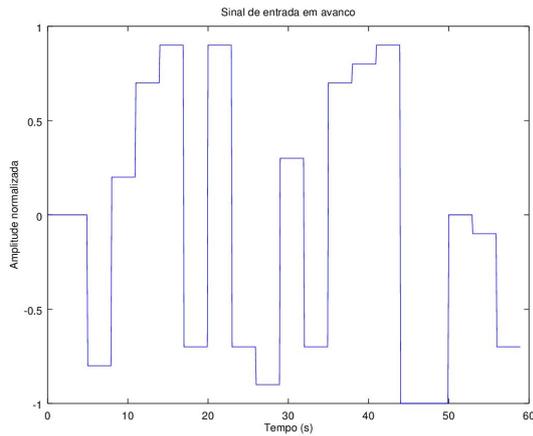


Figura 5.1: Sinal pseudoaleatório em avanço Figura 5.2: Autocorrelação do sinal de avanço

Da Tabela 7.1, no Capítulo 7, verifica-se que as perturbações às quais o robô está sujeito possuem alta variabilidade. Isso se explica pelos efeitos de correnteza da água e do vento. Verifica-se também que os dados de acelerações angulares possuem valores importantes de ruído, e quando considerados individualmente, fornecem estimativas de baixa qualidade. O uso desses dados requerá peremptoriamente tratamento prévio para uso em trabalhos futuros, seja pela aplicação de filtros, seja pela fusão com os dados de deslocamento angular. Para etapas posteriores, eles não foram considerados.

5.2 Identificação do comportamento dinâmico de cada variável de estado para única atuação

Nessa primeira fase, para cada grau de atuação do ROV (avanço, guinada e afundamento) foram identificados os parâmetros da equação dinâmica de cada uma das variáveis recuperáveis por meio dos sensores. Essas variáveis são dadas na Tabela 2.1.

Os sinais de entrada são pseudoaleatórios em amplitude e com período constante 1s, o que é igual a dez vezes o período de transmissão de dados ao ROV. As amplitudes foram geradas usando-se a função (RANDI) das plataformas Matlab/Octave, por produzir sequências cuja função de autocorrelação se aproxima do impulso.

Um exemplo de sinal de entrada em avanço consta na Figura 5.1 e sua função de autocorrelação, na Figura 5.2. Segundo [1], entradas suaves geralmente não fornecem uma boa caracterização de um modelo, e uma maneira de se quantificar quão suave é a entrada é verificar a semelhança de sua função de autocorrelação com a de um ruído branco.

A amplitude dos sinais foi normalizada para, posteriormente, ser multiplicada por um valor de escala conveniente.

Foram feitos os seguintes ensaios:

- Atuação em avanço:
 - com intensidade de propulsores a 20% da máxima amplitude;
 - com intensidade de propulsores a 30% da máxima amplitude.
- Atuação em guinada:
 - com intensidade de propulsores a 35% da máxima amplitude;
 - com intensidade de propulsores a 40% da máxima amplitude;
 - com intensidade de propulsores a 50% da máxima amplitude.
- Atuação em afundamento.

Em uma implementação no robô, o sinal de avanço é aplicado igualmente nos dois motores horizontais; o sinal em guinada é aplicado com sinais opostos nos motores horizontais; e o sinal em afundamento é aplicado sobre o motor vertical.

Observa-se que a dinâmica do modelo é linear em relação aos parâmetros. Assim, a identificação destes foi feita pela técnica dos mínimos quadrados.

Os dados aproveitados para uma primeira análise do movimento foram:

- Acelerações lineares X, Y e Z ($\dot{\nu}_1$);
- Profundidade (z_m);
- Orientações angulares (ϕ_m , θ_m e ψ_m).

O modelo do robô, recuperado de (3.45), é dado por:

$$M\dot{\nu} + C(\nu_r)\nu + F_D(\nu_r) + G(\eta) = \tau_{\text{cabo}} + \tau_{\text{prop}}$$

Em se tratando de uma análise unidimensional, $C(\nu_r)$ inexistente por depender das variáveis de estado concernentes a outros eixos.

Foram testados modelos onde a propulsão foi modelada linear e quadrática, e que compreendiam um termo constante. Essas considerações foram feitas para que se pudesse verificar se a propulsão atuava sob a forma de potência ou não. A consideração de um termo constante seria particularmente útil na modelagem das equações de afundamento, onde a aceleração da gravidade atua como um *offset*. Não apenas isso, um termo constante poderia evidenciar *offsets* espúrios nos sinais dos sensores que não estavam presentes nos ensaios sem propulsão.

Assim, a partir de (3.45), (3.38) e (3.39), temos (5.4):

$$M = M_{CR} + M_A \quad (5.1)$$

$$M = M_{CR} + C_m \rho V \cdot \dot{\nu}(t) \quad (5.2)$$

Os coeficientes C_{dl} e C_{dnl} ponderam os termos de arrasto, a serem definidos por identificação. Por eles, será possível estimar se o escoamento que envolve o ROV é turbulento ou laminar.

$$M\dot{\nu} + F_D(\nu_r) + G(\eta) = \tau_{\text{prop}} \quad (5.3)$$

$$M\dot{\nu} = \tau_{\text{prop}} - F_D(\nu_r) - G(\eta) \quad (5.4)$$

τ_{prop} , por sua vez, pode ser caracterizado como (5.5) e (5.6), em que β é um sinal de atuação, $-1 \leq \beta \leq 1$.

$$\tau_{\text{prop}} = E_1 \cdot \beta \quad (5.5)$$

$$\tau_{\text{prop}} = E_2 \cdot \beta^2 \quad (5.6)$$

Sob tal formato, E_1 e E_2 podem ser obtidos por meio da seguinte hipótese: supondo que os motores estejam ligados em sua máxima capacidade, após um determinado período a dinâmica atinge seu estado permanente, fazendo $\dot{\nu} = 0$. Para o caso de avanço, usando (5.5), a equação (5.4) é escrita por:

$$0 = \tau_{\text{prop}} - F_D(\nu_r) - G(\eta) \quad (5.7)$$

E de (3.37), escreve-se:

$$0 = E_1 - 0.5\rho C_d S |\nu_{MAX}| \nu_{MAX} - G(\eta) \quad (5.8)$$

O termo $G(\eta)$ é não-nulo apenas para movimentos em afundamento; ν_{MAX} é fornecido pelo fabricante, e consta na Tabela 2.2; S pode ser facilmente calculado por aproximação; e C_d , obtido por tabelas, restando apenas E_1 a determinar.

Os produtos entre parâmetros e constantes podem ser reescritos de acordo com as simplificações (5.9) e (5.10), em que A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 , C_2 , D_1 , D_2 , E_1 e E_2 são escalares.

$$A_1 \dot{\nu}(t) = B_1 \nu(t) + C_1 |\nu(t)| \nu(t) + D_1 + E_1 \beta(t) \quad (5.9)$$

$$A_2 \dot{\nu}(t) = B_2 \nu(t) + C_2 |\nu(t)| \nu(t) + D_2 + E_2 \beta^2(t) \quad (5.10)$$

Em (5.9) e (5.10), temos:

$$\begin{aligned} A_1 &\equiv A_2 \equiv M_{CR} & D_1 &\equiv D_2 \equiv cte \\ B_1 &\equiv B_2 \equiv C_{dl} & E_1 &\equiv E_2 \equiv \frac{1}{2} C_{d\rho S} \cdot \nu_{MAX} |\nu_{MAX}| \\ C_1 &\equiv C_2 \equiv C_{dnl} \end{aligned}$$

Vale salientar que os termos das equivalências acima possuem o mesmo significado algébrico; mas isso não significa que identificações produzam coeficientes iguais. Assim, dado que (5.9) é diferente de (5.10), é esperado que os coeficientes análogos acima possuam valores diferentes; isto é: B_1 apresenta um valor numérico diferente de B_2 , por exemplo.

Podemos reescrever a equação (5.9) como consta em (5.12), em que os termos em negrito são vetores. β é uma sequência pseudoaleatória de entradas e ν são os estados de saída aferidos nos mesmos instantes. O raciocínio para a identificação dos termos de (5.10) é análogo ao que se segue.

$$B_1 \nu(t) + C_1 |\nu(t)| \cdot \nu(t) + D_1 + E_1 \beta(t) = A_1 \dot{\nu} \quad (5.11)$$

$$\begin{bmatrix} \nu & |\nu| \cdot \nu & \mathbf{1} & \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_1/A_1 \\ C_1/A_1 \\ D_1/A_1 \\ E_1/A_1 \end{bmatrix} = \dot{\nu} \quad (5.12)$$

A equação matricial (5.12) é bem conhecida sob a a forma escrita $\mathcal{A} \cdot x = \mathcal{B}$ Assim, os coeficientes podem ser obtidos por pseudoinversa: $x = \mathcal{A}^+ \cdot \mathcal{B}$

$$\begin{bmatrix} B_1/A_1 \\ C_1/A_1 \\ D_1/A_1 \\ E_1/A_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu & |\nu| \cdot \nu & \mathbf{1} & \beta \end{bmatrix}^+ \cdot \dot{\nu} \quad (5.13)$$

Neste procedimento, uma boa prática que induz a uma melhor estimativa é evitar que a matriz \mathcal{A} tenha linhas e/ou colunas com ordens de grandeza díspares, pois isso pode melhorar o condicionamento da matriz. Portanto, procedeu-se com a normalização das colunas de \mathcal{A} antes da inversão. O procedimento é ilustrado em (5.14). Assim, os valores obtidos da identificação devem ser divididos pelo valor de normalização devido para que correspondam aos coeficientes da equação (5.12).

$$\begin{bmatrix} 1/\max(\boldsymbol{\nu}) \cdot \boldsymbol{\nu} & 1/\max(|\boldsymbol{\nu}| \cdot \boldsymbol{\nu}) \cdot |\boldsymbol{\nu}| \cdot \boldsymbol{\nu} & \mathbf{1} & 1/\max(\boldsymbol{\beta}) \cdot \boldsymbol{\beta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \max(\boldsymbol{\nu}) \cdot B_1/A_1 \\ \max(|\boldsymbol{\nu}| \cdot \boldsymbol{\nu}) \cdot C_1/A_1 \\ D_1/A_1 \\ \max(\boldsymbol{\beta}) \cdot E_1/A_1 \end{bmatrix} = \dot{\boldsymbol{v}} \quad (5.14)$$

As variáveis u , v e w podem ser obtidas por integração discreta dos dados \dot{u} , \dot{v} e \dot{w} , e os termos \dot{p} , \dot{q} e \dot{r} são advindos da dupla derivação de ϕ_m , θ_m e ψ_m .

Um cuidado complementar foi tomado: como eventualmente o cálculo por mínimos quadrados fornecera coeficientes de arrasto cujo sinal estava fora de conformidade com a modelagem física do problema, esses termos foram forçados a zero e uma nova identificação era feita.

