



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Vinicius Machado Barbas

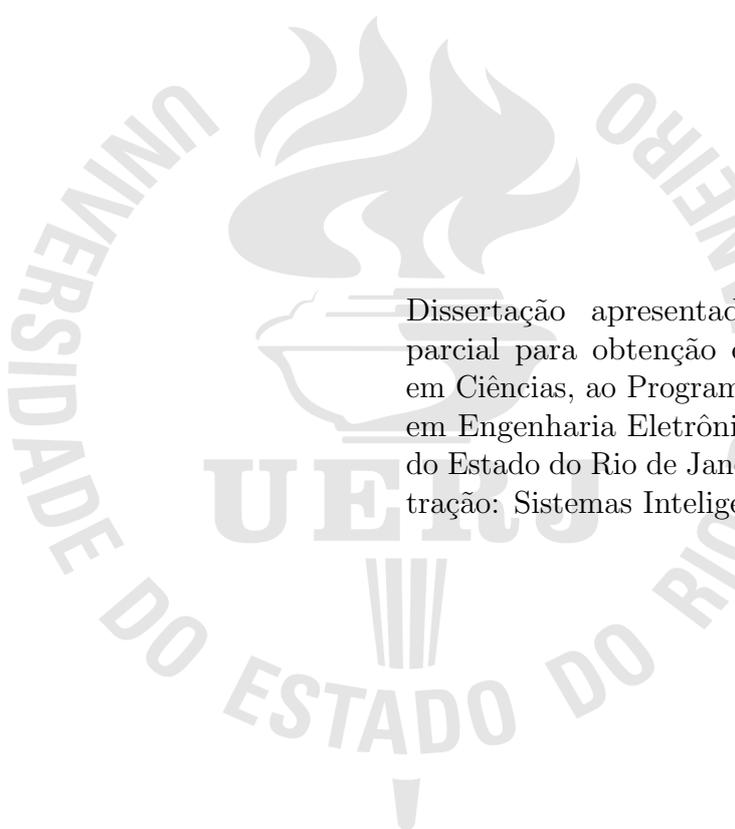
**Controle por Modo Deslizante Adaptativo Aplicado ao Rastreamento de
Trajetórias para uma Embarcação Sujeita a Perturbações Ambientais**

Rio de Janeiro

2021

Vinicius Machado Barbas

**Controle por Modo Deslizante Adaptativo Aplicado ao Rastreamento de Trajetórias
para uma Embarcação Sujeita a Perturbações Ambientais**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

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

Orientadora: Dr. Paula Bastos Garcia Rosa

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

B229

Barbas, Vinicius Machado

Controle por modo deslizante adaptativo aplicado ao rastreamento de trajetórias para uma embarcação sujeita a perturbações ambientais / Vinicius Machado Barbas. – 2021.

128f.

Orientadores: José Paulo Vilela Soares da Cunha, Paula Bastos Garcia Rosa

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Sistemas de controle ajustável - Teses. 3. Sistemas não-lineares - Teses. 4. Controladores PID - Teses. I. Cunha, José Paulo Vilela Soares da. II. Rosa, Paula Bastos Garcia. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título..

CDU 681.516.3

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Vinicius Machado Barbas

**Controle por Modo Deslizante Adaptativo Aplicado ao Rastreamento de Trajetórias
para uma Embarcação Sujeita a Perturbações Ambientais**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Aprovado em: 11 de Novembro de 2021

Banca Examinadora:

Prof. José Paulo Vilela Soares da Cunha, D. Sc. (Orientador)
Faculdade de Engenharia da UERJ

Paula Bastos Garcia Rosa, D. Sc. (Orientadora)
SINTEF Energy Research

Prof. Tiago Roux de Oliveira, D. Sc.
Faculdade de Engenharia da UERJ

Ramon Romankevicius Costa, D. Sc.
Programa de Engenharia Elétrica - COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro

2021

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Jorge e Iracema, por todo esforço e apoio em minha trajetória para conseguir chegar até aqui.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiro a Deus, que proporcionou essa realização.

Segundo, aos meus pais e também meus heróis, Jorge e Iracema, pelo amor e dedicação para que eu pudesse estudar e chegar aqui.

Terceiro, a minha falecida avó, Dulce, pelo amor e dedicação durante a minha criação me apoiando, ensinando e amando, para que eu pudesse estudar e ser uma pessoa correta.

Quarto, aos meus irmão Davi e Luiz Claudio, que me ajudaram em meus projetos e pela amizade de ambos.

Quinto, aos meus professor e orientador José Paulo e minha orientadora Paula. Obrigado pela confiança, mesmo quando já estava a ponto de desistir.

Sexto, aos meus amigos de classe, Daniel, Wilton, Rodrigo, Aline, Wallace e José. Passamos muitas dificuldades nos estudos, mas também muitos momentos de alegria.

Sétimo, aos meus amigos do Mauá e da UFF, Raphael, Leandro, Marcelo, Aline, Amanda, Tatiane, Sheila, Arthur, Jorge, que mesmo após tantos anos continuam fazendo parte da minha vida.

Oitavo, a Lais que durante estes dois anos de pandemia esteve comigo acompanhando minha batalha me dando forças para conseguir terminar.

E por fim, a todos que, diretamente ou indiretamente, participaram da minha vida durante este caminho, obrigado.

O mundo não é um mar de rosas; é um lugar sujo, um lugar cruel, que não quer saber o quanto você é durão. Vai botar você de joelhos e você vai ficar de joelhos para sempre se você deixar. Você, eu, ninguém vai bater tão forte como a vida, mas não se trata de bater forte. Se trata de quanto você aguenta apanhar e seguir em frente, o quanto você é capaz de aguentar e continuar tentando. É assim que se consegue vencer. Agora se você sabe do teu valor, então vá atrás do que você merece, mas tem que estar preparado para apanhar. E nada de apontar dedos, dizer que você não consegue por causa dele ou dela, ou de quem quer que seja. Só covardes fazem isso e você não é covarde, você é melhor que isso. (Rocky Balboa, 2006)

RESUMO

BARBAS, Vinicius Machado. *Controle por Modo Deslizante Adaptativo Aplicado ao Rastreamento de Trajetórias para uma Embarcação Sujeita a Perturbações Ambientais*. 2021, 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro.

Esta Dissertação aborda o problema de controle de uma embarcação marítima de superfície considerando-se o posicionamento dinâmico da mesma com rastreamento de trajetória predeterminada sujeita a perturbações ambientais desconhecidas. O modelo dinâmico do sistema e suas propriedades são desenvolvidos para permitir o projeto do controle. Como a dinâmica da embarcação é não-linear, foi implementado um controle de linearização por realimentação para o cancelamento das não-linearidades e facilitar a aplicação dos controladores. Foram considerados quatro tipos de controles para o rastreamento de trajetória. O primeiro controlador considerado foi o Proporcional-Derivativo (PD), por ser um controlador muito utilizado e de fácil implementação. O segundo controlador considerado foi o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) que, assim como o PD, é de fácil implementação e conta com uma ação integral para mitigar o erro residual que se apresenta no controlador PD. O terceiro controlador considerado é uma variação do Controlador por Modo Deslizante (SMC). A vantagem em relação aos outros controladores apresentados anteriormente é que o controle por modo deslizante é superior em relação a rejeição de perturbações, robustez a variação de parâmetros e tem uma implementação simples. Foi implementado o SMC Vetorial Unitário (UVC) que é conveniente para sistemas multivariáveis como é o caso analisado. A dificuldade deste controle é a necessidade do conhecimento de um majorante da perturbação ou estipulá-la de forma conservadora no projeto do controle. O quarto controlador e contribuição desta Dissertação, é o Controle por Modos Deslizantes Adaptativo (SMC Adaptativo). Este realiza o rastreamento de trajetória da embarcação sem a necessidade de conhecimento da amplitude das perturbações ambientais, onde há adaptação a partir do controle equivalente utilizando um filtro de média que estima as perturbações a partir de componentes de baixa frequência do sinal de controle. Em seguida são feitas simulações das perturbações e dos controladores para o rastreamento de trajetória apresentados nesta Dissertação para

possibilita sua comparação.

Palavras-chave: Embarcação de superfície. Rastreamento de trajetória. Controle por modo deslizante. Controle adaptativo. Linearização por realimentação.

ABSTRACT

BARBAS, Vinicius Machado. *Adaptive Sliding Mode Control Applied to Trajectory Tracking for a Vessel Subject to Environmental Disturbances*. 2021, 83 f. Thesis (Master Degree in Electronic Engineering) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro.

This dissertation considers the trajectory control problem of a surface marine vessel for its dynamic positioning with the tracking of a prespecified trajectory under the action of unknown environmental disturbances. The dynamic model of the system and its properties are developed to allow the control design. The vessel dynamics is nonlinear, thus, feedback linearization was implemented to remove nonlinearities and facilitate the application of controllers. Four controls for trajectory tracking have been considered. The first controller was the Proportional-Derivative (PD), that is a widely used controller and is of easy implementation. The second controller was the Proportional-Integral-Derivative (PID) controller which is also easy to implement and has an integral action that mitigates the residual error present in the PD controller. The third is a Sliding Mode Control (SMC). An advantage over previous controllers is that the SMC is superior in relation to disturbance rejection, is robust to parameter variation and has a simple implementation. The Unit Vector SMC (UVC) was implemented, which is convenient for multivariable systems. The fourth controller is an Adaptive SMC. It allows trajectory tracking without the knowledge of the amplitude of environmental disturbances. Using the equivalent approximated averaging filters allows the disturbances to be estimated from low-frequency components of the control signal. Simulations of the disturbances and controllers for trajectory tracking presented in this Dissertation allow a fair comparison of these strategies.

Keywords: Surface vessel. Trajectory tracking. Sliding-mode control. Adaptive control. Feedback linearization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Movimento em seis graus de liberdade. Extraído de (FOSSEN, 2011, Figura 2)	23
Figura 2 Vista superior da embarcação. Coordenadas fixas e dinâmicas.	27
Figura 3 Velocidade do vento V_w , direção do vento β_w e ângulo de ataque do vento γ_w relativo a proa da embarcação. (FOSSEN, 2011, Figura 8.1).....	38
Figura 4 Força induzida da onda como produto de duas funções de transferência. (FOSSEN, 2011, Figura 8.13).....	43
Figura 5 Diagrama de blocos do sistema.	46
Figura 6 Trajetória de referência.	47
Figura 7 Ângulo de rumo de referência.	49
Figura 8 Ângulo de rumo de referência após filtro.	49
Figura 9 Sinal de referência x_{ref}^e	50
Figura 10 Sinal de referência y_{ref}^e	50
Figura 11 Diagrama de blocos da Linearização por Realimentação.	51
Figura 12 Diagrama de blocos do controle PD.....	54
Figura 13 Diagrama de blocos do controle PID.....	55
Figura 14 Diagrama de blocos do controle UVC.....	59
Figura 15 Diagrama de blocos do controle por modo deslizante adaptativo.	65
Figura 16 Comportamento das forças da correnteza a partir do modelo 1 da Tabela 4.	68
Figura 17 Comportamento das forças da correnteza a partir do modelo 2 da Tabela 4.	69
Figura 18 Comportamento das forças da correnteza a partir do modelo 3 da Tabela 4.	69
Figura 19 Comportamento das forças da onda de baixa frequência para um mar moderado.....	70
Figura 20 Comportamento das forças da onda de alta frequência para um mar moderado.....	71
Figura 21 Comportamento da resultante das forças das ondas para um mar moderado.	71
Figura 22 Comportamento das forças da onda de baixa frequência para um mar bravo.	72
Figura 23 Comportamento das forças da onda de alta frequência para um mar bravo.	72
Figura 24 Comportamento da resultante das forças das ondas para um mar bravo....	73