Verificou-se ainda que o atraso entre a atuação e o efeito nas variáveis de estado é um aspecto de grande influência na qualidade e na estabilidade do modelo obtido. Dessa maneira, antes do cálculo dos parâmetros pela técnica dos mínimos quadrados, obtinha-se a função de correlação entre os sinais de entrada e saída e o sinal de entrada era transladado no tempo correspondente ao pico da função de correlação, respeitando a causalidade do fenômeno físico. Assim, o resultado da identificação forneceu as formulações em (5.15) e (5.16), em que λ é o atraso obtido pela função de correlação.

$$A_1 \dot{\nu}(t + \lambda) = B_1 \nu(t + \lambda) + C_1 |\nu(t)| \nu(t + \lambda) + D_1 + E_1 \beta(t) \quad (5.15)$$

$$A_2 \dot{\nu}(t + \lambda) = B_2 \nu(t + \lambda) + C_2 |\nu(t)| \nu(t + \lambda) + D_2 + E_2 \beta^2(t) \quad (5.16)$$

Uma compilação dos erros quadráticos médios para os modelos com atuação linear e quadrática encontram-se na Tabela 7.2, no Capítulo 7. Os coeficientes advindos das melhores estimações encontram-se no mesmo capítulo, bem como seu erro quadrático médio, na Tabela 7.3.

Assim, podemos obter o significado físico dos coeficientes obtidos:

- Dado que E_1 é conhecido por (5.8) e partindo da formulação (5.14), obtemos A_1 por

$$\max(\boldsymbol{\beta}) \cdot E_1/A_1$$

- De (3.42), tem-se:

$$A_1 = M = M_{CR} + M_A$$

de onde se obtém a massa adicionada M_A ;

- Conhecido A_1 , os coeficientes de arrasto são obtidos de

$$\max(\boldsymbol{\nu}) \cdot B_1/A_1$$

$$\max(|\boldsymbol{\nu}| \cdot \boldsymbol{\nu}) \cdot C_1/A_1$$

Desta etapa de ensaios, constatou-se que:

- A identificação para propulsão linear apresenta-se ligeiramente melhor que a quadrática, para a maioria das curvas analisadas;
- O uso de um termo de *offset* é vantajoso na descrição do afundamento, mas fornece estimativas piores quando presente nas demais equações dinâmicas.

Os resultados desta etapa de identificação encontram-se no Capítulo 7, Seção 5.2.

5.3 Identificação do modelo do navio de superfície, envolvendo atuações em avanço e guinada

Esta etapa teve como objetivo o acoplamento das variáveis em um modelo de navio de superfície. Por causa disso, foram considerados como saída os dados de avanço (x), deriva (y) e guinada (ψ), e como dados de entrada, sinais em avanço e em guinada. O acoplamento dos três graus de liberdade é explicitado através da matriz de forças de Coriolis. Os resultados do experimento anterior forneceram baixos valores para o coeficiente de arrasto quadrático no eixo de atuação (por exemplo: dinâmica em X para atuação em avanço, em ψ para atuação em guinada, e em Z para afundamento). Por causa disso, eles foram desprezados na etapa presente.

A equação considerada para identificação, retomada de (3.45) é:

$$M\dot{\nu} + C(\nu_r)\nu + F_D(\nu_r) + G(\eta) = \tau_{\text{cabo}} + \tau_{\text{prop}}$$

Nesta etapa, o modelo de navio de superfície considera movimentos em avanço, deriva e guinada simultaneamente, de modo que a matriz de forças de Coriolis $C(\nu_r)$ é não-nula. Os esforços restaurativos, representados por $G(\eta)$, não atuam sobre as variáveis de estado aqui consideradas. O subscrito NS identificará os termos do modelo do navio de superfície.

Jie e Pan [4] fornecem as equações de movimentos combinados de maneira bem clara, de modo que seu formalismo e notação serão usados aqui. A exceção se dará na representação das massas adicionadas, que aqui serão consideradas com sinal positivo.

Tem-se, então:

$$M_{NS}\dot{\nu} + C_{NS}(\nu_r)\nu + F_{D_{NS}}(\nu_r) = \tau_{\text{prop}_{NS}} \quad (5.17)$$

$$\begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & -m_{22} \cdot v \\ 0 & d_{22} & m_{11} \cdot u \\ m_{22} \cdot v & -m_{11} \cdot u & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{NS_1} & E_{NS_2} \\ 0 & 0 \\ E_{NS_1} & -E_{NS_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Em que:

$$\begin{aligned} m_{11} &= m + m_{Ax} & d_{11} &= C_{1x} \\ m_{22} &= m + m_{Ay} & d_{22} &= C_{1y} \\ m_{33} &= m + m_{A\psi} & d_{33} &= C_{1\psi} \end{aligned}$$

O termo $\tau_{\text{prop}_{NS}}$ assume a forma proposta em (5.18) de modo a privilegiar os sinais de atuação τ_1 e τ_2 de cada um dos motores separadamente. A soma dos sinais fornecidos aos motores compõe o movimento de avanço; e sua subtração, o movimento de guinada. Entretanto, esta não é a única forma de representar os sinais de entrada. Uma outra possibilidade de identificação seria dada por (5.19), em que $\tau_y = 0$.

$$\tau'_{\text{prop}_{NS}} = \begin{bmatrix} E'_{NS_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E'_{NS_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_\psi \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Como componentes desconhecidas, temos o termo inercial m_{22} , o termo de arrasto d_{22} e os coeficientes de ponderam os sinais de atuação dos motores, E_{NS_1} e E_{NS_2} . Como a equação é linear com relação aos parâmetros, pode-se utilizar novamente o método dos mínimos quadrados para identificá-los.

Rearranjando a equação matricial (5.18), tem-se (5.20) e (5.21), em que os termos em negrito são vetores. Especificamente para os dados de velocidade e de aceleração, sua fonte são as leituras de sensores.

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{v} \cdot \mathbf{r} & \mathbf{0} & -\tau_1 & -\tau_2 \\ \dot{\mathbf{v}} & \mathbf{v} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} & \mathbf{0} & -\tau_1 & \tau_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{22} \\ d_{22} \\ E_{NS_1} \\ E_{NS_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_{11} \cdot \dot{\mathbf{u}} - d_{22} \cdot \mathbf{u} \\ -m_{11} \cdot \mathbf{u} \cdot \mathbf{r} \\ -m_{33} \cdot \dot{\mathbf{r}} - m_{11} \cdot \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} - d_{33} \cdot \mathbf{r} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$$\begin{bmatrix} m_{22} \\ d_{22} \\ E_{NS_1} \\ E_{NS_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{v} \cdot \mathbf{r} & \mathbf{0} & -\tau_1 & -\tau_2 \\ \dot{\mathbf{v}} & \mathbf{v} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} & \mathbf{0} & -\tau_1 & \tau_2 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} -m_{11} \cdot \dot{\mathbf{u}} - d_{22} \cdot \mathbf{u} \\ -m_{11} \cdot \mathbf{u} \cdot \mathbf{r} \\ -m_{33} \cdot \dot{\mathbf{r}} - m_{11} \cdot \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} - d_{33} \cdot \mathbf{r} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Espera-se que:

- A matriz M_{NS} , equação (5.17), tenha seus termos sobre a diagonal com valores próximos;
- Sejam similares:
 - m_{11} e A_1 obtido do ensaio em avanço;

- m_{33} e A_1 obtido do ensaio em guinada;
- d_{11} e B_1 obtido do ensaio em avanço;
- d_{33} e B_1 obtido do ensaio em guinada;
- $(E_{NS_1} + E_{NS_2})$ e E_1 obtido do ensaio em avanço;
- $(E_{NS_1} - E_{NS_2})$ e E_2 obtido do ensaio em guinada.

Utilizando conhecimentos dos ensaios anteriores (seção 5.2), o sinal de propulsão foi mantido na equação do modelo como sendo linear, e os termos de *offset* foram desconsiderados da identificação. Entretanto, o atraso do sinal de entrada foi obtido através da mediana dos picos de correlação dos dados de avanço, deriva e guinada com relação a uma das entradas. Os valores para atraso encontrados nesta etapa foram, em sua maioria, nulos.

Os resultados desta etapa de identificação encontram-se no Capítulo 7, Seção 5.3.

Capítulo 6

Procedimentos para Implementação do Controle

O presente capítulo versa sobre a implementação do controle *flatness* sobre o sistema do navio de superfície, dividindo-se nas partes de simulação e implementação para operação do robô *VideoRay 4 Pro*.

6.1 Simulação

O controle foi simulado em *Matlab* a partir de código fornecido por M. Eng. José Oniram Limaverde Filho. Nele, constam:

- Parâmetros do robô: dados da dinâmica e saturação dos atuadores;
- Trajetórias nominais para velocidade propostas:
 - Velocidades constantes em avanço e em guinada;
 - Velocidade com perfil polinomial em avanço;
 - Velocidade com perfil polinomial em guinada;
- Construção das entradas planas;
- Efetuação da simulação propriamente dita;
- Exibição de resultados.

Os dados da dinâmica do navio de superfície foram obtidos conforme a Seção 5.3. Sabendo que o controle proposto se dá pela linearização da dinâmica do sistema em torno de sua trajetória nominal, é preciso obter as trajetórias nominais das entradas a partir das restrições impostas pelas trajetórias em velocidade. As trajetórias de velocidades propostas são dadas nos eixos de atuação; ou seja, em avanço (X) e em guinada (ψ). Elas são representadas por U_d e R_d . Dado que o navio

de superfície é um sistema dinâmico de ordem 3, verifica-se que ele é subatuado, e a dinâmica em deriva (Y) também deve ser extraída das supracitadas. Esta é referida por V_d ;

Rememorando a dinâmica do navio de superfície, dada em (5.18), obtemos a dinâmica em deriva pela equação (6.1). Sendo esta uma equação diferencial, ela foi implementada em *Simulink* e foi recuperada a sequência temporal relativa a este deslocamento. As trajetórias nominais das entradas (τ_{1d} e τ_{2d}) também são obtidas a partir da equação (5.18), sendo dadas em (6.2) e (6.3).

$$m_{22} \cdot \dot{V}_d + d_{22} \cdot V_d + m_{11} \cdot V_d \cdot R_d = 0 \quad (6.1)$$

$$\tau_{1d} = (R_d d_{33} + U_d d_{11} + \dot{R}_d m_{33} + m_{11} \cdot (\dot{U}_d + U_d V_d) - R_d V_d m_{22} - U_d V_d m_{22}) / (2E_{NS_1}) \quad (6.2)$$

$$\tau_{1d} = -(R_d d_{33} - U_d d_{11} + \dot{R}_d m_{33} - m_{11} \cdot (\dot{U}_d - U_d V_d) + R_d V_d m_{22} - U_d V_d m_{22}) / (2E_{NS_2}) \quad (6.3)$$

Sabe-se que as entradas planas são obtidas por (4.15), e que são, em número, iguais às entradas do sistema. Sendo assim, temos duas entradas planas, referidas por F_1 e F_2 . As entradas planas nominais, F_{1d} e F_{2d} , são obtidas por substituição direta dos estados nominais, sob a forma em (6.4).

$$\begin{bmatrix} F_{1d} \\ F_{2d} \end{bmatrix} = \alpha \cdot S \cdot C_K^{-1} \cdot \begin{bmatrix} U_d \\ V_d \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

No formalismo de espaço de estados, temos que a dinâmica do navio de superfície é dada por (6.5). Escrita desta forma, é patente que a matriz identificada por A em (6.6) é variante no tempo, pois contém u e v . Assim, C_K e C_K^{-1} também o são, e as entradas planas são compostas de uma combinação de coeficientes e de estados variantes no tempo.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_{11}/m_{11} & 0 & m_{22}/m_{11} \cdot v \\ 0 & -d_{22}/m_{22} & -m_{11}/m_{22} \cdot u \\ -m_{22}/m_{33} \cdot v & m_{11}/m_{33} \cdot u & -d_{33}/m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{NS_1}/m_{11} & E_{NS_2}/m_{11} \\ 0 & 0 \\ E_{NS_1}/m_{33} & -E_{NS_2}/m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \quad (6.6)$$

Pelo fato de a linearização do sistema se dar em torno de uma trajetória desejada, a matriz A permanece com coeficientes variantes no tempo; contudo, as variáveis de estado do sistema linearizado passam a ser incrementais, dadas por:

$$\begin{aligned}
\delta_u(t) &= u(t) - U_d(t) & \delta_{\tau_1}(t) &= \tau_1(t) - \tau_1 d(t) \\
\delta_v(t) &= v(t) - V_d(t) & \delta_{\tau_2}(t) &= \tau_2(t) - \tau_2 d(t) \\
\delta_r(t) &= r(t) - R_d(t)
\end{aligned}$$

As entradas planas podem ser escritas genericamente por (6.7), e suas derivadas devem fazer uso da regra do produto para derivação. Vale lembrar que as derivadas dos estados são diretamente substituídas pela equação (6.5).

$$F(t) = a_1(t) \cdot u(t) + a_2(t) \cdot v(t) + a_3(t) \cdot r(t) \quad (6.7)$$

$$F_{\delta}(t) = a_1(t) \cdot \delta_u(t) + a_1(t) \cdot \dot{\delta}_u(t) + a_2(t) \cdot \delta_v(t) + a_2(t) \cdot \dot{\delta}_v(t) + a_3(t) \cdot \delta_r(t) + a_3(t) \cdot \dot{\delta}_r(t) \quad (6.8)$$

$$F(t) = [a_1(t) + a_4(t)] \cdot \delta_u(t) + [a_2(t) + a_5(t)] \cdot \delta_v(t) + [a_3(t) + a_6(t)] \cdot \delta_r(t) + a_7(t) \cdot \delta_{\tau_1} + a_8(t) \cdot \delta_{\tau_2} \quad (6.9)$$

No caso do sistema linearizado, o raciocínio é análogo para a obtenção das entradas planas incrementais. Tem-se (6.9).

Apenas as derivadas de ordem mais elevada de cada entrada plana possuem os coeficientes que multiplicam as entradas, representados por $a_7(t)$ e $a_8(t)$, não nulos.

Com relação ao número de derivações requeridas para cada entrada plana, é preciso rememorar as definições associadas aos índices de Kronecker. A cada entrada plana há um índice associado, o somatório dos índices equivale à ordem do sistema dinâmico, eles informam o número de vezes que cada entrada plana será derivada e, para sistemas com mais de uma entrada plana, diferentes combinações de índices de Kronecker são possíveis.

Especificamente para o navio de superfície, temos que os possíveis índices de Kronecker são [1, 2] ou [2, 1]. A primeira opção foi escolhida para este trabalho.

Uma vez derivadas as entradas planas, podemos escrevê-las como uma combinação linear dos estados e das entradas, obtendo a matriz $M(t)$ representada em (4.16). Esta matriz é usada em dois momentos:

1. Para o cálculo do termo de correção. Ele faz uso das entradas planas e suas derivadas até a máxima ordem, menos 1. Para obtê-las, usamos um subconjunto da matriz M e um vetor de variáveis de estado em um dado instante t . Especificamente, temos como termos de correção para a presente planta (6.10) e (6.11).

$$\nu_1 = K_{01} \cdot F_{\delta 1} \quad (6.10)$$

$$\nu_1 = K_{02} \cdot F_{\delta 2} + K_{12} \cdot \dot{F}_{\delta 2} \quad (6.11)$$

- Para a obtenção da lei de controle, dada pelas últimas linhas (neste caso, as duas últimas), da equação (4.23).

Calcular a matriz M e sua inversa para cada instante em análise é uma tarefa custosa, o que dificultaria uma implementação real se o cômputo fosse feito durante o controle da planta. Felizmente, esses coeficientes podem ser calculados antecipadamente, porque dependem apenas dos valores nominais dos estados. Feito isso, cabe ao sistema de controle apenas acessar iterativamente os coeficientes que fornecerão as entradas planas e a lei de controle.

Os resultados do controle aqui descrito encontram-se no Capítulo 8. A malha de controle em simulação, cujo esquema consta na Figura 6.1, foi produzido por M. Eng. José Oniram Limaverde Filho e adaptado para a coleta dos coeficientes da matriz M e inserção de perturbações. Detalhes sobre o bloco de geração dos sinais de atuação T_1 e T_2 encontram-se na Figura 6.2. Este deve receber os valores das variáveis de estado (velocidades em avanço, deriva e guinada - U, V, R), os pólos do polinômio que descreve a dinâmica do erro (p_1 e p_2), os valores desejados das variáveis de estado e das entradas ($Ud, Vd, Rd, T1d, T2d$), e os valores das entradas planas e suas derivadas, variantes com o tempo e representadas na Equação (4.16) por $F_1, \dot{F}_1 \dots F_1^{(kc_1)} \dots F_n, \dot{F}_n \dots F_n^{(kc_n)}$.

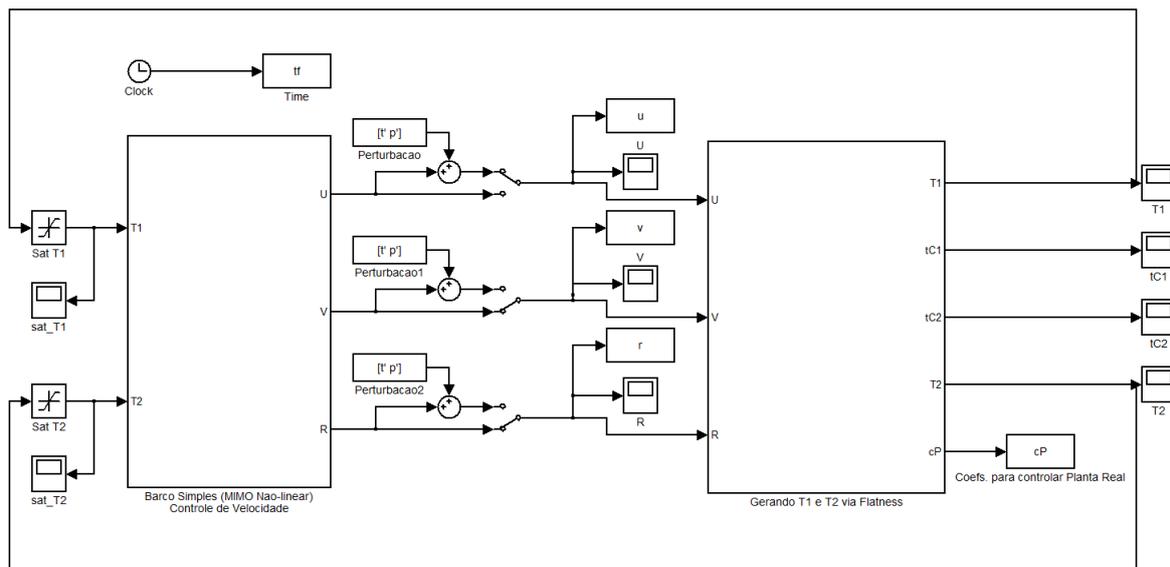


Figura 6.1: Malha de controle de navio de superfície

6.2 Aspectos de implementação na planta real

Os dados obtidos dos coeficientes cP a partir da simulação em *Matlab* devem ser copiados para o programa de comando do robô, bem como os valores dos estados e das trajetórias nominais. cP consiste em uma matriz bidimensional, em que cada linha corresponde a um instante de tempo. Os demais vetores são unidimensionais, também indexados pelo tempo.

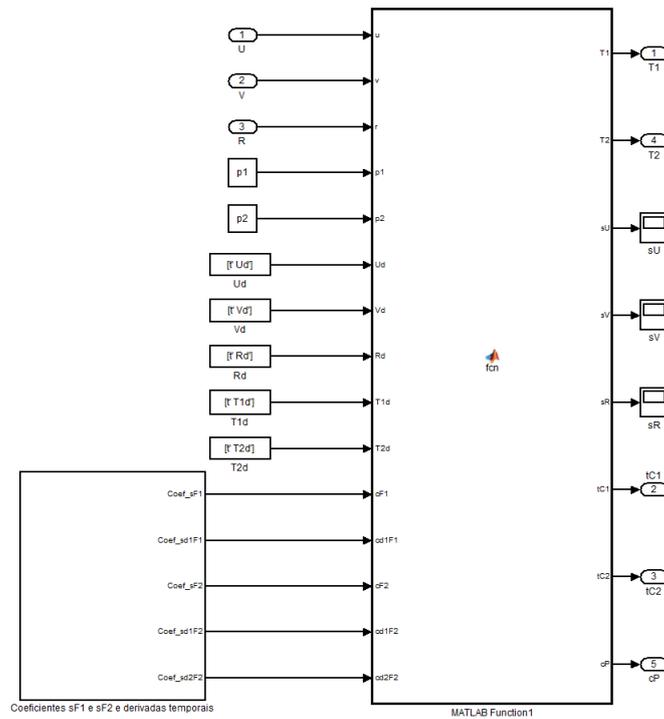


Figura 6.2: Detalhe do bloco *Gerando $T1$ e $T2$ via Flatness* da Figura 6.1

Além disso, é preciso dilatar o sinal de atuação do robô, dado que o tempo de amostragem do robô, de 0,1s, é bem menor que o tempo característico da resposta dinâmica do robô, que é da ordem de segundos. Esse processo de espera para mudança do sinal de controle pode tornar-se um aspecto positivo para o controle, uma vez que os dados dos sensores podem ser coletados e filtrados (por média ou mediana, por exemplo), antes de serem empregados pelo controlador.

É preciso conceber estimadores das variáveis de estado de interesse, dado que movimentações em avanço e deriva são informadas por meio de aceleração; e o movimento de guinada é dado por deslocamento angular. Assim, é necessário aplicar integração discreta sobre os dados de avanço e deriva, e derivação discreta sobre os de guinada.