Figura 25 Comportamento das forças da onda de baixa frequência para um mar muito bravo.	73
Figura 26 Comportamento das forças da onda de alta frequência para um mar muito bravo.	74
Figura 27 Comportamento da resultante das forças das ondas para um mar muito bravo.	74
Figura 28 Comportamento da resultante da brisa forte.	75
Figura 29 Comportamento da resultante vendaval moderado.	76
Figura 30 Comportamento da resultante vendaval forte.	76
Figura 31 Forças resultantes das perturbações ambientais.	78
Figura 32 Resultados de simulação com controle PD: (a) trajetória, (b) ângulo de rumo e (c) forças geradas pelos propulsores.	79
Figura 33 Resultados de simulação com controle PID: (a) trajetória, (b) ângulo de rumo e (c) forças geradas pelos propulsores.	81
Figura 34 Resultados de simulação com Controle Vetorial Unitário : (a) trajetória, (b) ângulo de rumo e (c) forças geradas pelos propulsores.	82
Figura 35 Resultados de simulação com o controle por modo deslizante adaptativo: (a) trajetória, (b) ângulo de rumo e (c) forças geradas pelos propulsores. ...	83
Figura 36 Sinal de modulação adaptativo.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Notação da embarcação (SNAME, 1950)	24
Tabela 2	Parâmetros do Vento (FOSSEN, 2011, Tabela 4.3)	40
Tabela 3	Probabilidade no mar (FOSSEN, 2011, Tabela 8.5)	44
Tabela 4	Modelos da correnteza	68
Tabela 5	Características do <i>supply vessel</i>	77
Tabela 6	Valores máximos dos erros do rastreamento de trajetória para $t > 100s$	85

LISTA DE SIGLAS

DOF	<i>Grau de liberdade (Degree of freedom)</i>
BODY	<i>Sistema de coordenadas fixas do barco</i>
NED	<i>Sistema de coordenadas relativas a superfície da Terra</i>
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
ITTC	<i>International Towing Tank Conference</i>
PD	<i>Controle Proporcional-Derivativo</i>
PID	<i>Controle Proporcional-Integral-Derivativo</i>
USV	<i>Embarcação de superfície não tripulada (Unmanned surface vessel)</i>
UVC	<i>Controle Vetorial Unitário (Unit vector control)</i>
SMC	<i>Controle por Modo Deslizante (Sliding Mode Control)</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

X	<i>Força no eixo x</i>
Y	<i>Força no eixo y</i>
Z	<i>Força no eixo z</i>
K	<i>Momento no eixo x</i>
M	<i>Momento no eixo y</i>
N	<i>Momento no eixo z</i>
u	<i>Velocidade linear em relação ao x</i>
v	<i>Velocidade linear em relação ao y</i>
w	<i>Velocidade linear em relação ao z</i>
p	<i>Velocidade angular em relação ao x</i>
q	<i>Velocidade angular em relação ao y</i>
r	<i>Velocidade angular em relação ao z</i>
x	<i>Posição no eixo x</i>
y	<i>Posição no eixo y</i>
z	<i>Posição no eixo z</i>
ϕ	<i>Posição angular no eixo x</i>
Θ	<i>Posição angular no eixo y</i>
ψ	<i>Posição angular no eixo z</i>
M	<i>Matriz de inércia e massas adicionais</i>
$C(\nu)$	<i>Matriz de coriolis-centrípeta</i>
$D(\nu)$	<i>Matriz de arraste</i>
v	<i>Vetor velocidade generalizada no sistema de coordenadas móveis</i>
$g(\eta)$	<i>Vetor de forças gravitacionais generalizadas e empuxo</i>
τ	<i>Vetor da força generalizada gerada pelos propulsores</i>
η	<i>Vetor de posição generalizada</i>
ω	<i>Vetor de perturbações ambientais</i>
x_e, y_e, z_e	<i>Sistema de coordenada estacionária</i>
x_b, y_b, z_b	<i>Sistema de coordenadas da embarcação</i>

v_b^e	<i>Velocidade linear da origem</i>
O_b	<i>Representada no sistema de coordenadas estacionário</i>
ω_b^e	<i>Velocidade angular do sistema de coordenadas do barco representada no sistema de coordenadas estacionário</i>
p_b^e	<i>Posição da embarcação no sistema de coordenadas estacionário</i>
Θ_b	<i>Ângulos de Euler</i>
v_b^b	<i>Velocidade linear</i>
ω_b^b	<i>Velocidade angular</i>
f_b^b	<i>Forças</i>
m_b^b	<i>Momentos</i>
O_e	<i>Origem do sistema de coordenadas estacionário</i>
O_b	<i>Origem do sistema de coordenadas do barco</i>
I	<i>Momento de inércia</i>
M_A	<i>Matriz de inércia das massas adicionais</i>
M_A^T	<i>Matriz transposta de inércia das massas adicionais</i>
M_{RB}	<i>Matriz de inércia do corpo rígido</i>
M_{RB}^T	<i>Matriz transposta de inércia do corpo rígido</i>
\dot{M}_{RB}	<i>Derivada da matriz de inércia do corpo rígido</i>
m	<i>Massa da embarcação</i>
$r_g^b = x_g, y_g, z_g$	<i>Posição do centro de gravidade da embarcação no sistema de coordenadas BODY</i>
I_z	<i>Momento de inércia sobre o eixo z</i>
\dot{u}	<i>Aceleração no eixo x</i>
U	<i>Módulo da velocidade linear da embarcação</i>
$C_{RB}(\nu)$	<i>Matriz de Coriolis-Centrípeta do corpo rígido</i>
$C_A(\nu)$	<i>Matriz de Coriolis-Centrípeta das massas adicionais</i>
$C^T(\nu)$	<i>Matriz transposta de coriolis-centrípeta</i>
D	<i>Matriz de arraste linear devido ao potencial de arraste e possíveis atritos no casco</i>
$D_n(\nu_r)$	<i>Matriz não linear de arraste devido ao arraste quadrático e os termos de ordem superior</i>

V_r	<i>Velocidade relativa do vento</i>
γ_r	<i>Ângulo relativo</i>
u_r	<i>Velocidade relativa da embarcação no eixo x</i>
v_r	<i>Velocidade relativa da embarcação no eixo y</i>
ψ_ω	<i>Direção do vento</i>
C_X e C_Y	<i>Coefficiêntes de força</i>
C_N	<i>Coefficiente de momento</i>
ρ_a	<i>Densidade do ar</i>
A_T	<i>Área projetada transversal</i>
A_L	<i>Área projetada lateral</i>
L	<i>Comprimento da embarcação</i>
B	<i>Boca</i>
A_L	<i>Área projetada lateral</i>
A_T	<i>Área projetada transversal</i>
A_{SS}	<i>Área projetada lateral da superestrutura</i>
S	<i>Perímetro lateral sobre a água</i>
C	<i>Distância do mastro ao contróide da área lateral projetada</i>
M	<i>Número de mastros da embarcação</i>
α_c	<i>Ângulo de ataque</i>
β_c	<i>Ângulo de derrapagem</i>
μ, d_n	<i>Constante</i>
u_c^b	<i>Velocidade da correnteza no eixo x do sistema de coordenadas do barco</i>
v_c^b	<i>Velocidade da correnteza no eixo y do sistema de coordenadas do barco</i>
R	<i>Raio da circunferência</i>
u_d	<i>Velocidade linear</i>
l	<i>Comprimento da trajetória retilínea</i>
t	<i>Tempo</i>
x_{ref}	<i>Trajatória de referência no eixo x</i>
y_{ref}	<i>Trajatória de referência no eixo y</i>
ψ_{ref}	<i>Ângulo de rumo de referência</i>

a^b	<i>Aceleração no sistema de coordenadas do barco</i>
a^e	<i>Aceleração no sistema de coordenadas estacionário</i>
K_p	<i>Ganho proporcional</i>
K_d	<i>Ganho derivativo</i>
K_i	<i>Ganho integral</i>
$e(t)$	<i>Erro</i>
I	<i>Matriz identidade</i>
σ	<i>Superfície deslizante</i>
$\rho(t)$	<i>Função de modulação</i>
c_f	<i>Ganho de alta frequência</i>
γ_f	<i>Fator de esquecimento</i>
$U_{x_{eq}}$	<i>Controle equivalente estendido</i>
U_{eq}	<i>Controle equivalente</i>
U_{av}	<i>Controle médio</i>

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	19
1	MODELAGEM DINÂMICA DA EMBARCAÇÃO	23
1.1	DINÂMICA DE UMA EMBARCAÇÃO DE SUPERFÍCIE.....	23
1.2	COORDENADAS DE REFERÊNCIA	25
1.3	NOTAÇÃO VETORIAL	25
1.4	SIMPLIFICAÇÃO PARA TRÊS GRAUS DE LIBERDADE	26
1.5	MATRIZ DE INÉRCIA E MASSAS ADICIONAIS.....	27
1.5.1	MATRIZ DE INÉRCIA	28
1.5.2	MATRIZ DE INÉRCIA DE MASSAS ADICIONAIS.....	29
1.6	MATRIZ DE CORIOLIS-CENTRÍPETA.....	30
1.7	MATRIZ DE ARRASTE.....	31
1.8	MODELO DOS PROPULSORES	33
2	PERTURBAÇÕES AMBIENTAIS	35
2.1	VENTO.....	35
2.2	ONDAS	39
2.3	CORRENTES OCEÂNICAS	43
3	ESTRATÉGIAS CONVENCIONAIS DE RASTREAMENTO DE TRA- JETÓRIA PARA EMBARCAÇÕES	46
3.1	TRAJETÓRIA	46
3.2	PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA	46
3.3	LINEARIZAÇÃO POR REALIMENTAÇÃO	51
3.4	CONTROLADOR PD.....	52
3.5	CONTROLADOR PID	54
4	RASTREAMENTO DE TRAJETÓRIA COM CONTROLE POR MODO DESLIZANTE	56
4.1	CONTROLE VETORIAL UNITÁRIO.....	58
4.1.1	ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....	59
4.2	CONTROLE POR MODO DESLIZANTE ADAPTATIVO	61

4.2.1	CONTROLE EQUIVALENTE	61
4.2.2	LEI ADAPTATIVA	63
4.2.3	ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....	64
5	RESULTADOS DE SIMULAÇÕES	67
5.1	SIMULAÇÃO DAS PERTURBAÇÕES AMBIENTAIS	67
5.1.1	CORRENTEZA.....	67
5.1.2	ONDAS	67
5.1.3	VENTO.....	70
5.1.4	SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....	75
	CONCLUSÃO	86
6	CONCLUSÃO	86
	REFERÊNCIAS	88

INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos nas indústrias, a robótica passou a ter um lugar de destaque cada vez maior na produção e controle de processos. Com a utilização de robôs para tarefas mais complexas, houve a necessidade de controles robustos e novas técnicas para um controle e rastreamento mais exato de seus movimentos. Estas técnicas desenvolvidas são aplicadas também a outros sistemas que não apenas na robótica industrial mas também na medicina e veículos terrestres, aéreos e marítimos.

Com a pandemia do COVID-19, houve um aumento no interesse sobre veículos autônomos por causa da necessidade do distanciamento social, o que fomentou ainda mais o desenvolvimento de tecnologias para controle e rastreamento de trajetórias para veículos de passeios (IBRAHIM et al., 2020), caminhões e veículos agrícolas (ORT; PAULL; RUS, 2018).

Outra área de grande interesse e pesquisas é a de controle de embarcações e rastreamento de trajetórias. A possibilidade de uso de embarcações de superfície não tripuladas (*unmanned surface vessels* — USVs) para limpeza de rios, transporte de passageiros (MATEOS et al., 2019), pesquisas no setor petrolífero, transporte de carga entre outras atividades tem grande valor para o desenvolvimento das cidades e empresas. Em Amsterdã, por exemplo, está sendo testado uma embarcação movida a eletricidade para transporte de passageiros por seus antigos canais enquanto o lixo flutuante é recolhido (STERLING; WOUW, 2021).

Neste trabalho, é estudado o rastreamento de trajetória de uma embarcação sujeita a perturbações ambientais. Há algum tempo, o controle de posição e orientação de embarcações de superfície não tripuladas, com ou sem perturbações, é abordado em diversos trabalhos (TAKAHASHI; NAKAURA; SAMPEI, 2007). Considerando a complexidade das perturbações ambientais, evitar a influência de falhas e perturbações externas para completar a tarefa de forma perfeita se tornou um problema comum para o USV na engenharia (WANG; WANG; FU, 2018). Muitos modelos da dinâmica de embarcações com posicionamento dinâmico são desenvolvidos sob o pressuposto de baixa velocidade. Estes são válidos apenas para a manutenção da posição e pequenas manobras.

Entretanto, na prática as embarcações são operadas onde há a necessidade de controle para o rastreamento de trajetórias, não apenas para mantê-las estacionárias em

posicionamento dinâmico.

O desenvolvimento de controladores para o rastreamento de trajetórias precisa considerar fenômenos dinâmicos não-lineares que são muito significativos durante o movimento da embarcação. Park, Kwon e Kim (2017) apresentaram um controle adaptativo utilizando redes neurais juntamente com controle por realimentação para rastreamento de trajetória de USV sem o conhecimento da massa da embarcação e do arraste, e sob influência de perturbações desconhecidas. Park (2017) apresentou um método de controle por realimentação da saída para rastreamento de embarcações subatuadas com saturações do atuador. Um outro tipo de controle foi apresentado por Yin e Xiao (2016), que utilizou um controlador baseado em *backstepping* para o rastreamento de trajetória e em seguida utilizou uma versão adaptativa para superar as perturbações e incertezas. Cabecinhas e Silvestre (2019) apresentaram o rastreamento de trajetória com um controle não-linear aplicando a técnica *backstepping*. Wang, Liu e Li (2015) apresentaram um piloto automático não-linear adaptativo. Wang et al. (2018) apresentaram um controle preditivo não-linear em tempo real. Cheng, Yi e Zhao (2007) utilizaram um controle por modo deslizante convencional para o rastreamento de trajetória para uma embarcação sem perturbações ambientais. Gonzalez-Garcia e Castañeda (2021) propuseram um controle adaptativo baseado em modo deslizante sujeito a incertezas e perturbações limitadas. O mesmo foi experimentado em um USV para um teste de rastreamento de trajetória buscando a velocidade de pico da embarcação controlando o rumo da mesma.

Nesta Dissertação, será aplicada a linearização por realimentação (SLOTINE; LI, 1991, Capítulo 6) para o cancelamento das não-linearidades da dinâmica da embarcação. Esta técnica é muito utilizada para anular não-linearidades da dinâmica da embarcação e com isso facilitar a aplicação de diversas técnicas de controle, por exemplo, a realimentação de estado linear, que neste caso equivale ao controle com ações proporcional e derivativa (PD) (FOSSEN, 2002, Capítulo 7). Nesta Dissertação, serão apresentadas e aplicadas perturbações ambientais mais comuns encontradas nos oceanos, rios e lagos (FOSSEN, 2011). Serão descritas e simuladas as perturbações do vento que de forma resumida é o movimento relativo do ar na superfície, das ondas que são formadas a partir de forças externas como o vento e as marés, e as correntezas oceânicas que são um sistema de circulação de água a partir de forças verticais e horizontais. Estas perturbações tendem a influenciar de forma contundente no rastreamento de trajetória de embarcações, pois dependendo do

modelo da embarcação, uma pode influenciar mais que outra. Um barco a velas tende a ter mais interesse na força do vento do que das ondas, já uma embarcação submersível não sofre tanto com a influência das ondas ou o vento mas com das correntezas oceânicas. Poucos trabalhos desenvolvem e avaliam detalhadamente os efeitos das perturbações ambientais no controle de embarcações. Para o controle e rastreamento de trajetória da embarcação, são considerados controles convencionais (PD e PID), um controle por modo deslizante e uma adaptação para perturbações oscilatórias e desconhecidas. Inicialmente são aplicados os controles PD e PID para o rastreamento da trajetória da embarcação. Estes controles são bem difundidos na literatura. Fang, Lin e Wang (2012), por exemplo, aplicaram o controle PD juntamente com algoritmos de rede neural com auto-ajustes para reduzir o erro do rastreamento. Já em Fang, Zhuo e Lee (2010) foi apresentado um controlador PID juntamente com redes neurais para o auto-ajuste dos parâmetros para evitar o movimento de rotação da embarcação devido às forças das ondas. Em seguida, foi desenvolvido o controle por modo deslizante. Como a dinâmica da embarcação é um sistema multivariável, uma modificação no controle para o controle Vetorial Unitário é mais adequado. Para rejeitar os efeitos de perturbações ambientais variantes no tempo, aqui se utiliza o controle por modo deslizante baseado no controle vetorial unitário (EDWARDS; SPURGEON, 1998). O problema desse controle é a necessidade de conhecer a amplitude da perturbação, uma escolha conservadora que pode levar a um gasto desnecessário de energia. Então, para aumentar a eficiência do controle por modo deslizante, é desenvolvida uma versão adaptativa da sua função de modulação, que estabelece a amplitude do sinal de controle. A estratégia é baseada no controle equivalente estendido, porém este não é um sinal disponível, por isto serão utilizados filtros para estimar a partir da componente de baixa frequência do sinal de controle (OLIVEIRA; CUNHA; HSU, 2016) a amplitude da perturbação. Desta forma, apesar das perturbações ambientais serem oscilatórias com variações nas suas amplitudes, não há a necessidade de conhecimento prévio da magnitude de sua amplitude, pois o controle se adapta de acordo com a necessidade fazendo com que o rastreamento da trajetória seja feito de forma correta. Isto permite a redução de efeitos indesejáveis que decorreriam de sinais de controle exageradamente grandes, tais como alto consumo de energia, desgaste dos atuadores e o fenômeno “*chattering*”(UTKIN; GULDNER; SHI, 1999) presente em controle por modo deslizante.

Este tema foi apresentado em um artigo no Simpósio Brasileiro de Automação

inteligente (SBAI 2021) (BARBAS; CUNHA; GARCIA-ROSA, 2021).

OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é propor um controle por modo deslizante adaptativo, para o rastreamento da trajetória de uma embarcação sujeita a perturbações ambientais com amplitudes desconhecidas.

ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O **Capítulo 1** apresenta de forma breve a modelagem de embarcações marítimas de superfície já existente na literatura.

O **Capítulo 2** apresenta os tipos mais comuns de perturbações ambientais encontradas no oceano.

No **Capítulo 3** é desenvolvida a teoria de rastreamento de trajetória parametrizada no tempo para embarcações. Ao final do capítulo, é apresentado o controle de linearização por realimentação e estratégias de controle convencionais como PD e PID.

No **Capítulo 4** são apresentados os controles baseados em modos deslizantes. São apresentados o controle vetorial unitário e a maior contribuição deste trabalho, o controle por modos deslizantes adaptativo.

No **Capítulo 5** é apresentado o resultado de simulações tanto das perturbações quanto dos controladores e um comparativo entre eles é realizado.

O trabalho é finalizado com a conclusão, na qual são destacadas as contribuições e sugestões para trabalhos futuros.

1 MODELAGEM DINÂMICA DA EMBARCAÇÃO

O estudo da dinâmica de embarcações pode ser dividida em duas partes, a parte cinemática e a parte dinâmica. Na parte cinemática apenas aspectos geométricos do movimento são considerados (FOSSSEN, 2002, Cap. 2), já a dinâmica trata do comportamento estático da embarcação e do movimento diante de perturbações.

1.1 DINÂMICA DE UMA EMBARCAÇÃO DE SUPERFÍCIE

O modelo clássico de uma embarcação é complexo e seus coeficientes são difíceis de determinar com precisão (FOSSSEN, 2002). Uma forma de simplificar esse modelo, para o projeto de sistemas de controle avançado, é utilizar as propriedades do modelo físico da embarcação. Uma embarcação está exposta ao vento, ondas e correntezas e seu movimento ocorre em seis graus de liberdade (*degrees of freedom* - DOF).

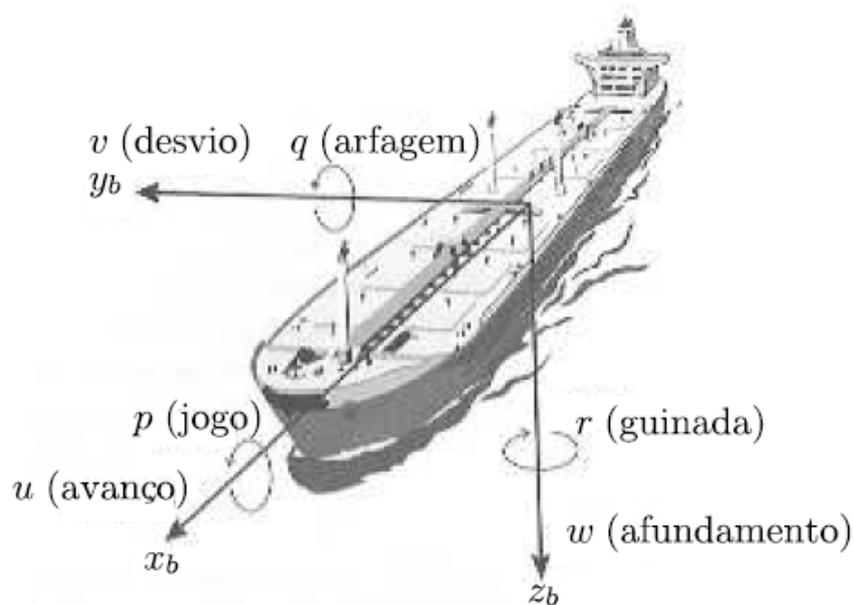


Figura 1: Movimento em seis graus de liberdade. Extraído de (FOSSSEN, 2011, Figura 2)

Na Tabela 1 são apresentadas as notações de força, momento, velocidade, posição e ângulos de uma embarcação (SNAME, 1950).

As equações da dinâmica da embarcação podem ser derivadas usando as equações de *Newton-Euler* ou *Lagrange* e são representadas da seguinte forma (FOSSSEN, 2002, Capítulo 2):

Tabela 1: Notação da embarcação (SNAME, 1950)

DOF		Forças e momentos	Velocidade angular e linear	Posição e ângulos de Euler
1	Movimento no eixo x (avanço)	X	u	x
2	Movimento no eixo y (desvio)	Y	v	y
3	Movimento no eixo z (afundamento)	Z	w	z
4	Rotação sob o eixo x (jogo)	K	p	ϕ
5	Rotação sob o eixo y (arfagem)	M	q	θ
6	Rotação sob o eixo z (guinada)	N	r	ψ

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + g_0 + \mathbf{w} \quad (1.1)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (1.2)$$

onde:

M é a matriz de inércia e massas adicionais;

$C(v)$ é a matriz de Coriolis-centrípetas;

$D(v)$ é a matriz de arraste;

$v := [u, v, w, p, q, r]^T$ é o vetor da velocidade generalizada representado no sistema de coordenadas móveis;

$g(\eta)$ é o vetor de forças gravitacionais generalizadas e de empuxo;

$g(0)$ é o vetor de forças gravitacionais generalizadas e de empuxo inicial;

$\tau := [X, Y, Z, K, M, N]^T$ é o vetor da força generalizada gerada pelos propulsores;

$\eta := [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ é o vetor de posição generalizada, no qual x e y são as coordenadas da origem O_b representadas no sistema estacionário;

\mathbf{w} são forças e momento das perturbações ambientais;

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

Para uma embarcação como a apresentada na Figura 1 são necessárias seis coordenadas independentes para determinar sua posição e orientação. As três primeiras apresentadas na Tabela 1 são referentes às suas três coordenadas e suas derivadas, correspondendo a posição e movimento de translação ao longo dos eixos x_b, y_b, z_b . Já as três últimas

coordenadas e suas derivadas são utilizadas para descrever orientação e rotação (FOSSEN, 2002).

1.2 COORDENADAS DE REFERÊNCIA

Para descrever e analisar o movimento de uma embarcação com seis DOF, mais do que uma coordenada precisa ser definida (BARSLETT; LONGVA; NYGARD, 2018). Dentre as mais importantes estão as coordenadas com referencial no barco (BODY) e as coordenadas com referencial na superfície (NED).

North-East-Down (NED) - É o sistema de coordenadas relativas a superfície da Terra. Esta é a coordenada utilizada no dia a dia, onde o eixo x representa o Norte, o eixo y representa o Leste e o eixo z representa Profundidade. Estas são representadas pelo eixos x^e , y^e e z^e respectivamente.

BODY - É um sistema de coordenadas fixas do barco. Onde são representadas por x_b , y_b e z_b com a origem normalmente localizada no centro de gravidade da embarcação.