As descontinuidades do sensor de guinada também são um fator a ser tratado, uma vez que ele apenas fornece valores entre 0 e 3600. Ademais, para uso do controlador proposto neste trabalho, é preciso retirar os *offsets* dos dados dos sensores e multiplicá-los por fator de escala que os converta às unidades SI.

Capítulo 7

Resultados da identificação de parâmetros

7.1 Dados obtidos da etapa de identificação de características de ruídos e perturbações (seção 5.1)

Tabela 7.1: Leituras de sensores para ROV fora e dentro d'água

	Seco		Piscina	
	<i>Média</i>	<i>Desv. Padrão</i>	<i>Média</i>	<i>Desv. Padrão</i>
$\dot{p}(0, 1^\circ/s^2)$	-19218,7	2056,994	-12976,5	7811,294
$\dot{q}(0, 1^\circ/s^2)$	-25088	0	-12620	5879,987
$\dot{r}(0, 1^\circ/s^2)$	-23305,8	1774,962	-17312,7	1700,562
$\dot{u}(cm/s^2)$	21	0	1,2	7,906
$\dot{v}(cm/s^2)$	64,1	1,789	82,3	9,386
$\dot{w}(cm/s^2)$	987,4	2,490	988,8	4,266
$\phi_m(0, 1^\circ)$	36,8	1,342	47,4	5,404
$\theta_m(0, 1^\circ)$	-12	0	-0,7	4,393
$\psi_m(0, 1^\circ)$	1939,6	1,949	461,1	117,889
$z_m(cm)$	0,018023	0,122	0,11706	0,347

Os valores de média dos ensaios a seco fornecem o *offset* dos sensores, enquanto os dados lidos do ensaio na água fornecem características sobre as perturbações às quais o robô está sujeito, como efeito de correnteza e atuações do cabo umbilical. Os *offsets* dos sensores foram removidos dos dados a serem utilizados no processo de identificação.

Da Tabela 7.1, verifica-se que os dados de aceleração angular \dot{p} , \dot{q} e \dot{r} possuem, em geral, alta variabilidade. Sendo eles muito ruidosos, seu uso sem prévio tratamento é desaconselhado. Apesar

disso, também é possível obter dados de velocidade angular indiretamente a partir dos sensores de deslocamento angular. Estes fornecem ϕ_m , θ_m e ψ_m , devendo ser derivados para a obtenção do sinal de interesse.

7.2 Dados obtidos da etapa de identificação do comportamento dinâmico de cada variável de estado para única atuação (seção 5.2)

Para a identificação dos parâmetros nesta etapa, foram efetuados os seguintes ensaios:

- Três ensaios com atuação em avanço
 - Dois com intensidade de propulsores a 30% da máxima amplitude;
 - Um com intensidade de propulsores a 35% da máxima amplitude.
- Quatro ensaios com atuação em guinada
 - Dois com intensidade de propulsores a 35% da máxima amplitude;
 - Dois com intensidade de propulsores a 45% da máxima amplitude.
- Dois ensaios com atuação em afundamento, com intensidade de propulsores a amplitude máxima.

O período dos sinais de entrada é igual a 1s. Foi comparada a média dos erros quadráticos das identificações, que em uma primeira etapa foram produzidas por estimações usando modelos linear e quadrático dos sinais de atuação, conforme as equações (5.9) e (5.10).

As médias dos erros quadráticos foram compiladas na Tabela 7.2. Nela figuram 63 pares de valores, dos quais 47 apresentam erros menores para a estimação com modelo linear de atuação. Por isso, o modelo linear foi escolhido para a etapa seguinte de identificação do navio de superfície. Observa-se que, em vários casos, o modelo quadrático é instável, o que não acontece com o modelo linear em atuação. Na tabela em questão, w_Z refere-se ao modelo da dinâmica em Z obtido a partir da aceleração em afundamento; e w_Z refere-se ao obtido do sensor de profundidade. A Figura 7.1 exibe uma comparação entre o desenvolvimento da dinâmica a partir dos modelos propostos e a curva real, evidenciando a vantagem que o modelo linear em atuação apresenta em relação ao modelo quadrático.

Foram escolhidos os melhores modelos com atuação linear para cada eixo para comporem os resultados de identificação, que constam na Tabela 7.3.

Tabela 7.2: Erros quadráticos médios para cada um dos ensaios de identificação do comportamento dinâmico de cada variável de estado para única atuação

Ensaio	Eixo	Propulsão	Erro linear	Erro quadrático
Avanço	u	30	5,1441	4,1796
		30	0,7081	0,9181
		35	1,9293	4,6823
	v	30	3,9208	3,4355
		30	0,0914	0,4674
		35	1,05753	0,3909
	$w_{\ddot{z}}$	30	6,2993	31,8363
		30	0,1426	0,1247
		35	0,3867	0,5259
	p	30	0,1916	Divergente
		30	0,0636	3,4649
		35	0,18	Divergente
	q	30	0,0761	0,0797
		30	0,0502	0,9786
		35	0,1456	Divergente
	r	30	1,5193	1,9258
		30	0,2321	0,3471
		35	0,2214	0,1922
	w_z	30	0,1258	0,1260
		30	0,0015	Divergente
		35	0,0025	Divergente
Guinada	u	35	0,6375	0,7467
		35	0,7492	0,2923
		45	2,6741	0,8183
		45	2,4799	1,3901
	v	35	0,6353	0,9496
		35	1,5703	0,3300
		45	1,5017	0,7135
		45	4,4522	3,1261
	$w_{\ddot{z}}$	35	0,0472	0,0515
		35	0,3044	0,0865
		45	6,3158	10,6415
		45	8,9778	9,5533
	p	35	0,1666	Divergente
		35	0,0809	0,0754
		45	0,1291	0,1786
		45	0,1811	Divergente
q	35	0,0504	0,1475	

Guinada	q	35	0,0546	0,1185	
		45	0,1139	Divergente	
		45	0,0874	0,1331	
	r	35	3,2294	3,4082	
		35	2,4025	3,0426	
		45	2,854	4,5511	
	w_Z	45	1,1557	1,1718	
		35	0,0073	938287301,6584	
		35	0,0013	Divergente	
		45	0,1468	0,1792	
	Afundamento	u	100	8,0104	6,0930
			100	5,5829	2,2776
v		100	1,7413	5,2597	
		100	0,2378	0,9815	
$w_{\ddot{z}}$		100	4,5540	70,5033	
		100	0,3498	0,4035	
p		100	0,1457	0,1986	
		100	0,1537	0,208	
q		100	0,1689	0,2923	
		100	0,1908	0,3455	
r		100	0,3749	0,3799	
		100	0,6542	0,6544	
w_Z		100	0,0439	0,0474	
		100	0,0025	0,0065	

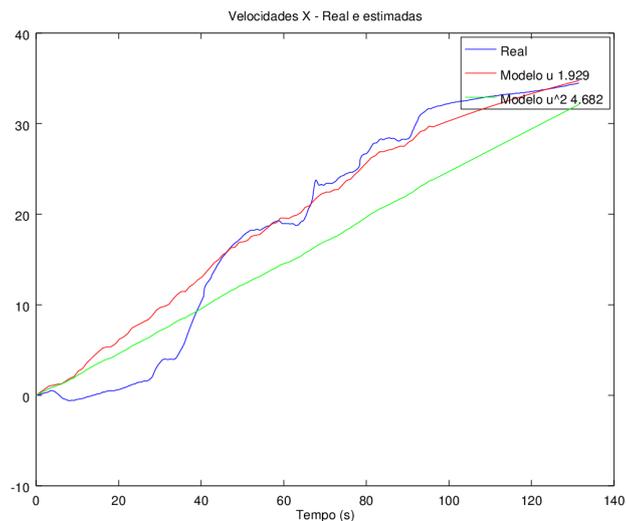


Figura 7.1: Comparação entre as respostas dos modelos linear e quadrático e a do sistema real

Tabela 7.3: Resultados de identificação para cada eixo

Atuação	Eixo	Atraso (s)	A	B	C	D	E	$M_A(kg)$
Avanço	u	3,5	1,0000	0,0000	0,0000	0,6178	-0,2096	144,7060
	v	0	1,0000	0,0000	0,0001	0,0948	-0,1703	978,5428
	w	0	1,0000	0,0000	0,0009	-0,0126	0,0622	7416,6902
	p	0	1,0000	0,0061	1,1185	-0,0091	-0,0014	10219,5333
	q	0	1,0000	0,0001	3,1790	0,0382	-0,0012	2550,5915
	r	0	1,0000	0,0001	0,0000	0,0551	0,0023	1688,9937
Guinada	u	0	1,0000	0,0000	0,0000	-0,0538	-0,1744	324,0784
	v	0	1,0000	0,0000	0,0001	-0,0017	-0,2739	10590,7469
	w	0	1,0000	0,0008	0,0000	0,0022	0,0399	8103,5644
	p	1,25	1,0000	0,0000	0,4334	-0,0734	-0,0011	237,4488
	q	0,35	1,0000	0,0000	1,17211	-0,0751	0,0007	232,1479
	r	0	1,0000	0,0000	0,0005	-1,6333	-0,0080	9,50475
Afundamento	u	0	1,0000	0,0000	0,0000	-0,1870	-0,4537	489,0889
	v	0,4	1,0000	0,0107	0,0000	0,0182	-0,1300	5120,8083
	w	0,4	1,0000	0,0000	0,0003	0,1114	0,9439	831,9858
	p	0,4	1,0000	0,0000	1,3705	-0,0440	-0,0032	2117,3890
	q	1,1	1,0000	0,0000	1,4172	-0,2232	-0,0109	411,9780
	r	0	1,0000	0,0001	0,0004	-0,0349	0,0010	2668,2923

Tabela 7.4: Resultados de identificação para eixos onde ocorre atuação direta

Ensaio	Eixo	Atraso (s)	A	B	C	D	E	$M_A(kg)$
Avanço	u	3,5	1,0000	0,0000	0,0000	0,6178	-0,2096	144,7060
Guinada	r	0	1,0000	0,0000	0,0005	-1,6333	-0,0080	9,50475
Afundamento	w	0,4	1,0000	0,0000	0,0003	0,1114	0,9439	831,9858

Da fórmula (5.8), obtém-se $E_1 = 93,4127N$. Aplicando o valor aos coeficientes relacionados nas Tabelas 7.3 e 7.4, obtemos os valores de massa adicionada em cada eixo. Verifica-se que os mesmos são bem superiores aos da massa do robô. Isto é coerente, pois:

- As inércias dos motores e das hélices foram desconsideradas, mas se manifestam aumentando o valor de massa adicionada. Por agirem em partes que giram rápido, há uma grande quantidade de movimento não modelada;
- A estrutura do robô é feita de vários espaços vazios (entre a cobertura e os propulsores, entre propulsores e suporte para lastros, por exemplo), e esses atributos contribuem para o incremento da massa adicional do robô.

Os dados para atuação em guinada devem considerar um torque, e não uma força como atuação. Sendo assim, o valor de massa adicionada encontrado conforme citado acima, usando-se E_1 , foi

multiplicado pelo braço de alavanca, que é $0,1875m$. Este valor é a metade do comprimento do robô, conforme a Tabela 2.2.

7.3 Dados obtidos da etapa de identificação do modelo do navio de superfície (seção 5.3)

Nesta etapa, foram considerados os coeficientes de arrasto e os valores de massas (e momento de inércia, no caso de guinada) do experimento anterior. Isso foi não somente desejado, porque reduziu o número de variáveis a identificar, mas também necessário, porque permitiu que modelos convergentes fossem encontrados.

Para a identificação dos parâmetros nesta etapa, foram efetuados os seguintes ensaios:

- Dois ensaios com atuação em avanço e em guinada com intensidade de propulsores a 20% da máxima amplitude;
- Dois ensaios com atuação em avanço e em guinada com intensidade de propulsores a 30% da máxima amplitude;
- Dois ensaios com atuação em avanço e em guinada com intensidade de propulsores a 40% da máxima amplitude.

Destes ensaios, apenas dois forneceram modelos convergentes. Os dados escolhidos, constantes na Tabela 7.5, são os do experimento que apresentou menor erro médio quadrático, conforme a Tabela 7.6. O período dos sinais de entrada para este conjunto de experimentos é 0,2s.

Esperava-se que o valor da massa m_{22} fosse da mesma ordem de grandeza da massa m_{11} por causa das características geométricas do robô. Isso se verifica na Tabela 7.5, que mostra os coeficientes da melhor identificação obtida.

Outro aspecto esperado era encontrar as razões $\frac{E_{NS1}+E_{NS2}}{m_{11}}$ e $\frac{E_{NS1}-E_{NS2}}{m_{33}}$ com valores da mesma ordem de grandeza de $\frac{E_{Avanço}}{A_{Avanço}}$ e $\frac{E_{Guinada}}{A_{Guinada}}$, respectivamente.

Obteve-se:

- $\frac{E_{NS1}+E_{NS2}}{m_{11}} = 0,2509;$
- $\frac{E_{NS1}-E_{NS2}}{m_{33}} = -0,0776.$

o que é próximo do esperado, segundo a coluna E da Tabela 7.4.

Tabela 7.5: Resultados de identificação do navio de superfície

m_{11}	m_{22}	m_{33}	d_{11}	d_{22}	d_{33}	E_{NS_1}	E_{NS_2}
195,0161	128,8351	643,9295	0,0000	89,6261	0,0000	-0,5055	49,4372

Tabela 7.6: Erros quadráticos médios para os experimentos com resultados convergentes dos ensaios do Navio de Superfície

Ensaio	Propulsão	Média do erro quadrático
1	30	17,6981
2	40	78,3900

Capítulo 8

Resultados obtidos da implementação do controle

Neste capítulo serão apresentados os dados obtidos da implementação do controle por planicidade diferencial, apresentado e descrito nos Capítulos 4 e 6. Foram avaliadas as respostas a trajetórias propostas e o comportamento frente a perturbações.

8.1 Resposta às trajetórias propostas

- Velocidades constantes em avanço e em guinada (Figuras 8.1 e 8.2).

Dados:

– Velocidades desejadas:

- * $U_d = 0,05m/s$;

- * $R_d = 0,2m/s$.

– Parâmetros da dinâmica do erro: $K_{01} = 2$, $K_{02} = 4$, $K_{12} = 4$

- Trajetória de velocidade polinomial em avanço, constante em guinada (Figuras 8.3 e 8.4).

Dados:

– Velocidades desejadas:

- * $U_d(t) = 1,5070 \cdot 10^{-13}t^5 - 9,0422 \cdot 10^{-11}t^4 + 1,4468 \cdot 10^{-8}t^3 + 3,0056 \cdot 10^{-23}t^2 - 6,7479 \cdot 10^{-20}t + 1,1889 \cdot 10^{-17}$;

- * $R_d = 0,04m/s$.

– Parâmetros da dinâmica do erro: $K_{01} = 0,5$, $K_{02} = 1$, $K_{12} = 0,25$

- Velocidade constante em avanço, trajetória polinomial em guinada (Figuras 8.5 e 8.6).

Dados:

– Velocidades desejadas:

$$* U_d = -0,01m/s;$$

$$* R_d(t) = 1,5070 \cdot 10^{-13}t^5 - 9,0422 \cdot 10^{-11}t^4 + 1,4468 \cdot 10^{-8}t^3 + 3,0056 \cdot 10^{-23}t^2 - 6,7479 \cdot 10^{-20}t + 1,1889 \cdot 10^{-17}.$$

– Parâmetros da dinâmica do erro: $K_{01} = 0,5$, $K_{02} = 1$, $K_{12} = 0,25$

Das figuras que ilustram os perfis testados, observa-se que o modelo não-linear do navio de superfície converge, com sucesso, para as trajetórias desejadas. Vale notar que os pontos de início modelo não-linear não coincidem com os das trajetórias de referência, mas encontram-se em uma vizinhança dele. As variáveis T_1 e T_2 são o sinal de atuação dos motores, podendo variar entre -1 e 1.

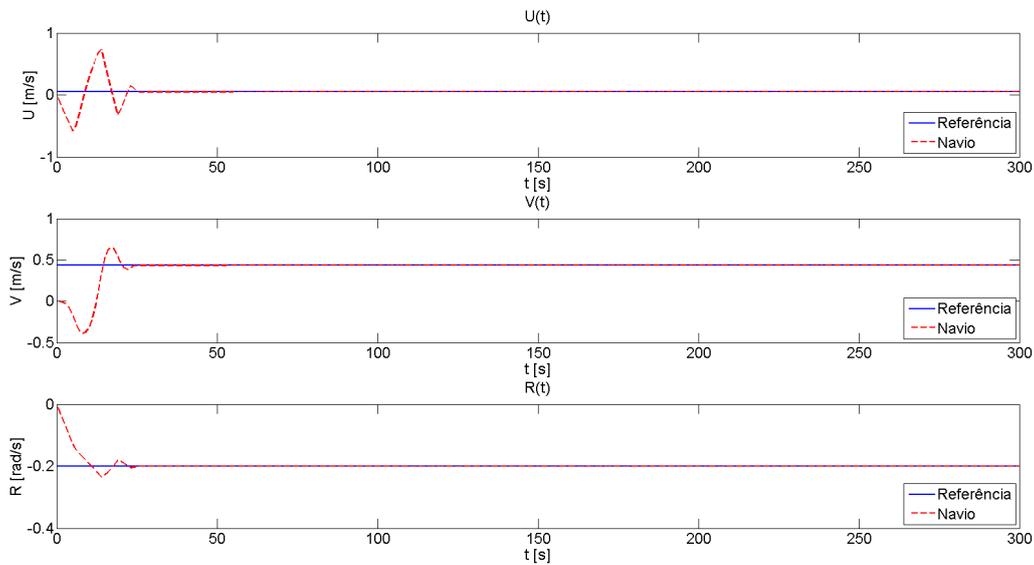


Figura 8.1: Trajetórias de velocidades nominais e obtidas do modelo do navio de superfície para perfis constantes de velocidade em avanço e em guinada

De posse dos perfis em avanço, deriva e guinada, é possível traçar as trajetórias esperadas no espaço. Para os três perfis propostos, as imagens são dadas nas Figuras 8.8, 8.9 e 8.10.

8.2 Resposta a perturbações

Utilizando-se a planta da Figura 6.1, é possível introduzir quaisquer perturbações sobre as variáveis de estado do navio de superfície. Numerosas são as causas de perturbações na planta real - as principais a elencar são os efeitos de correnteza e a dinâmica do cabo.

Nesta etapa, utilizou-se o perfil constante de velocidades como base, foram introduzidos degraus sobre cada uma das variáveis de estado, e aferido o efeito percentual que esses degraus produzem

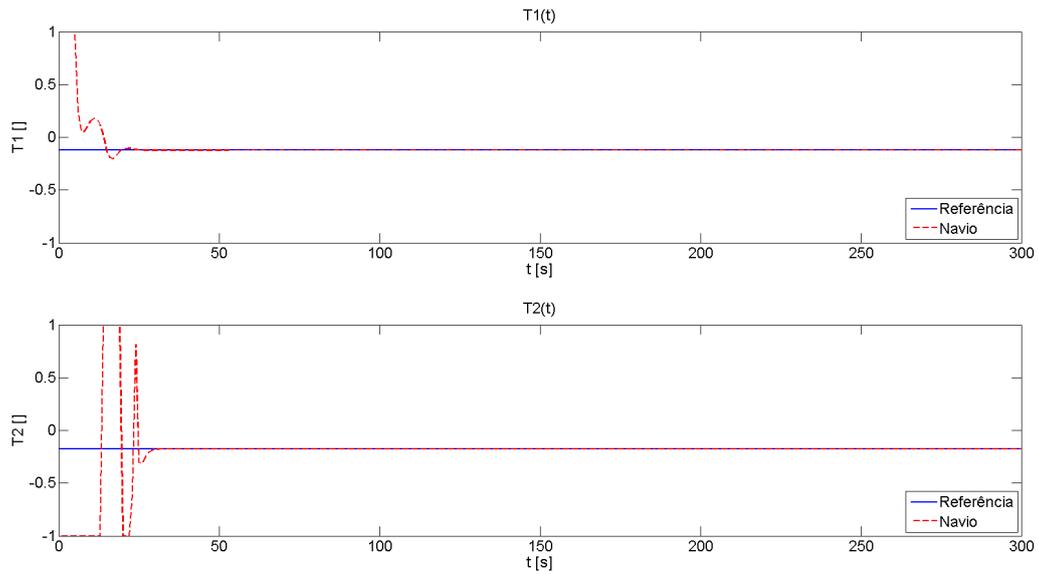


Figura 8.2: Acionamentos nominais e efetuados nas trajetórias da Figura 8.1

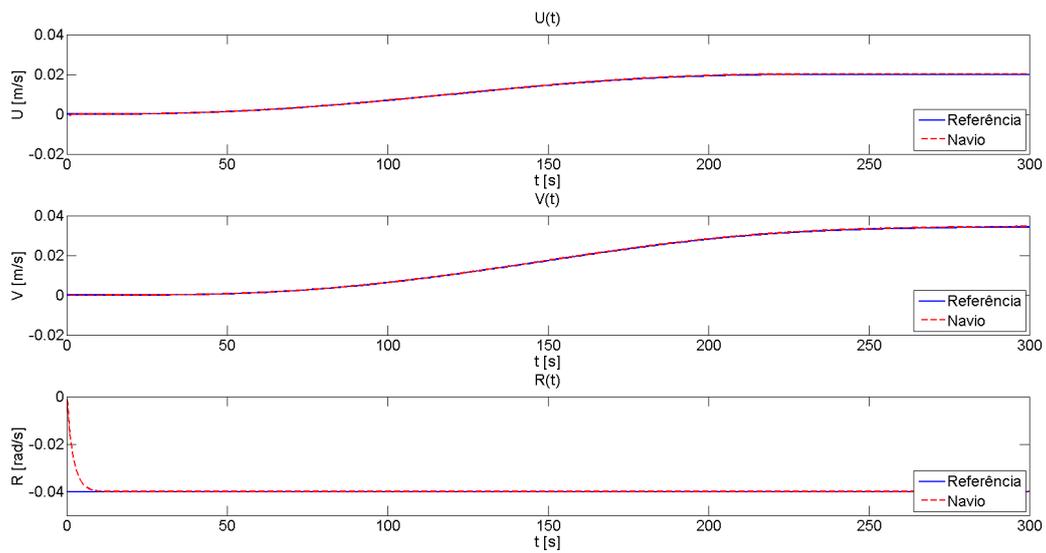


Figura 8.3: Trajetórias de velocidades nominais e obtidas do modelo do navio de superfície para perfil de velocidade polinomial em avanço e constante em guinada

em regime permanente. Observou-se que o controlador implementado não foi capaz de anular completamente os efeitos de uma perturbação em degrau, e por isso não foram testadas perturbações de ordem superior (rampas ou parábolas). Verificou-se ainda que o sistema é consideravelmente mais sensível a variações em guinada, pois elas logo provocam saturações nos atuadores e induzem as variáveis de estado a um comportamento oscilatório.