1.3 NOTAÇÃO VETORIAL

A notação a seguir será adotada para representar a velocidade linear e angular em alguns sistemas de coordenadas (FOSSEN, 2002, Capítulo 2.1).

v_b^e = Velocidade linear da origem O_b representada no sistema de coordenadas estacionário;

ω_b^e = Velocidade angular do sistema de coordenadas do barco representada no sistema de coordenadas estacionário;

Desta forma, as diferentes grandezas apresentadas na Tabela 1 podem ser expressas da seguinte forma (ROSARIO, 2017):

$$p_b^e = \begin{bmatrix} x_b^e \\ y_b^e \\ z_b^e \end{bmatrix}; \Theta_b = \begin{bmatrix} \phi_b \\ \theta_b \\ \psi_b \end{bmatrix}; v_b^b = \begin{bmatrix} u \\ v \\ \omega \end{bmatrix}; \omega_b^b = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}; f_b^b = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}; m_b^b = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix}; \quad (1.3)$$

onde:

p_b^e é a posição da embarcação no sistema de coordenadas estacionário;

Θ_b são os ângulos de Euler;

v_b^b é a velocidade linear;

ω_b^b é a velocidade angular;

f_b^b são as forças;

m_b^b são os momentos;

Logo, o movimento de uma embarcação com seis DOF pode ser descrito pelos seguintes vetores (FOSSEN, 2002, Capítulo 2.1):

$$\eta = \begin{bmatrix} p^e \\ \Theta \end{bmatrix}; \nu = \begin{bmatrix} v_b^b \\ \omega_b^b \end{bmatrix}; \tau = \begin{bmatrix} f_b^b \\ m_b^b \end{bmatrix}; \quad (1.4)$$

onde

η representa as posições linear e angular, respectivamente;

ν representa as velocidades lineares e angulares, respectivamente;

τ representa as forças e momentos, respectivamente.

1.4 SIMPLIFICAÇÃO PARA TRÊS GRAUS DE LIBERDADE

Uma simplificação frequentemente usada é a representação do movimento em apenas três graus de liberdade (avanço, desvio e guinada). Esta aproximação assume que ϕ e θ são muito pequenos. Pode-se considerar que o balanço e o movimento vertical são desprezíveis, o que é uma boa aproximação para a maioria dos navios convencionais, veículos submarinos e plataformas (FOSSEN, 2002).

Fazendo as substituições indicadas, a equação (1.2) se torna:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v. \quad (1.5)$$

A transformação de coordenadas do sistema móvel para o sistema de coordenadas estacionário é realizada pela matriz Jacobiana (FEEMSTER; ESPOSITO, 2011):

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \text{sen} \psi & 0 \\ -\text{sen} \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) + g(0) = \tau + \mathbf{w} \quad (1.7)$$

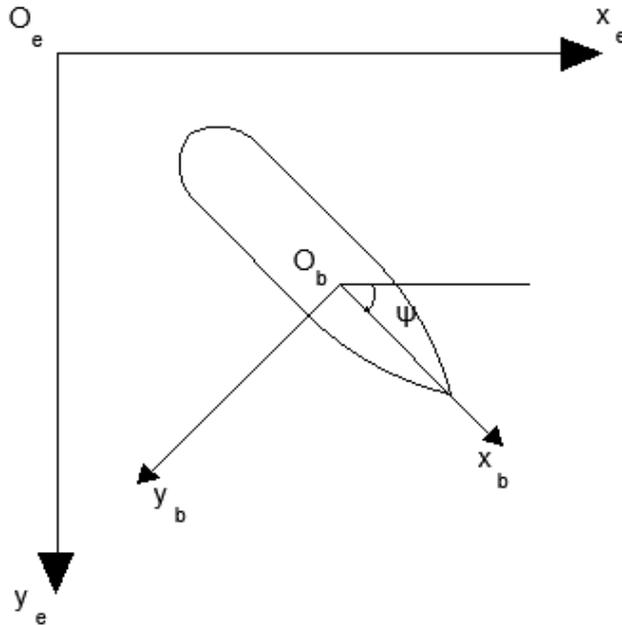


Figura 2: Vista superior da embarcação. Coordenadas fixas e dinâmicas.

onde (FOSSSEN, 2011):

M é a matriz de inércia e massas adicionais;

$C(\nu)$ é a matriz de Coriolis-centrípeta;

$D(\nu)$ é a matriz de amortecimento;

$\nu := [u, v, r]^T$ é o vetor da velocidade generalizada representado no sistema de coordenadas móvel;

$g(\eta)$ é o vetor de forças gravitacionais generalizadas e de empuxo;

$\tau := [X, Y, N]^T$ é o vetor da força generalizada gerada pelos propulsores;

$\eta := [x, y, \psi]^T$ é o vetor de posição generalizada, no qual x e y são as coordenadas da origem O_b representadas no sistema estacionário;

\mathbf{w} é o vetor de perturbações ambientais

1.5 MATRIZ DE INÉRCIA E MASSAS ADICIONAIS

Em representações tanto de seis quanto de três DOF, a matriz de inércia (M) é dada pela soma das massas e seus momentos de inércia, conhecida como matriz de inércia do corpo rígido (M_{RB}) e da matriz de inércia das massas adicionais (M_A). Em (FOSSSEN, 2011, Capítulo 7.1) são apresentadas as matrizes de inércia e massas adicionais que auxiliam na composição da dinâmica da embarcação em (1.7):

$$M = M_{RB} + M_A. \quad (1.8)$$

A dinâmica da embarcação pode ser dividida em duas partes: forças da dinâmica do corpo rígido e forças hidrodinâmicas. Em relação as matrizes de inércia, M_{RB} faz parte das forças da dinâmica do corpo rígido e M_A faz parte das forças hidrodinâmicas.

1.5.1 MATRIZ DE INÉRCIA

É comum assumir que a massa se distribui de forma homogênea e o plano $x - y$ é simétrico. Com isso

$$I_{xy} = I_{yz} = 0 \quad (1.9)$$

Considerando que a origem das coordenadas do frame da embarcação sejam definidas na linha de centro da mesma no ponto CO, $y_{CO} = 0$. A representação da matriz de inércia do corpo rígido (M_{RB}) é única e satisfaz:

$$M_{RB} = M_{RB}^T > 0 \quad \dot{M}_{RB} = 0_{3 \times 3}. \quad (1.10)$$

Ou seja, a matriz de inércia do corpo rígido é simétrica e positiva definida. A partir das premissas apresentadas acima, verificamos que a matriz de inércia para três DOF pode ser representada como (FOSSSEN, 2011, Capítulo 7.1)

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_g \\ 0 & mx_g & I_z \end{bmatrix}, \quad (1.11)$$

onde

m é a massa da embarcação;

$r_g^b = x_g, y_g, z_g$ é a posição do centro de gravidade da embarcação no sistema de coordenadas BODY;

I_z é o momento de inércia sobre o eixo z .

1.5.2 MATRIZ DE INÉRCIA DE MASSAS ADICIONAIS

O conceito de massa adicional é usualmente interpretado de forma errada, tratando a embarcação e a quantidade finita de água conectada a ele como sendo um novo sistema com uma massa maior do que o sistema original. Não é correto tratar o sistema desta forma, pois o movimento da embarcação força o fluido a oscilar em diferentes amplitudes de partículas de fluido, em fase com o movimento harmônico forçado da embarcação. Entretanto, as amplitudes decaem longe do corpo podendo se tornar insignificantes.

Massas adicionais podem ser tratadas na verdade como forças induzidas por pressão e momentos devidos a um movimento harmônico forçado do corpo da embarcação proporcional à sua aceleração. Como consequência, as forças das massas adicionais e a aceleração estarão defasadas 180 graus com a força do movimento harmônico (FOSSSEN, 2002, Capítulo 3.2.1).

A matriz de inércia de massas adicionais é representada por

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & N_{\dot{v}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Para a equação (1.12), a força hidrodinâmica da massa adicionada Y ao longo do eixo y devido a aceleração \dot{u} na direção de x é escrita como (SNAME, 1950)

$$Y = -Y_{\dot{u}}\dot{u} \quad Y_{\dot{u}} := \frac{\partial Y}{\partial \dot{u}}. \quad (1.13)$$

De acordo com a Propriedade 3.3 (FOSSSEN, 2002, Capítulo 3.2), para um corpo rígido em repouso ($U \approx 0$), supondo um fluido ideal, sem incidência de ondas em correntes marítimas e frequência zero, a matriz de inércia do sistema hidrodinâmico é positiva definida, ou seja:

$$M_A(U) = M_A^T(U) > 0 \quad (1.14)$$

onde

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1.15)$$

é o módulo da velocidade linear da embarcação. Desta forma podemos substituir $N_{\dot{v}}$ por

$Y_{\dot{r}}$ em (1.12). Nesta Dissertação considera-se que a embarcação opera em baixa velocidade quando na ausência de onda, desta forma, esta aproximação se torna adequada. Devido a simetria no plano $x_b y_b$, é possível desacoplar o modo de avanço, desvio e guinada. Logo, a matriz de inércia de massas adicionais pode ser escrita como:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & Y_{\dot{r}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Substituindo as equações (1.11) e (1.16) em (1.8) encontramos a equação

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_g - Y_{\dot{r}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}. \quad (1.17)$$

1.6 MATRIZ DE CORIOLIS-CENTRÍPETA

O efeito Coriolis ou Pseudoforça de Coriolis é uma força inercial que age sobre corpos que estão em movimento em um referencial não inercial, o qual em relação a um referencial inercial, possui movimento de rotação. Ou seja, o efeito de Coriolis surge no movimento de um corpo durante o movimento de rotação e translação (ROSARIO, 2017).

Assim como a matriz de inércia, a matriz de Coriolis-Centrípeta é dividida em duas partes

$$C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu), \quad (1.18)$$

onde

$C_{RB}(\nu)$ é a matriz de Coriolis-Centrípeta do corpo rígido;

$C_A(\nu)$ é a matriz de Coriolis-Centrípeta das massas adicionais.

As matrizes de Coriolis-Centrípeta são antissimétricas (FOSSEN, 2011, Capítulo 7.1):

$$C(\nu) = -C^T(\nu). \quad (1.19)$$

Fazendo uso das mesmas suposições aplicadas na seção 1.5, é possível escrever a matriz de

Coriolis-Centrípeta do corpo rígido como

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_g r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_g r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.20)$$

A matriz de Coriolis-Centrípeta das massas adicionais é escrita da forma

$$C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{r}}r \\ 0 & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ -Y_{\dot{v}}v - Y_{\dot{r}}r & X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.21)$$

Substituindo as equações (1.20) e (1.21) na equação (1.18) encontra-se a matriz de Coriolis-Centrípeta

$$C(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -(m - Y_{\dot{v}})v - (mx_g - Y_{\dot{r}})r \\ 0 & 0 & (m - X_{\dot{u}})u \\ (m - Y_{\dot{v}})v + (mx_g - Y_{\dot{r}})r & -(m - X_{\dot{u}})u & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.22)$$

1.7 MATRIZ DE ARRASTE

O arraste hidrodinâmico para embarcações pode ser causado por cinco principais motivos (FOSSSEN, 2011, Capítulo 6.4):

- **Potencial de arraste:** O termo de arraste induzido por radiação é geralmente referido para um potencial de arraste. No entanto, a contribuição deste termo geralmente é desprezível quando comparado com outros termos dissipativos como a viscosidade de arraste.
- **Atrito do casco:** a atrito do casco devido a teoria da camada laminar limite é importante quando considerado o movimento de baixa frequência da embarcação. Além do atrito do casco, haverá uma contribuição de alta frequência devido a uma camada limite turbulenta. Normalmente é referido como um atrito do casco não linear quadrático.
- **Arraste das ondas:** pode ser interpretado como acréscimo de resistência na superfície

da embarcação a partir das ondas. Este tipo de arraste é derivado da teoria das ondas de segunda ordem. Esse tipo de arraste é a contribuição mais importante das ondas em alto mar. Devido ao fato de as forças de arraste das ondas ser proporcional ao quadrado da altura significativa da onda (H_s). O arraste das ondas no desvio (*sway*) e na guinada (*yaw*) são relativamente pequenos em relação ao arraste em redemoinhos.

- **Arraste devido a redemoinhos:** o Paradoxo de *D'Alambert* afirma que nenhuma força hidrodinâmica age sobre um sólido movendo-se completamente submerso com velocidade constante em um fluido não viscoso. Em um fluido viscoso, as forças de atrito estão presentes de modo que o sistema não é conservador com relação à energia.
- **Força de elevação:** as forças de elevação hidrodinâmica surgem de dois mecanismos físicos. O primeiro é devido a circulação linear de água ao redor do casco. O segundo é um efeito não linear, comumente denominado fluxo cruzado de arrasto, que atua a partir de uma transferência de impulso do corpo para o fluido. Este efeito secundário explica a formação de redemoinhos.