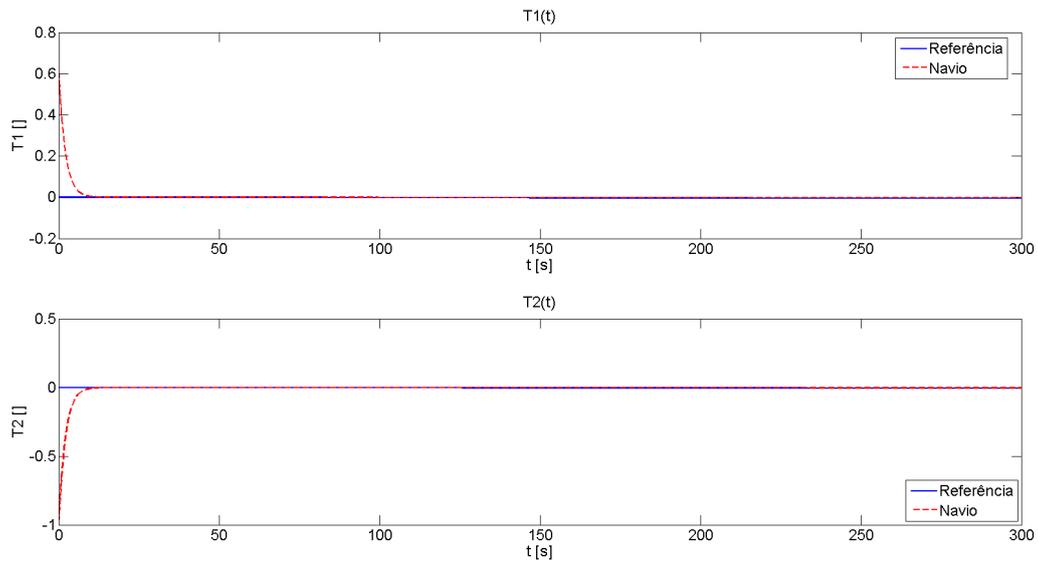


Figura 8.4: Acionamentos nominais e efetuados nas trajetórias da Figura 8.3

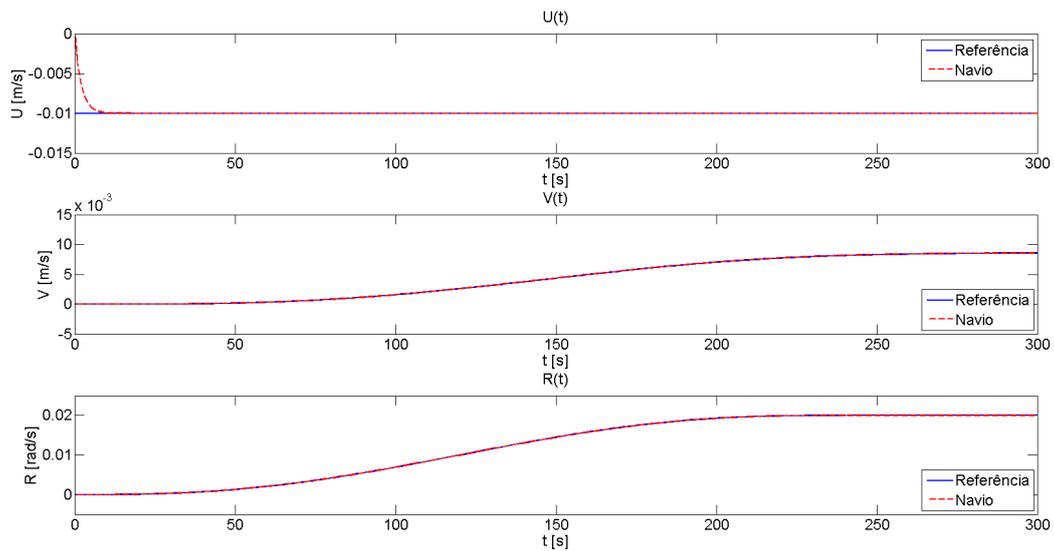


Figura 8.5: Trajetórias de velocidades nominais e obtidas do modelo do navio de superfície para perfil de velocidade constante e avanço e polinomial em guinada

Na Tabela 8.1 estão reunidos os efeitos, em cada variável de estado, das perturbações inseridas em avanço, deriva e guinada. Ela exibe os valores de regime permanente com e sem perturbação para cada variável de estado, a variação absoluta do sinal e o quanto esta variação representa do sinal de entrada, em termos percentuais.

O formato das saídas planas do sistema em questão é dado por (8.1):

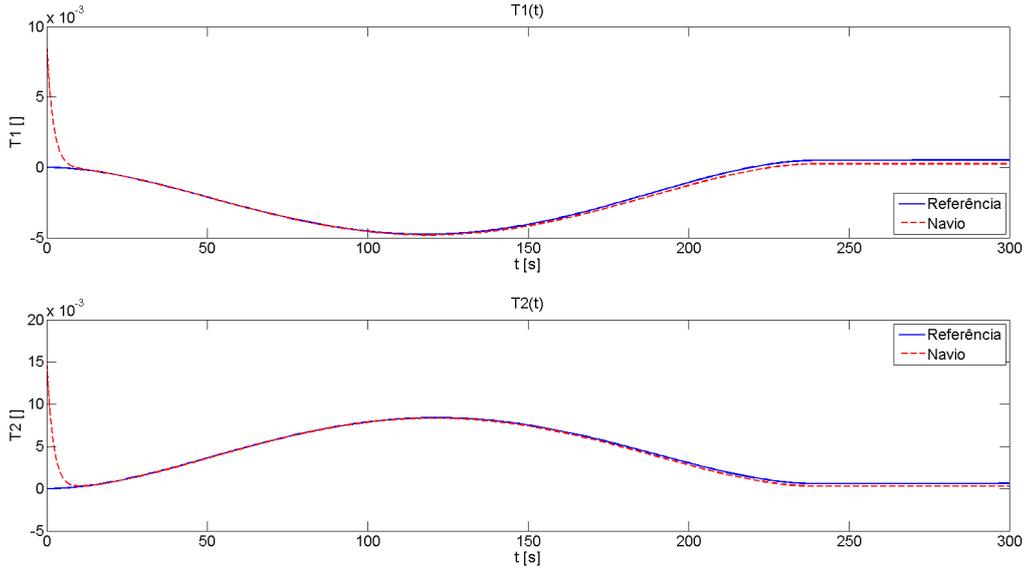


Figura 8.6: Acionamentos nominais e efetuados nas trajetórias da Figura 8.5

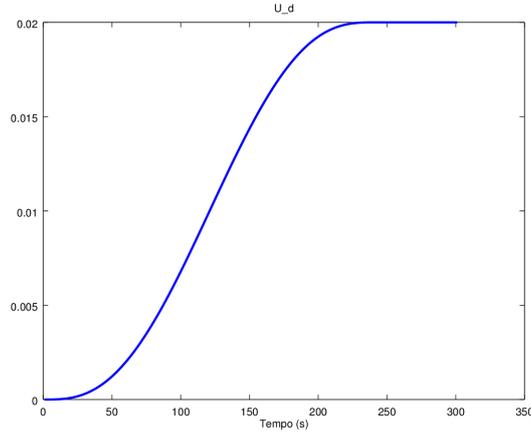


Figura 8.7: Curva polinomial usada como entrada em ensaios com perfis polinomiais

$$F = \begin{bmatrix} \frac{-(C_2^2(R_d m_{33} - U_d m_{11}))}{(m_{22} m_{33}^2)} & 0 \\ \frac{(m_{33}(C_2^2(d_{11} - V_d m_{22}) + C_2^2 V_d m_{11}) - C_2^2 m_{11}(d_{33} - V_d m_{22}))}{(m_{11}^2 m_{33}^2)} & \frac{(2C_1 C_2)}{(m_{11} m_{33})} \\ \frac{-(C_2^2(R_d m_{33} - U_d m_{11}))}{(m_{11} m_{22} m_{33})} & 0 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} U_d \\ V_d \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

O acoplamento entre as velocidades em avanço e guinada, presente na entrada plana 1 (primeira linha da matriz de saídas planas), é uma das razões que evidencia a dificuldade em se prever os efeitos de perturbações em regime permanente.