Estes diferentes termos contribuem tanto para o arraste linear como o quadrático. Porém, geralmente é difícil separar estes efeitos. Na maioria dos casos, é conveniente escrever o arraste hidrodinâmico total como

$$D(\nu_r) = D + D_n(\nu_r) \quad (1.23)$$

onde

ν_r é o vetor de velocidade relativa;

D é a matriz de arraste linear devido ao potencial de arraste e possíveis atritos no casco;

$D_n(\nu_r)$ é a matriz não-linear de arraste devido ao arraste quadrático e os termos de ordem superior.

Para aplicações em baixa velocidade, a matriz de arraste linear é simétrica. Ou seja

$$D = D^T. \quad (1.24)$$

Utilizando as mesmas suposições aplicadas em (1.5) e (1.6), é possível concluir que a matriz de arraste linear é representada por

$$D = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & Y_r & N_r \end{bmatrix}. \quad (1.25)$$

Como nesta Dissertação é considerado que a embarcação opera em baixa velocidade, podemos assumir que $N_v = Y_r$ e a matriz de arraste linear (D) garante que a velocidade converge exponencialmente para zero.

Podemos escrever a matriz de arraste não-linear como

$$D_n(\nu_r) = - \begin{bmatrix} X_{|u|u}|u_r| & 0 & 0 \\ 0 & Y_{|v|v}|v_r| & Y_{|v|r}|v_r| \\ 0 & N_{|v|v}|v_r| & N_{|v|r}|v_r| \end{bmatrix}. \quad (1.26)$$

1.8 MODELO DOS PROPULSORES

A ação das forças (f_b^b) e momentos (m_b^b) do conjunto de propulsores é dado por (HSU et al., 2000):

$$f_b^b = \sum_{i=1}^n F_{P_i} n_{P_i}^b \quad (1.27)$$

$$m_b^b = \sum_{i=1}^n [M_{P_i} n_{P_i}^b + p_{P_i}^b \times F_{P_i} n_{P_i}^b] \quad (1.28)$$

onde:

F_{P_i} é a força gerada pelo i -ésimo propulsor;

M_{P_i} é o momento gerado pelo i -ésimo propulsor;

n é o número de propulsores;

$n_{P_i}^b$ é um vetor unitário que define a direção da força gerada pelo i -ésimo propulsor;

$p_{P_i}^b$ é a posição do i -ésimo propulsor no sistema de coordenadas do barco .

O torque M_{P_i} causado pelas hélices são muito pequenos, podendo ser desprezado (SOKAL et al., 2010). Sendo assim, a equação (1.28) pode ser reescrita como:

$$m_b^b = \sum_{i=1}^n [p_{P_i}^b \times F_{P_i} n_{P_i}^b] \quad (1.29)$$

A força gerada por cada propulsor é dada por (ROSARIO, 2017; HSU et al., 2000):

$$F_{P_i} = \alpha_i^*(u_i) u_i |u_i|, \quad \alpha_i^*(u_i) = \begin{cases} \alpha_i^+, & \text{se } u_i \geq 0 \\ \alpha_i^-, & \text{se } u_i \leq 0 \end{cases} \quad (1.30)$$

onde,

α_i^+ é o coeficiente de empuxo da i -ésima hélice no sentido direto;

α_i^- é o coeficiente de empuxo da i -ésima hélice no sentido reverso;

u_i é o comando de velocidade de rotação do i -ésimo propulsor em p.u. (por unidade)

A dinâmica da embarcação é não-linear, multivariável e acoplada (no sentido entrada e saída). O seu desacoplamento permite controlar cada grau de liberdade de forma independente (CUNHA, 1992). Sendo assim, as equações (1.27) e (1.29) podem ser reescritos de forma matricial como:

$$\tau = \begin{bmatrix} f_b^b \\ m_b^b \end{bmatrix} = B_p F_p \quad (1.31)$$

onde,

$F = [F_{P_1}, F_{P_2}, \dots, F_{P_{n_p}}]^T$ é a força dos propulsores e $\tau \in \mathfrak{R}^6$.

$$B_p = \begin{bmatrix} n_P^b \\ p_P^b \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

é a matriz de distribuição de controle, sendo

$$n_P^b = \begin{bmatrix} n_{P_1}^b & n_{P_2}^b & \dots & n_{P_{n_p}}^b \end{bmatrix} \quad (1.33)$$

e

$$p_P^b = \begin{bmatrix} (p_{P_1}^b \times n_{P_1}^b) & (p_{P_2}^b \times n_{P_2}^b) & \dots & (p_{P_{n_p}}^b \times n_{P_{n_p}}^b) \end{bmatrix} \quad (1.34)$$

2 PERTURBAÇÕES AMBIENTAIS

Neste capítulo, apresenta-se uma breve discussão a respeito de perturbações ambientais, que dificultam o desempenho de qualquer embarcação no oceano. Neste contexto, as perturbações ambientais mais comuns são correntezas, ondas e vento. Essas são apresentadas neste capítulo de forma individual.

Fossen (2011, Capítulo 8) apresenta perturbações ambientais que podem interferir no funcionamento correto de uma embarcação e no rastreamento de sua trajetória. No projeto de sistemas de controle, é comum utilizar o princípio da superposição quando se considera perturbações de ventos e ondas, estas se somam à dinâmica da embarcação (1.7), onde as forças das perturbações ambientais são representadas pelo vetor \mathbf{w} .

2.1 VENTO

O vento é definido como o movimento relativo do ar na superfície da Terra. Modelos matemáticos de forças e momentos são utilizados em sistemas de controle de embarcações para melhorar a robustez e desempenho de um sistema em condições extremas.

O vento pode ser caracterizado por uma componente média sobreposta a uma componente flutuante, ou *gust*. A componente do valor médio varia conforme a distância em relação ao chão, porém a componente flutuante se mantém aproximadamente constante independente dessa distância.

O vento é na realidade um fenômeno tridimensional, porém é comumente representado apenas por velocidades no plano horizontal, parametrizado por uma velocidade (v_ω) e sua direção (β_ω). A velocidade v_ω da componente de valor médio varia de acordo com a altura em relação ao chão e é calculada da seguinte forma (FALTINSEN, 1993):

$$\frac{\bar{v}(z)}{\bar{v}_\omega(10)} = \frac{5}{2} \sqrt{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.1)$$

onde z_0 é calculado da seguinte forma

$$z_0 = 10 \exp\left(-\frac{2}{5\sqrt{k}}\right) \quad (2.2)$$

onde

$\bar{v}_\omega(z)$ é a velocidade da componente de valor médio na altura z ;

$\bar{v}_\omega(10)$ é a velocidade da componente de valor médio a 10m de altura;

k é o coeficiente de arraste da superfície do mar.

Variações de forma lenta da velocidade desta componente podem ser implementadas por um processo de 1° ordem de *Gauss-Markov* (FOSSEN, 2011)

$$\dot{\bar{v}}_\omega + \mu\bar{v}_\omega = w \quad (2.3)$$

onde:

w é um ruído branco Gaussiano;

$\mu \geq 0$ é uma constante.

A magnitude da velocidade pode ser restrita por elementos de saturação como

$$0 \leq \bar{v}_{\omega min} \leq \bar{v}_\omega \leq \bar{v}_{\omega max} \quad (2.4)$$

Para a direção do vento de forma similar, pode ser implementada:

$$\dot{\beta}_w + \mu_2\beta_w = w_2 \quad (2.5)$$

$$\beta_{w min} \leq \beta_w \leq \beta_{w max} \quad (2.6)$$

onde

w_2 é um ruído branco Gaussiano;

$\mu_2 \geq 0$ é uma constante.

Já a componente *gust* é comumente descrita por um espectro, assim como as ondas. O espectro utilizado nesta Dissertação é o NORSOK (JOHANNESSEN; MELING; HAYER, 2001), onde o espectro do vento varia com a altura z e é formulado como

$$S(f) = 320 \frac{\left(\frac{v_{\omega 10}}{10}\right)^2 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,45}}{\left(1 + x^{n^2}\right)^{\frac{5}{3n}}}, \quad n = 0,468 \quad (2.7)$$

$$x = 172f \left(\frac{z}{10}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{v_{\omega 10}}{10}\right)^{-\frac{3}{4}} \quad (2.8)$$

O cálculo da velocidade do vento da componente flutuante pode ser feito por

$$v_{\omega gi}(t) = \sqrt{2S(f_i)\Delta f_i} \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (2.9)$$

onde:

f_i é a frequência de acordo com o número da componente harmônica;

Δf_i é o intervalo de frequência;

ϕ_i é o ângulo de fase uniformemente distribuído.

A velocidade do vento pode ser enfim calculada como a soma das velocidades apresentadas de acordo com o número N de componentes desejadas de *gust* e escrita como

$$V_w(z,t) = \bar{v}_w(z) + \sum_{i=1}^N v_{wgi}(t) \quad (2.10)$$

Para o cálculo da ação da força e do momento do vento, são utilizados a velocidade relativa do vento (V_r) e o ângulo relativo (γ_r).

$$V_r = \sqrt{u_{rw}^2 + v_{rw}^2} \quad (2.11)$$

$$\gamma_r = \tan^{-1} \left(\frac{v_{rw}}{u_{rw}} \right) \quad (2.12)$$

onde:

u_{rw} é a velocidade relativa da embarcação no eixo x_b ;

v_{rw} é a velocidade relativa da embarcação no eixo y_b .

Estas velocidades relativas podem ser calculadas como

$$u_{rw} = u - u_w \quad (2.13)$$

$$v_{rw} = v - v_w \quad (2.14)$$

enquanto as componentes de V_w nas direções x e y são calculadas de acordo com a Figura 3:

$$u_w = V_w \cos(\beta_w - \psi) \quad (2.15)$$

$$v_w = V_w \sin(\beta_w - \psi) \quad (2.16)$$

$$\psi = \gamma_w + \beta_w + \pi \quad (2.17)$$

onde

V_w é a velocidade do vento;

β_w é a direção do vento;

ψ é o ângulo de ataque relativo a proa da embarcação.

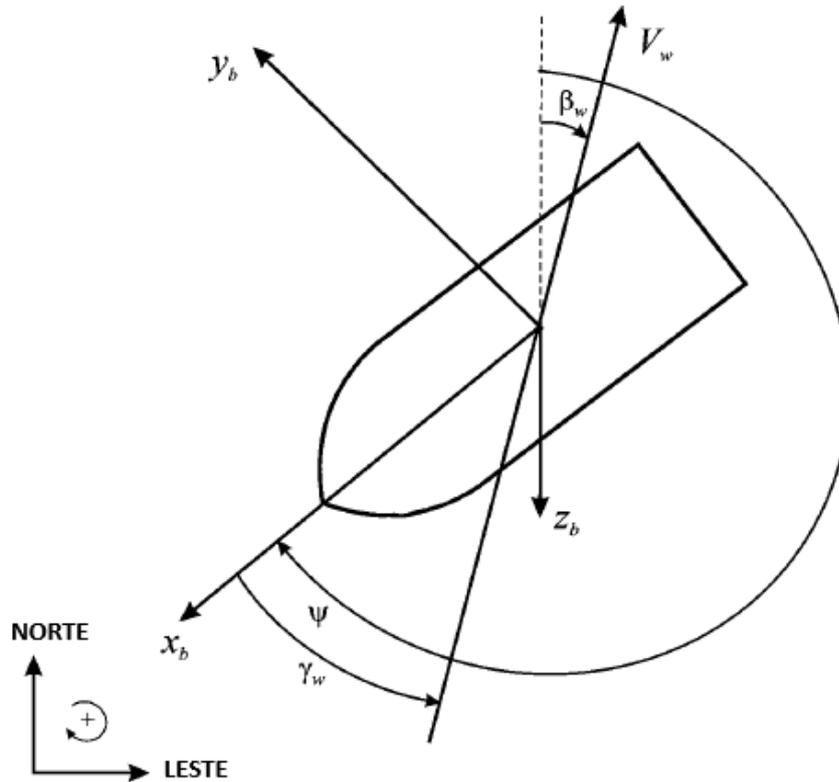


Figura 3: Velocidade do vento V_w , direção do vento β_w e ângulo de ataque do vento γ_w relativo a proa da embarcação. (FOSSEN, 2011, Figura 8.1)

As forças generalizadas do vento formam o vetor:

$$\omega_{wind} = \begin{bmatrix} X_{wind} \\ Y_{wind} \\ N_{wind} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

onde

X_{wind} é a força exercida pelo vento na embarcação no eixo x ;

Y_{wind} é a força exercida pelo vento na embarcação no eixo y ;

N_{wind} é o momento exercido pela força do vento na embarcação no eixo z .