Dados do degrau de perturbação:

- Duração: 75s

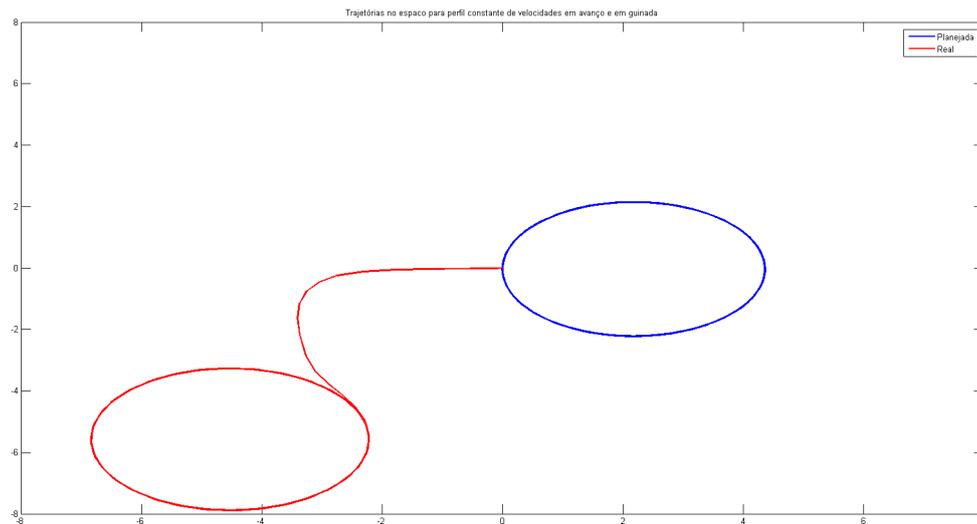


Figura 8.8: Trajetória espacial referente à Figura 8.1: perfis de velocidade constantes

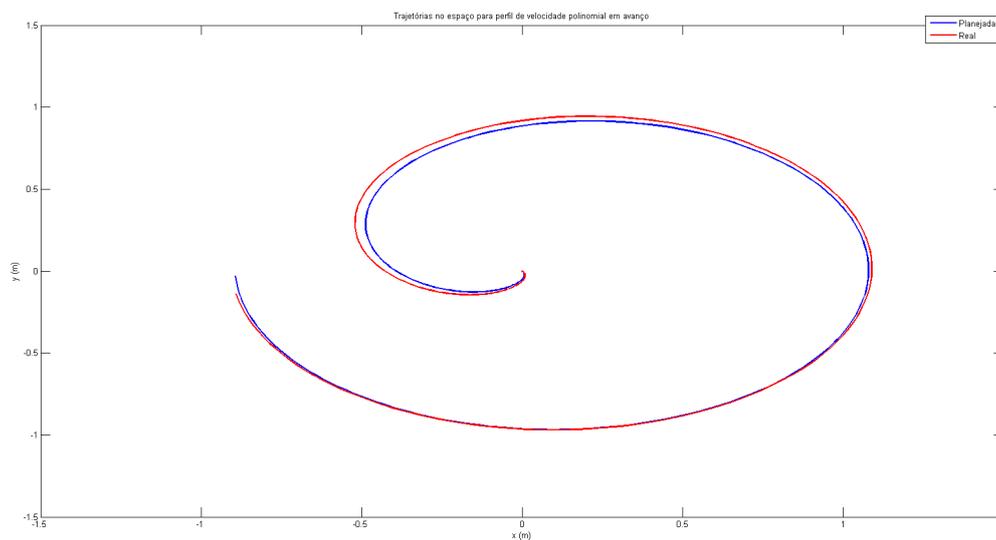


Figura 8.9: Trajetória espacial referente à Figura 8.3: perfil polinomial em avanço e constante em guinada

- Instante de início: $112s$
- Amplitude:
 - Avanço e deriva: $1m/s$;
 - Guinada: $0,1rad/s$

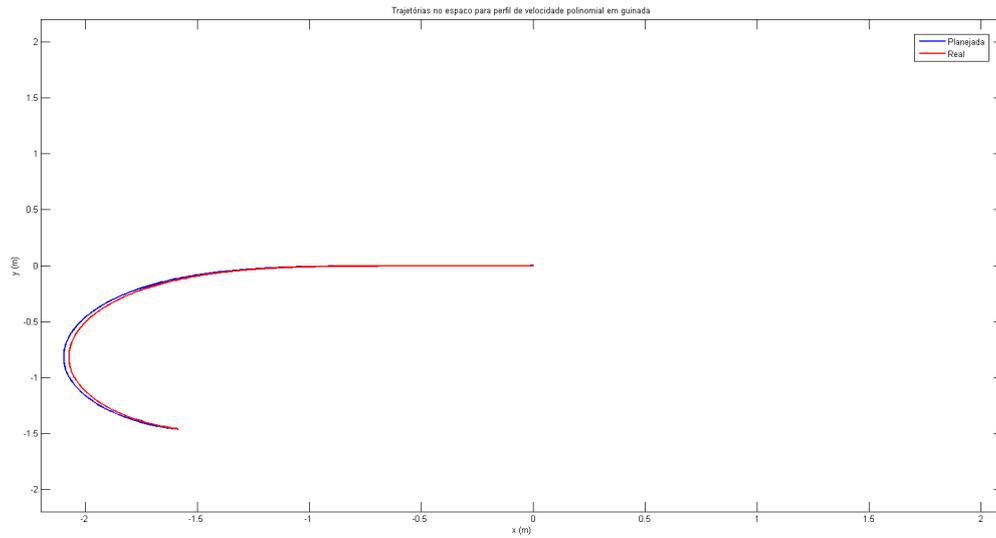


Figura 8.10: Trajetória espacial referente à Figura 8.5: perfil constante em avanço e polinomial em guinada

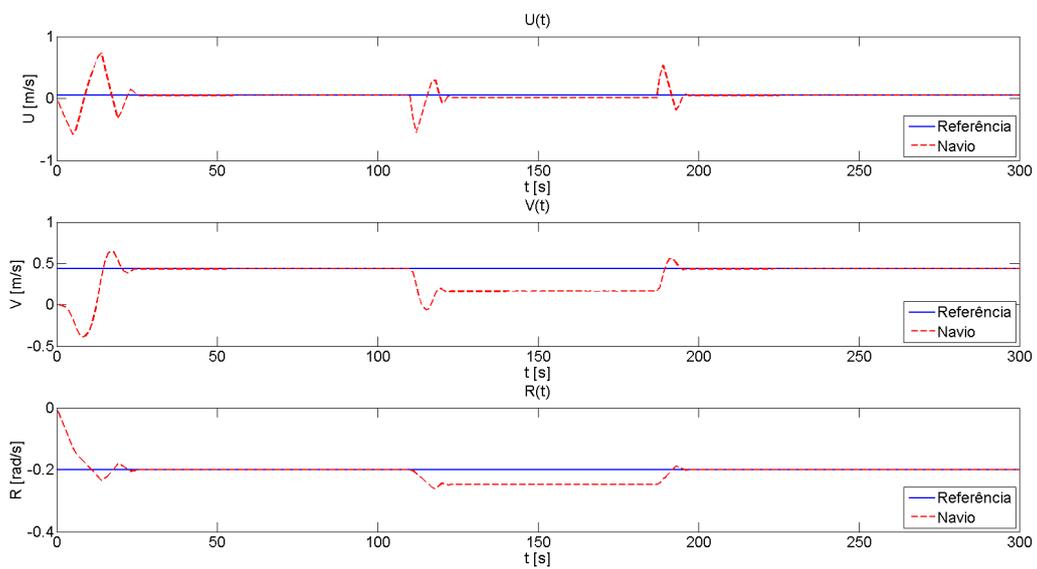


Figura 8.11: Trajetórias de velocidades sob efeito de perturbação degrau em avanço

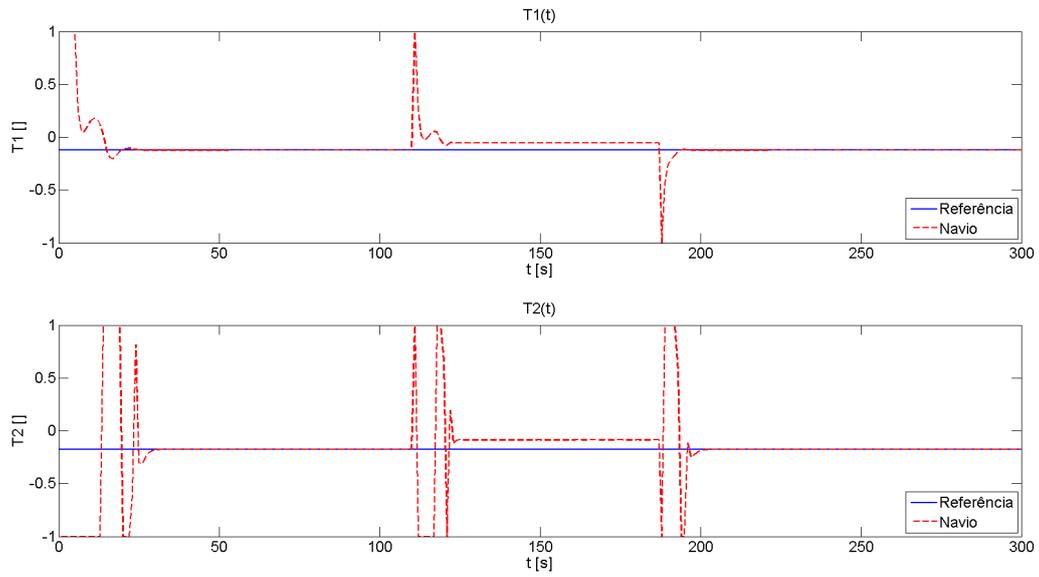


Figura 8.12: Acionamentos sob efeito de perturbação degrau em avanço

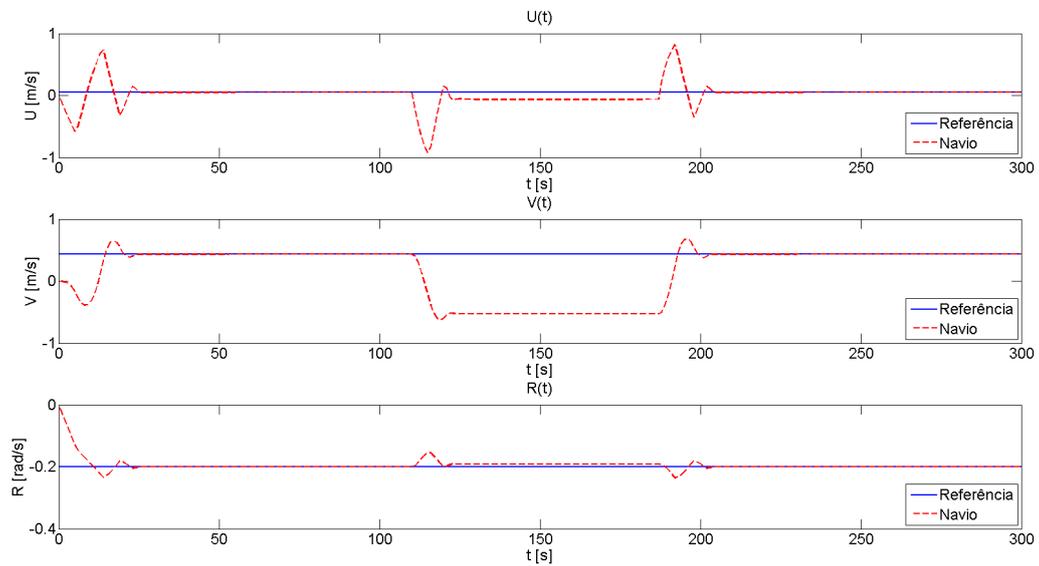


Figura 8.13: Trajetórias de velocidades sob efeito de perturbação degrau em deriva