Para calcular a resistência do vento na embarcação, foi utilizado o modelo de (ISHERWOOD, 1972) da seguinte forma:

$$X_{wind} = \frac{1}{2} C_X(\gamma_r) \rho_a V_r^2 A_T \quad (2.19)$$

$$Y_{wind} = \frac{1}{2} C_Y(\gamma_r) \rho_a V_r^2 A_L \quad (2.20)$$

$$N_{wind} = \frac{1}{2} C_N(\gamma_r) \rho_a V_r^2 A_L L \quad (2.21)$$

onde:

- C_X e C_Y são coeficientes de força;
- C_N é o coeficiente de momento;
- ρ_a é a densidade do ar;
- A_T é a área projetada transversal;
- A_L é a área projetada lateral;
- L é o comprimento da embarcação.

Em (ISHERWOOD, 1972) foram utilizados os seguintes parâmetros da embarcação e são utilizados os dados de (FOSSEN, 2011, Tabela 4.1):

- L - comprimento da embarcação;
- B - Boca;
- A_L - Área projetada lateral;
- A_T - Área projetada transversal;
- A_{SS} - Área projetada lateral da superestrutura;
- S - Perímetro lateral sobre a água;
- C - Distância do mastro ao centróide da área lateral projetada;
- M - Número de mastros da embarcação;

Na Tabela 2, são apresentados os modelos de ventos encontrados na superfície e suas velocidades.

2.2 ONDAS

Nesta seção, apresenta-se uma breve discussão sobre as ondas que podem ser encontradas no oceano. As ondas são permanentemente sujeitas a forças externas da natureza como a ação dos ventos e das marés por exemplo. De um modo geral, existem cinco tipos básicos de ondas:

- Ondas sonoras: ocorrem devido a compressibilidade da água, que é muito pequena;
- Ondas capilares: ocorrem na superfície de contato entre o ar e a água. A combinação de ventos turbulentos e a tensão na superfície resulta em ondas capilares de alta e baixa frequência;

Tabela 2: Parâmetros do Vento (FOSSEN, 2011, Tabela 4.3)

Número de <i>Beaufort</i>	Descrição do vento	Velocidade do vento (nós)
0	Calmo	0 – 1
1	Leve	2 – 3
2	Brisa leve	4 – 7
3	Brisa suave	8 – 11
4	Brisa moderada	12 – 16
5	Brisa fresca	17 – 21
6	Brisa forte	22 – 27
7	Vendaval moderado	28 – 33
8	Vendaval fresco	34 – 40
9	Vendaval forte	41 – 48
10	Vendaval	49 – 56
11	Tempestade	57 – 65
12	Furacão	mais de 65

- Ondas de gravidade: são ondas de superfície (do vento) induzidas a partir da ação da gravidade nas partículas da água;
- Ondas de natureza interna: são forças gravitacionais que agem sobre a superfície geopotencial interna em um fluido estratificado;
- Ondas planetárias: são ondas muito lentas induzidas pela variação do vórtice de equilíbrio potencial, devido a modificações na profundidade ou latitude.

Todos estes tipos de ondas podem ocorrer concomitantemente, formando padrões mais complicados de oscilações (MASSEL, 1996). Para este trabalho, serão consideradas as ondas geradas pela ação do vento e forças gravitacionais. Tais ondas podem ser modeladas como um processo estocástico, resultado da superposição de várias componentes monocromáticas de frequências e direções diferentes. Neste caso, as ondas são determinadas a partir de um espectro de ondas, representado por uma altura significativa (H_s) e período de pico (T_p) (OCHI, 1998). Esses parâmetros estatísticos são geralmente utilizados para a definição dos estados de mar.

Existem alguns modelos de espectro de onda, como por exemplo o espectro de *Neumann* que contém um parâmetro espectral, Espectro *Bretschneider* que contém dois parâmetros, Espectro de *Pierson-Moskowitz* que foi desenvolvido com dois parâmetros espectrais a partir do vento. Neste trabalho será utilizado o Espectro JONSWAP que é

adotado por ITTC (International Towing Tank Conference) desde 1984 (FOSSSEN, 2011). A função de densidade do espectro JONSWAP é calculada por (FOSSSEN, 2011, Capítulo 8)

$$S(\omega) = 155 \frac{H_s^2}{T_1^4} \omega^{-5} \exp\left(\frac{-944}{T_1^4} \omega^{-4}\right) \gamma^Y \quad \gamma = 3,3 \quad (2.22)$$

$$Y = \exp\left[-\left(\frac{0,191\omega T_1 - 1}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right] \quad (2.23)$$

onde

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{se } \omega \leq \frac{5,24}{T_1} \\ 0,09 & \text{se } \omega > \frac{5,24}{T_1} \end{cases} \quad (2.24)$$

onde:

H_s é a altura significativa da onda em metros;

T_1 é o período médio das ondas em segundos;

ω é a frequência em rad/s.

Ao projetar sistemas de controle de movimento de embarcações, é importante avaliar a robustez e o desempenho na presença de ondas. As forças das ondas são observadas como uma componente de valor médio de variação lenta e um componente oscilatório, que precisa ser compensado de forma diferente por um sistema de controle de *feedback*.

As ondas interferem na dinâmica da embarcação induzindo forças e momentos. Tais forças podem ser simuladas dividindo-as em dois tipos (FOSSSEN, 2011, Capítulo 8):

- **Força de indução de onda de primeira ordem:** movimento de frequência da onda (WF) observado com movimento oscilatório de média zero.
- **Força de indução de onda de segunda ordem:** são forças de deriva de ondas (WD) observadas com médias diferente de zero, variando lentamente as componentes.

A resultante das forças e momentos da onda é dada por

$$\omega_{wave} = \omega_{wave_{WF}} + \omega_{wave_{WD}} \quad (2.25)$$

onde

$\omega_{wave_{WF}}$ é a resultante das forças de indução de primeira ordem (WF);

$\omega_{wave_{WD}}$ é a resultante das forças de indução de segunda ordem (WD).

O espectro da onda $S(\omega)$ pode ser utilizado para calcular os momentos de espectro de onda:

$$m_k := \int_0^\infty \omega^k S(\omega) d\omega \quad (k = 0, \dots, N) \quad (2.26)$$

Para $k = 0$

$$m_0 = \int_0^\infty S(\omega) d\omega, \quad (2.27)$$

o que representa o momento de ordem zero. A partir de (2.27), calcula-se a elevação da onda, que pode ser descrita por uma variável aleatória com distribuição Gaussiana com média zero e variância dada por

$$\sigma^2 = m_0, \quad (2.28)$$

onde σ é o valor médio quadrático (*RMS*).

A frequência de pico (ω_p) é encontrada a partir de

$$\left(\frac{dS(\omega)}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_0} = 0 \quad (2.29)$$

Então, o período de pico (T_p) é

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_p} \quad (2.30)$$

Consequentemente, o valor máximo do espectro da onda é

$$S_{max} = S(\omega_p) \quad (2.31)$$

Partindo do pressuposto de que a altura da onda pode ser representada por uma distribuição por *Rayleigh*, é possível demonstrar que a altura da onda satisfaz (BISHOP; PRICE, 1974)

$$H_s = 4,01\sigma = 4,01\sqrt{m_0} \quad (2.32)$$

O período médio da onda é definido por

$$T_1 := 2\pi \frac{m_0}{m_1} \quad (2.33)$$

enquanto o período médio do cruzamento da origem é definido por

$$T_z := 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.34)$$

O diagrama da Figura 4 apresenta a força induzida da onda como produto de duas funções de transferência. Nesta figura ForceRAO representa as tabelas de força *Response Amplitude Operator* que são calculadas por *software* hidrodinâmico.

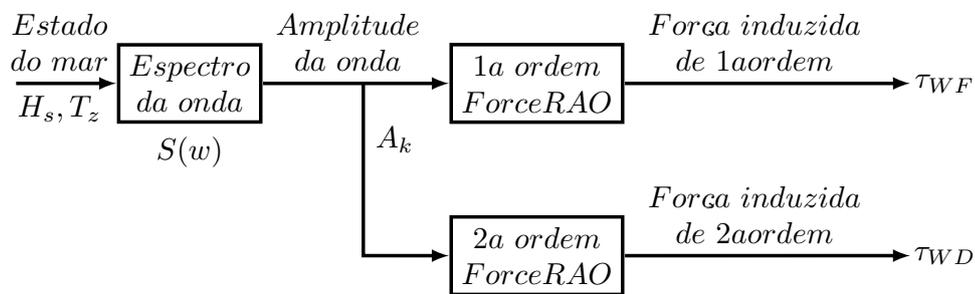


Figura 4: Força induzida da onda como produto de duas funções de transferência. (FOSSEN, 2011, Figura 8.13)

A Tabela 3 apresenta algumas classificações para estados de mar com a altura da onda e as probabilidades em que podem ser encontradas em algumas regiões.

2.3 CORRENTES OCEÂNICAS

As correntes oceânicas são um sistema de circulação de água a partir de forças horizontais e verticais produzidas pela gravidade, fricção do vento (circulação horizontal) e a variação da densidade da água em diferentes partes do oceano (circulação vertical). Três sistemas de vento (alísios, oeste e leste) geram, por atrito na superfície do mar, as principais correntes superficiais marinhas. Ao sopraem na direção oeste, paralelo ao Equador, os ventos alísios formam as correntes equatoriais comuns a todos os oceanos. Além do vento, há a troca de calor entre a superfície do oceano com suas mudanças de salinidade que desenvolvem uma componente adicional à corrente marítima denominada de *thermohaline current* (FOSSEN, 2011, Capítulo 4.3).

Tabela 3: Probabilidade no mar (FOSSSEN, 2011, Tabela 8.5)

Código do estado de mar	Estado de mar	Altura significativa da onda (m)	Probabilidade(%)		
			Planeta	Atlântico Norte	Norte do Alântico Norte
0	Calmo (Vítreo)	0			
1	Calmo (Ondulações)	0 – 0,1	11,2486	8,3103	6,0616
2	Suave (Ondas leves)	0,1 – 0,5			
3	Leve	0,5 – 1,25	31,6851	28,1996	21,5683
4	Moderado	1,25 – 2,5	40,1944	42,0273	40,9915
5	Bravo	2,5 – 4,0	12,8005	15,4435	21,2383
6	Muito bravo	4,0 – 6,0	3,0253	4,2938	7,0101
7	Alto	6,0 – 9,0	0,9263	1,4968	2,6931
8	Muito alto	9,0 – 14,0	0,1190	0,2263	0,4346
9	Fenômeno	acima de 14,0	0,0009	0,0016	0,0035

Nos oceanos Atlântico e Pacífico, essas correntes são interceptadas pelos continentes e desviadas para o norte e para o sul, deslocando-se daí ao longo da parte oeste dos oceanos. Estas são as maiores e mais fortes correntes oceânicas superficiais (SOARES-GOMES, 2007).

O oceano é convenientemente dividido em duas esferas aquáticas, a esfera de água quente e a esfera de água fria. Por causa da rotação da Terra, as forças de Coriolis tentam transportar as principais correntes para o leste no hemisfério norte e oeste no hemisfério sul. As principais circulações de correntes também contém uma componente devido a interação dos planetas com a gravidade. Para a modelagem de embarcações de superfícies, o modelo de corrente bidirecional é suficiente. Em regiões costeiras e rios entre montanhas encontram-se as componentes mais velozes com velocidades entre 2 e 3 (m/s) (FOSSSEN, 2011, Capítulo 4.3).

Para aplicar as contribuições das correntes oceânicas nas simulações da embarcação, é necessário reescrever as forças hidrodinâmicas transformando a Equação (1.7) em:

$$M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu + M_A(\dot{\nu}_r)\nu_r + C_a(\nu_r)\nu_r + D(\nu_r)\nu_r + g(\eta) + g_0 = \tau + \mathbf{w} \quad (2.35)$$

onde

$M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu$ são as forças do corpo rígido;

$M_A(\dot{\nu}_r)\nu_r + C_a(\nu_r)\nu_r + D(\nu_r)\nu_r$ são forças hidrodinâmicas;

$g(\eta) + g_0$ são forças hidrostáticas;

$\nu_r = \nu - \nu_c$, assumindo que a variação do vetor da velocidade da correnteza é muito lenta ($\dot{\nu}_c \approx 0$).

A velocidade da correnteza é denotada como V_c , enquanto a direção relativa do movimento da embarcação é expressa em termos dos ângulos de ataque α_c e ângulo de derrapagem β_c . Para efeitos de simulação, a velocidade da corrente pode ser gerada usando o processo de 1°-ordem de *Gauss-Markov*.

$$\dot{V}_c + \mu V_c = w \quad (2.36)$$

onde

w é um ruído branco Gaussiano;

$\mu \geq 0$ é constante.

O elemento de saturação é usualmente usado no processo de integração para limitar a velocidade da corrente da seguinte forma:

$$V_{min} \leq V_c(t) \leq V_{max} \quad (2.37)$$

Já a direção da corrente pode ser fixada especificando os valores das constantes α_c e β_c .

Para simulação no modelo plano-horizontal, a equação da velocidade da correnteza se torna:

$$V_c = \sqrt{(u_c^b)^2 + (v_c^b)^2} \quad (2.38)$$

onde:

$$u_c^b = V_c \cos \beta_c \quad (2.39)$$

$$v_c^b = V_c \sin \beta_c \quad (2.40)$$

onde

u_c^b é a velocidade da correnteza no eixo x do sistema de coordenadas do barco;

v_c^b é a velocidade da correnteza no eixo y do sistema de coordenadas do barco.

3 ESTRATÉGIAS CONVENCIONAIS DE RASTREAMENTO DE TRAJETÓRIA PARA EMBARCAÇÕES

Uma embarcação normalmente se desloca com a finalidade de sair de um ponto a outro e, quando em ambiente não controlado, a trajetória sofre interferência de perturbações ambientais. Por isto é necessário que haja um rastreamento de trajetória, para que a embarcação siga a trajetória planejada mesmo sofrendo interferências de perturbações. Sendo assim, o objetivo do controle de trajetória é forçar a saída do sistema η a rastrear uma trajetória de referência $\eta_{ref}(t)$, enquanto que no controle de manobras a tarefa é convergir e seguir um caminho parametrizado $\eta_{ref}(\theta)$ como uma função da variável de caminho denotada por $\theta = \theta(t)$. Durante as manobras, o controle tem dois objetivos: o primeiro é convergir para o caminho parametrizado desejado e o segundo é satisfazer o comportamento dinâmico desejado ao longo do trajeto (FOSSEN, 2002, CAPÍTULO 10). A Figura 5 representa de forma gráfica o sistema proposto nesta Dissertação:

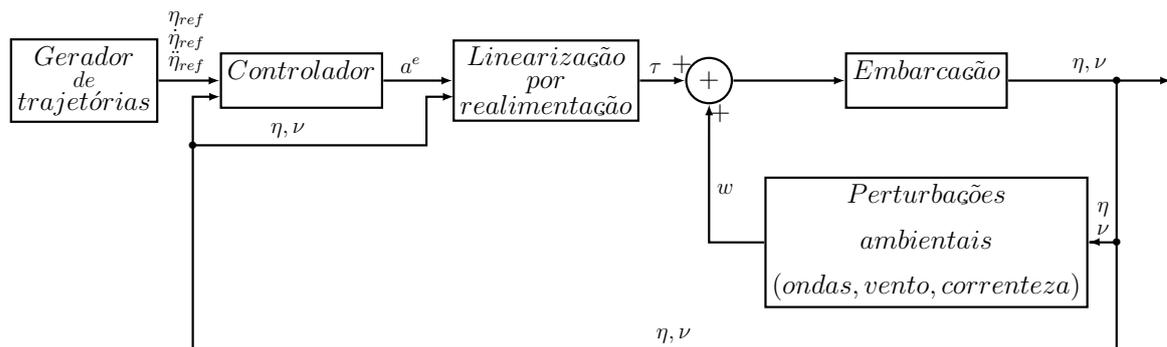


Figura 5: Diagrama de blocos do sistema.

3.1 TRAJETÓRIA

Um sistema de controle deve fazer com que a saída de um sistema $[\eta(t), v(t)]^T$ siga uma saída desejada $[\eta_{ref}(t), v_{ref}(t)]^T$. Para este trabalho, é proposta uma simulação de uma varredura, ou seja, uma trajetória em zigue-zague como a da Figura 6.

3.2 PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA

Para criar a trajetória de referência, foi aplicado o conceito de movimento circular uniforme (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1996, Capítulo 4-7) onde as equações nos

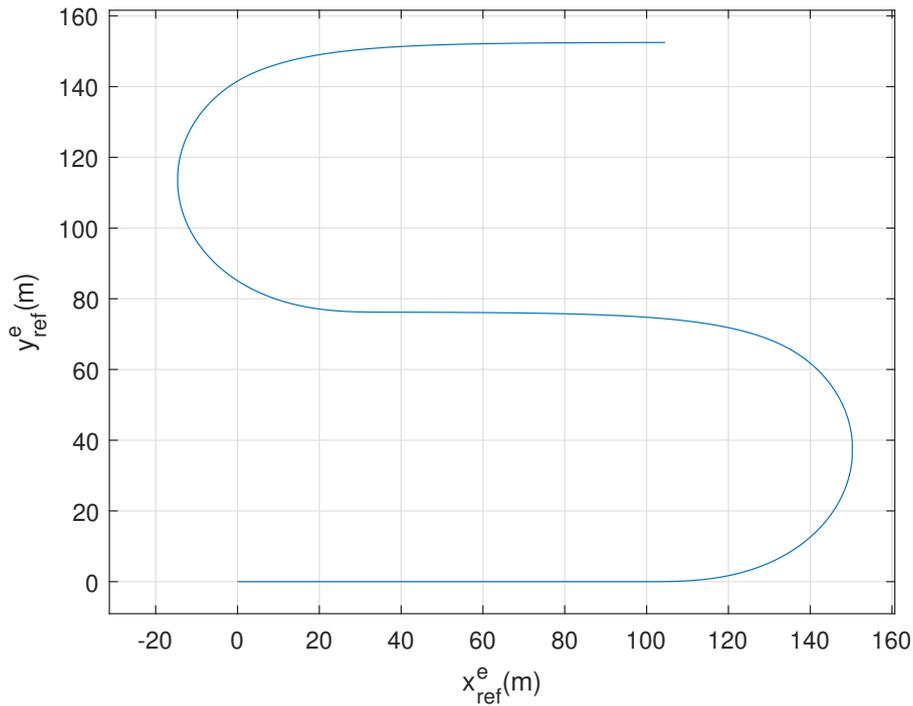


Figura 6: Trajetória de referência.

eixos x e y variam de acordo com a variação do ângulo de rumo ψ_{ref} ao longo do tempo:

$$x_{ref}^e = R \cos(\psi_{ref}(t)), \quad (3.1)$$

$$y_{ref}^e = R \sen(\psi_{ref}(t)), \quad (3.2)$$

onde R é o raio da circunferência. Este deve ser grande o suficiente de acordo com o tamanho da embarcação para que possa seguir a trajetória.

A trajetória de referência é composta pela interpolação entre retas e curvas (RO-SARIO, 2017)(FOSSEN, 2011, Seção 10.3.1). Para que isso ocorra, o ângulo de rumo sofre variação no tempo como em

$$\psi_{bref} = \begin{cases} 0, & \text{se } 0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{4\pi(t-t_1)}{T}, & \text{se } t_1 < t \leq t_2 \\ \pi, & \text{se } t_2 < t \leq t_3 \\ \frac{-4\pi(t-t_1)}{T}, & \text{se } t_3 < t \leq t_4 \\ 0, & \text{se } t \geq t_4 \end{cases} \quad (3.3)$$

onde

$$\begin{aligned}
t_1 &= \frac{l}{u_d}, \\
t_2 &= t_1 + \frac{\pi R}{u_d}, \\
t_3 &= t_2 + \frac{l}{u_d}, \\
t_4 &= t_3 + \frac{2\pi R}{u_d}, \\
t_5 &= t_4 + \frac{l}{u_d}.
\end{aligned} \tag{3.4}$$

sendo u_d a velocidade linear que a embarcação irá navegar e l o comprimento da trajetória retilínea. Na Figura 7 é apresentado o gráfico do ângulo de rumo de referência. Esta referência foi criada para que a embarcação seja mantida alinhada com a trajetória, a fim de reduzir as perdas de arraste (ROSARIO, 2017). Para as simulações foi utilizada uma velocidade de 4 nós marítimos, que equivale a aproximadamente $2m/s$ e como a embarcação não faz curvas muito fechadas, foi escolhido um raio R de $33,5m$ e um comprimento l de $100m$.

A partir das equações (3.3) e (3.5) é possível montar o gráfico do ângulo de rumo apresentado na Figura 7.

Neste gráfico é possível observar que as mudanças de direção são abruptas, sendo necessário uma suavização para auxiliar na interpolação entre as retas e curvas. Para esta suavização, foi inserido o filtro passa-baixas:

$$H(s) = \frac{1}{9s + 1}. \tag{3.5}$$

Com esse incremento, a Figura 7 se transforma na Figura 8.

A partir da contribuição do ângulo de rumo, foram calculadas as referências x_{ref} e y_{ref} a partir das equações abaixo:

$$x_{ref}^b = u_d \cos(\psi_{ref}^b(t)) \tag{3.6}$$

$$y_{ref}^b = u_d \text{sen}(\psi_{ref}^b(t)) \tag{3.7}$$

onde ψ_{ref} varia em relação ao tempo de acordo com a equação (3.3). As equações (3.6) e

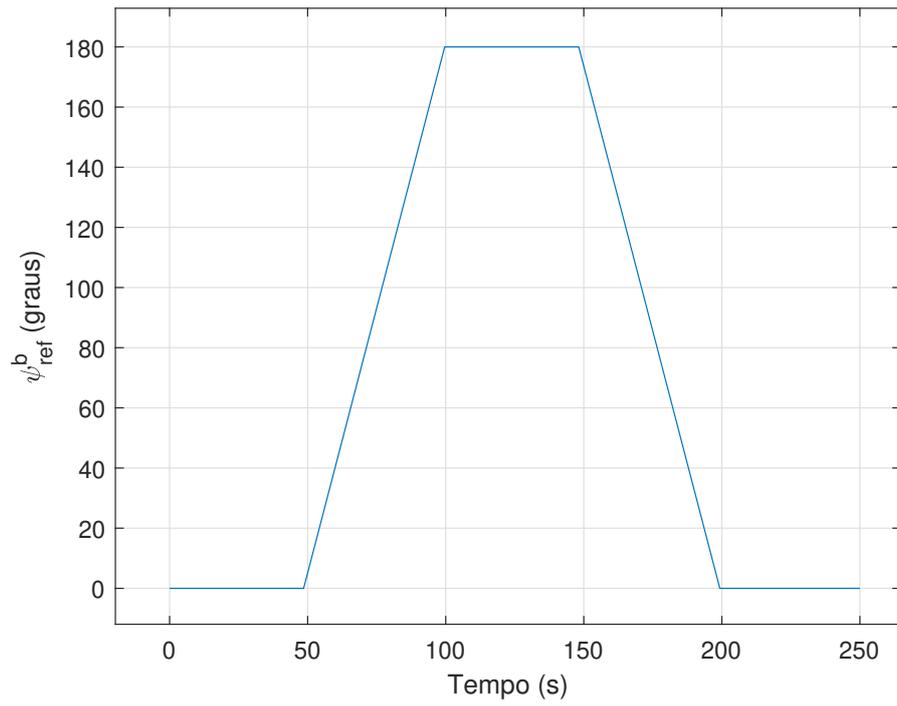


Figura 7: Ângulo de rumo de referência.