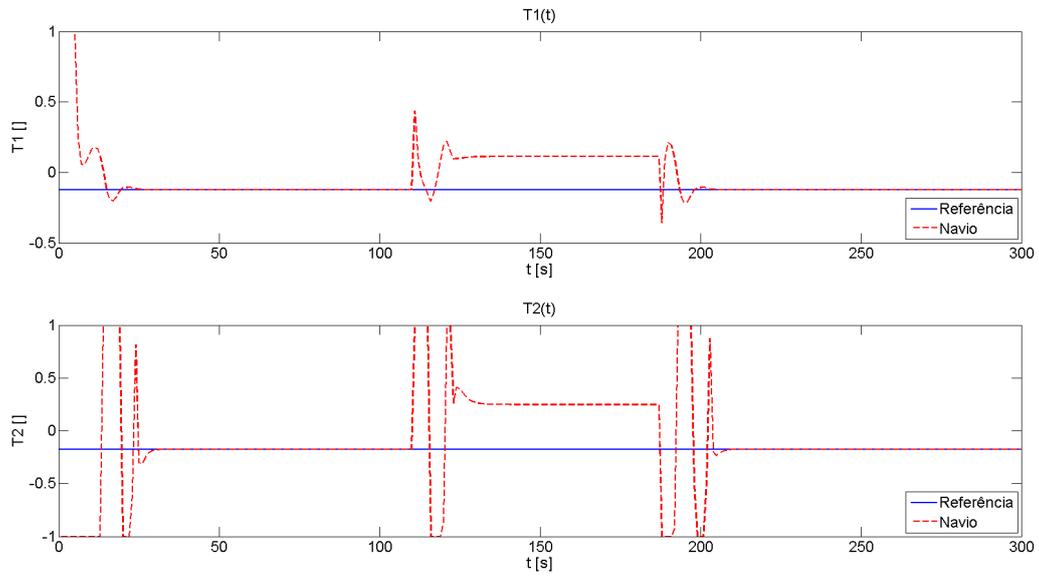


Figura 8.14: Acionamentos sob efeito de perturbação degrau em deriva

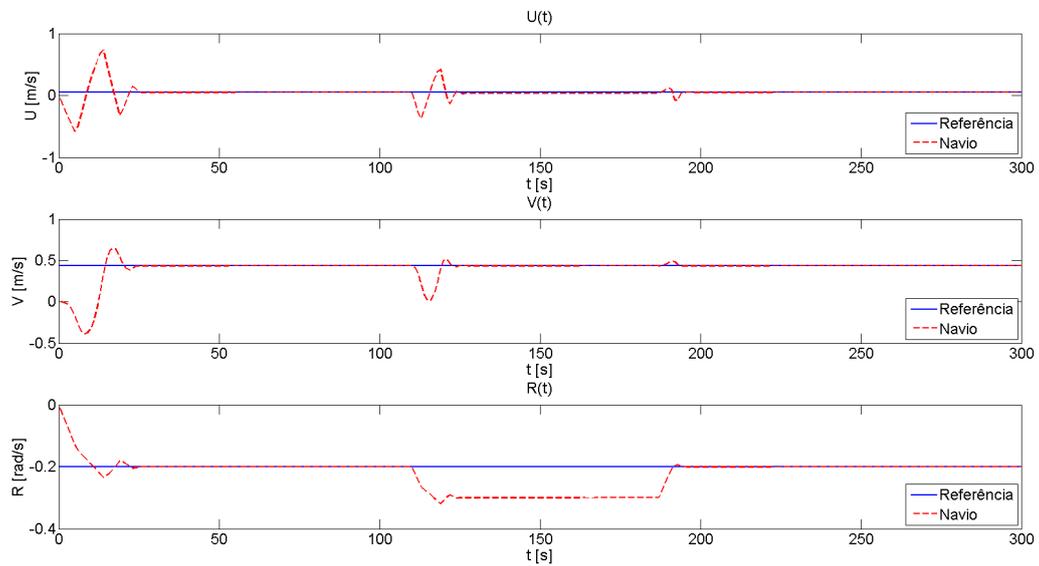


Figura 8.15: Trajetórias de velocidades sob efeito de perturbação degrau em guinada

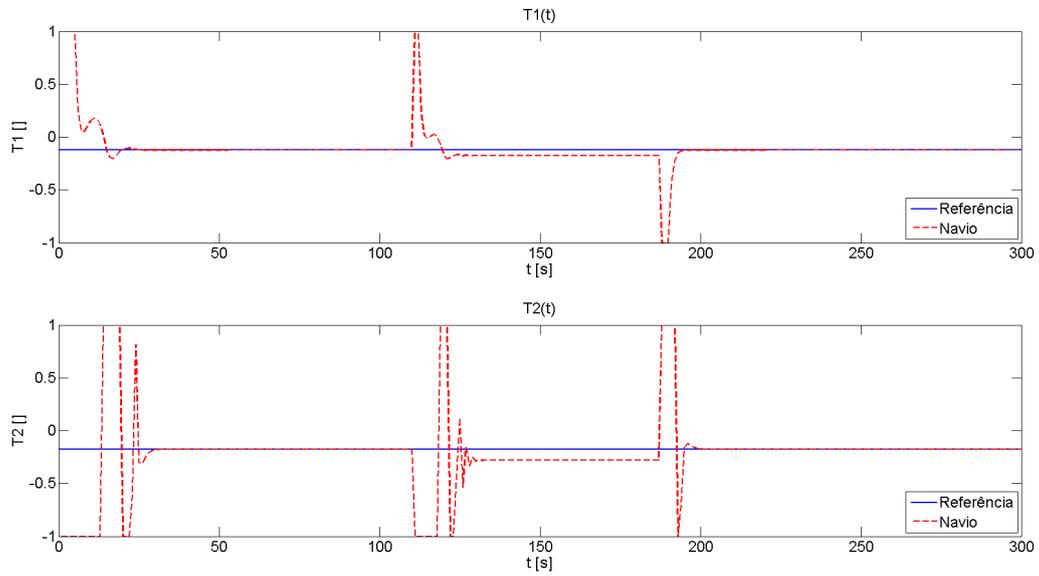


Figura 8.16: Acionamentos sob efeito de perturbação degrau em guinada

Tabela 8.1: Dados obtidos dos gráficos de perturbação

Atuação	Eixo	Sem perturbação	Com perturbação	Varição	Remanescente percentual (%)
Avanço	u	0,05	0,01499	-0,03501	-3,50
	v	0,4311	0,1608	-0,27030	-27,03
	r	-0,2	-0,2476	-0,04760	-4,76
Deriva	u	0,05	-0,06352	-0,11352	-11,35
	v	0,4331	-0,5247	-0,95780	-95,78
	r	-0,2	-0,1907	0,00930	0,93
Guinada	u	0,05	0,03352	-0,0164	-16,48
	v	0,4331	0,4354	0,00230	2,30
	r	-0,2	-0,3	-0,1000	-100

Capítulo 9

Conclusão

O presente documento trata da metodologia de identificação de um Veículo Remotamente Operado e o controle por planejamento e acompanhamento de trajetória utilizando os conceitos de planicidade diferencial. Para tanto, foram expostos fundamentos teóricos, simulações e detalhes de implementação a serem empregados no controle da plataforma *VideoRay 4 Pro*.

O Capítulo 2 apresenta histórico, características sobre Veículos Remotamente Operados e a motivação para se trabalhar com eles; o Capítulo 3 apresenta os modelos cinemático e dinâmico de um veículo subaquático; o Capítulo 4 discorre sobre sistemas diferencialmente planos e a elaboração de um controlador que utilize essa característica do sistema; o Capítulo 5 evidencia os procedimentos aplicados para a identificação da dinâmica da planta real; o Capítulo 6 explicita os cálculos empregados na lei de controle proposta; e nos Capítulos 7 e 8 constam os resultados obtidos nos processos de identificação do modelo e simulação do controle, respectivamente.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, observou-se que os parâmetros identificados podem não ser fisicamente possíveis, dado que a aplicação que resolve numericamente o problema de mínimos quadrados associado desconhece o significado físico das variáveis. Assim, é preciso verificar se os dados obtidos são coerentes com a realidade antes de dar prosseguimento às etapas seguintes.

Verificou-se que as discontinuidades dos sensores de deslocamentos angulares podem ser desastrosas para os processos de identificação. O mesmo ocorre para os dados de profundidade uma vez que o robô esteja na superfície da água, pois uma atuação vertical ascendente manifesta-se nas saídas como uma saturação no atuador.

Observou-se também que o aumento no número de parâmetros a identificar geralmente piorava a qualidade da identificação, por vezes fornecendo modelos instáveis como resultado. O uso dos dados de identificações anteriores contribuiu para a melhora das estimações.

Também verificou-se que, embora o formalismo das entradas planas permita que elas possuam um significado físico, isso nem sempre é possível. Para este trabalho, o navio de superfície possuía três variáveis de estado (avanço, deriva e guinada) e apenas duas entradas planas. Assim, pelo menos uma das entradas planas terá componentes de mais de uma variável de estado, tornando o controle acoplado. Isso justifica parte dos fenômenos vistos na inserção de perturbações: as variáveis de estado podem ter influências distintas sobre a lei de controle.

A fase de simulações da lei de controle evidenciou a limitação de tempo imposta pelo controlador. Por isso, é necessário que os coeficientes do controlador sejam calculados previamente, e depois, implementados no código do robô para que, em tempo de execução, seja necessário apenas acessar estruturas de dados simples, como vetores e matrizes.

Como próximos pontos de trabalho, tem-se em vista:

- Validação do modelo dinâmico do robô na planta real;
- Modelagem de ruídos dos sensores e refinamento do modelo do robô, com a consideração de arrasto quadrático e a inserção de termos cruzados nas matrizes de arrasto;
- Migração da lei de controle *flatness*, atualmente implementada em *Simulink*, para a linguagem C#, e sua posterior fusão com o programa de comando do veículo;
- Inserção de ação integral no controlador, para que ele seja capaz de rejeitar perturbações em degrau;
- Comparação de desempenho entre diferentes estratégias de controle.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Luis Antonio Aguirre. *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. Editora UFMG, terceira edition, 2007.
- [2] José Oniram de Aquino Limaverde Filho. Aplicação de controle não-linear para veículos marítimos e produção de petróleo. Master's thesis, Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia, 2014.
- [3] Eric Conrado de Souza. Modelagem e controle de veículos submarinos não tripulados. Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.
- [4] Khac Duc Do e Jie Pan. *Control of Ships and Underwater Vehicles - Design for Underactuated and Nonlinear Marine Systems*. Springer, 2009.
- [5] Marine Technology Society. *ROV, AUV and AUV/ROV Hybrid MANUFACTURERS, OPERATORS, SUBSYSTEMS and RELATED INDUSTRIES*. Disponível em: http://www.rov.org/industry_all.cfm Acesso em: 17/12/2015.
- [6] Marine Technology Society. *ROVs - A BRIEF HISTORY*, 2015. Disponível em: http://www.rov.org/rov_history.cfm Acesso em: 17/12/2015.
- [7] Marine Technology Society. *WHAT IS AN ROV?*. Disponível em: http://www.rov.org/rov_overview.cfm Acesso em: 17/12/2015.
- [8] Nathan Costa Alves Souza. Modelagem, navegação e localização de robô subaquático utilizando filtros não-paramétricos. Master's thesis, Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia, 2014.
- [9] VideoRay. *VideoRay PRO 4 Operator's Manual*, 2013. Disponível em: http://www.videoray.com/images/User_Manuals/pro_4_manual.pdf. Acesso em: 13/07/2015.
- [10] Videoray. *Developer Resources*. Disponível em: <http://download.videoray.com/developer/> Acesso em: 27/11/2015.