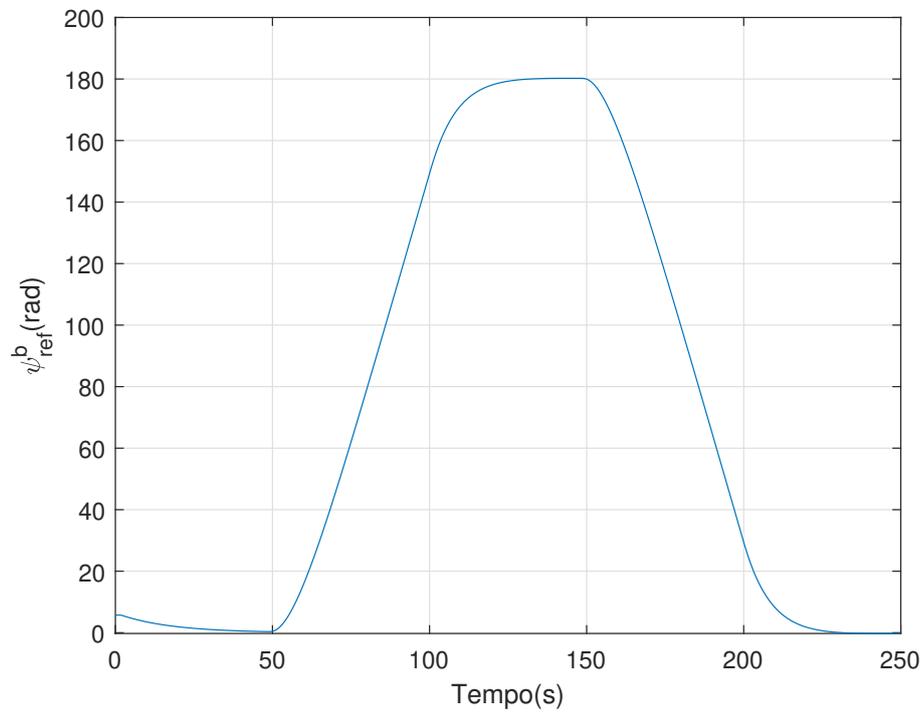
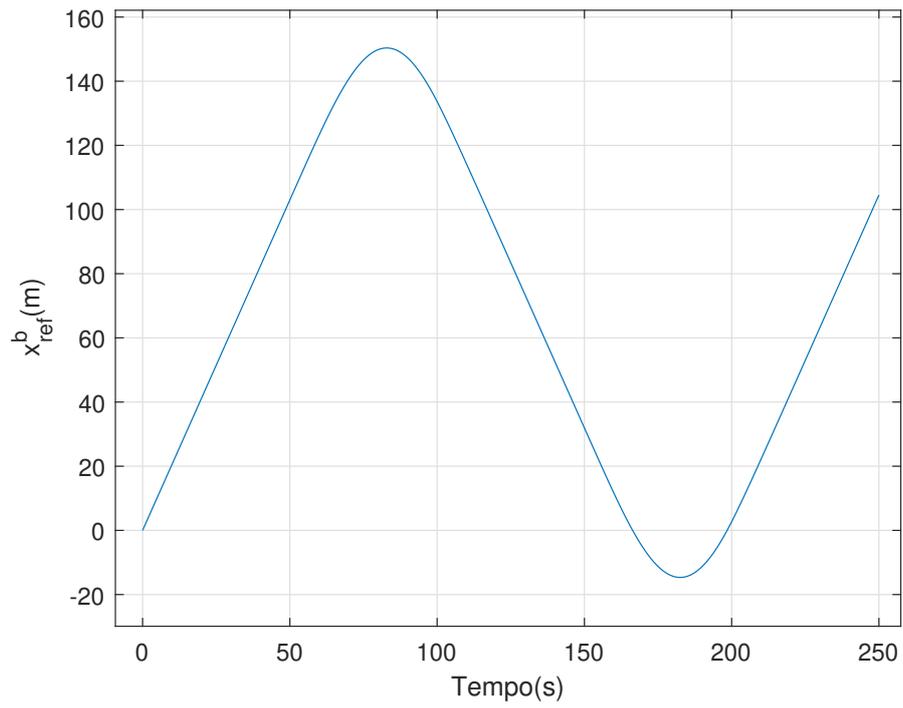
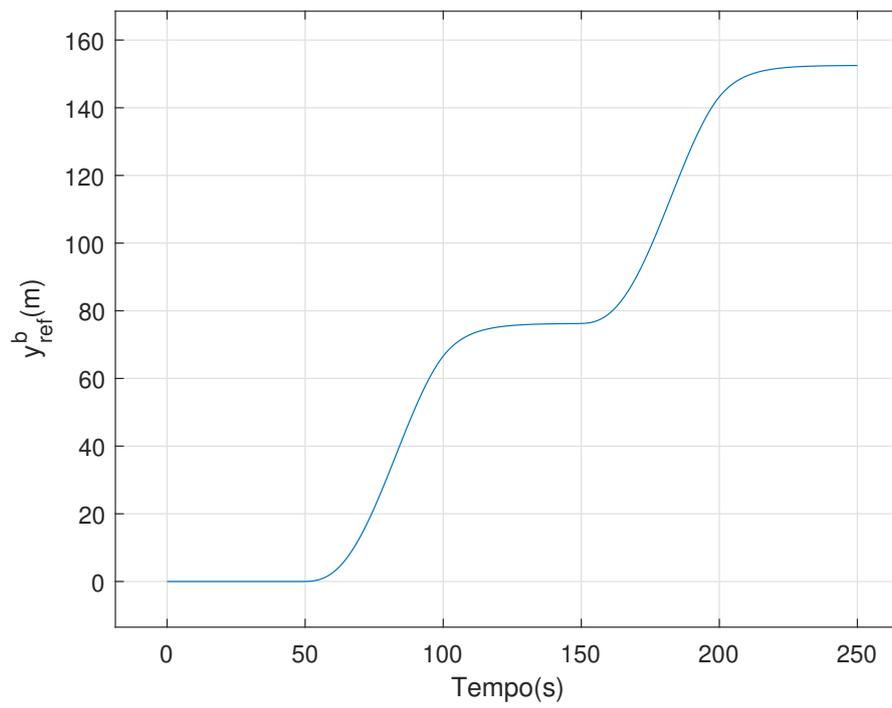


Figura 8: Ângulo de rumo de referência após filtro.

(3.7) apresentam os gráficos nas Figuras 9 e 10 respectivamente.

Figura 9: Sinal de referência x_{ref}^e .Figura 10: Sinal de referência y_{ref}^e .

3.3 LINEARIZAÇÃO POR REALIMENTAÇÃO

Segundo (SILVA, 2006), a realimentação por linearização permite modificar a dinâmica de um sistema não-linear em uma dinâmica linear para que seja possível utilizar técnicas bem conhecidas para controlar o sistema original. Slotine e Li (1991, Capítulo 6) indicam que a ideia central da linearização por realimentação é transformar algebricamente a dinâmica não-linear, total ou parcial, em linear para que a partir disto, outras técnicas de controle possam ser aplicadas. A partir destes princípios, considera-se nesta sessão a linearização do sistema para permitir a aplicação e a comparação de diversos controladores para o rastreamento da trajetória da embarcação.

A Figura 11 representa graficamente a linearização por realimentação desenvolvida neste capítulo.

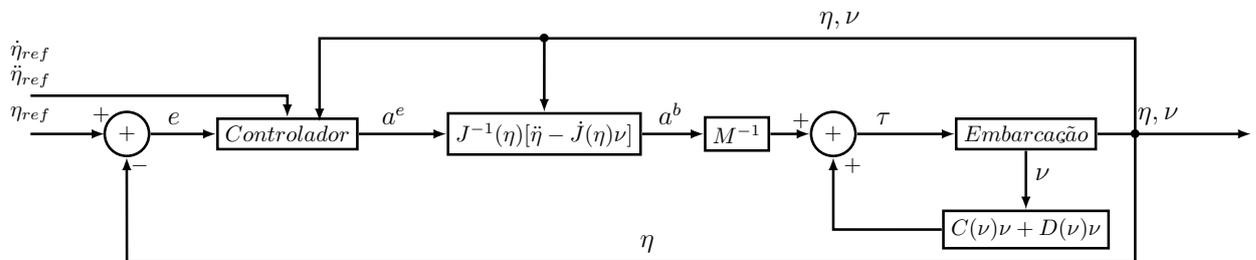


Figura 11: Diagrama de blocos da Linearização por Realimentação.

Fossen (2011, Seção 7.3) aplica o método de linearização por realimentação apresentado por (SLOTINE; LI, 1991), porém com algumas adaptações voltadas para a área naval. O objetivo do controle é transformar a dinâmica da embarcação em um sistema linear. Para isto, é considerado inicialmente que as perturbações d são nulas. Sabendo que

$$\dot{\nu} = a^b \quad (3.8)$$

onde a^b é o vetor aceleração no sistema de coordenadas do barco. A partir das equações da dinâmica da embarcação (1.7) e (1.5), é feita a substituição da equação (3.9) em (1.1),

$$n(\nu, \eta) = C(\nu)v + D(\nu)\nu + g(\eta), \quad (3.9)$$

onde n é um vetor. Ao fazer as substituições das equações (3.8) e (3.9) na equação (1.1), a mesma se torna:

$$Ma^b + n(\nu, \eta) = \tau. \quad (3.10)$$

Desta forma, é possível cancelar as não linearidades selecionando a lei de controle não-linear como sendo (3.10), onde a^b é o sinal de controle.

Para fazer a mudança de coordenadas do barco (BODY) para as coordenadas relativas a superfície da terra (NED) são necessárias algumas alterações. Considere que:

$$\ddot{\eta} = a^e, \quad (3.11)$$

onde a^e é o comando de aceleração em NED. Derivando a equação (1.5) e reorganizando a mesma, obtém-se:

$$\dot{\nu} = J^{-1}(\eta)[\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)\nu]. \quad (3.12)$$

Substituindo as equações (3.8) e (3.11) em (3.12) e em seguida substituindo (3.12) em (3.10) e aplicando em (1.7) é obtido:

$$M(\dot{\nu} - a^b) = MJ^{-1}[\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)\nu - j(\eta)a^b] = 0, \quad (3.13)$$

onde

$$a^e = \dot{J}(\eta)\nu + J(\eta)a^b. \quad (3.14)$$

Sendo assim, a dinâmica da embarcação linearizada aplicada na coordenada NED, somando as perturbações é:

$$\ddot{\eta} = a^e + d, \quad (3.15)$$

onde d são as posições e velocidades das perturbações.

3.4 CONTROLADOR PD

O algoritmo mais simples para o controle de um duplo integrador usa as ações proporcional e derivativa (PD) (CUNHA, 1992). Segundo Ogata (2011), o ganho proporcional é essencialmente um amplificador com ganho ajustável. Porém, com o aumento do seu ganho, é amplificado também as oscilações do sistema. Já a ação de controle derivativa tem a vantagem de ser antecipatória, apesar de não poder ser utilizada sozinha pois é apenas efetiva durante o período oscilatório. Outro problema do controle derivativo é a amplificação dos efeitos dos ruídos, e assim saturação dos atuadores. Quando os controles Proporcional e Derivativo (PD) são utilizados juntos, é criado um controlador com alta

sensibilidade. Esta propriedade faz com que o sistema possa reagir mais rapidamente à variação do erro atuante (3.17) fazendo com que haja uma ação corretiva antes que o erro fique demasiadamente grande.

Para o sistema (3.15), a lei de controle PD é dada por

$$a^e(t) = K_p e(t) + K_d \dot{e}(t) + \ddot{\eta}_{ref}(t), \quad (3.16)$$

na qual o sinal de erro é

$$e(t) := \eta_{ref}(t) - \eta(t), \quad (3.17)$$

$\eta_{ref}(t)$ é a trajetória de referência a ser rastreada e $\ddot{\eta}_{ref}(t)$ é a aceleração da trajetória de referência, que é adicionada para reduzir o erro de rastreamento (ROSARIO, 2017).

Este controlador permite escolher as posições dos autovalores da malha fechada. Para determinar os ganhos do controlador pelo método de posicionamento de autovalores, são calculadas as raízes da equação característica da malha fechada, na qual para o caso escalar é

$$s^2 + k_d s + k_p = 0. \quad (3.18)$$

Para que uma resposta transitória estável e superamortecida seja obtida, as raízes da equação (3.18) devem ser reais e negativas. A partir destas características, pode-se fazer

$$s^2 + k_d s + k_p = (s - \lambda_1)(s - \lambda_2), \quad (3.19)$$

na qual $\lambda_1 < 0$ e $\lambda_2 < 0$ são os autovalores desejados. Desta forma, a partir da solução de (3.19) pode-se escolher os ganhos pelas seguintes relações para o caso escalar

$$k_p = \lambda_1 \lambda_2, \quad k_d = -(\lambda_1 + \lambda_2). \quad (3.20)$$

Para que os autovalores dos três graus de liberdade sejam iguais, os ganhos da lei de controle multivariável (3.16) são

$$K_p = k_p I, \quad K_d = k_d I, \quad (3.21)$$

onde I é a matriz identidade 3×3 .

O diagrama de blocos da Figura 12 representa o controle Proporcional-Derivativo

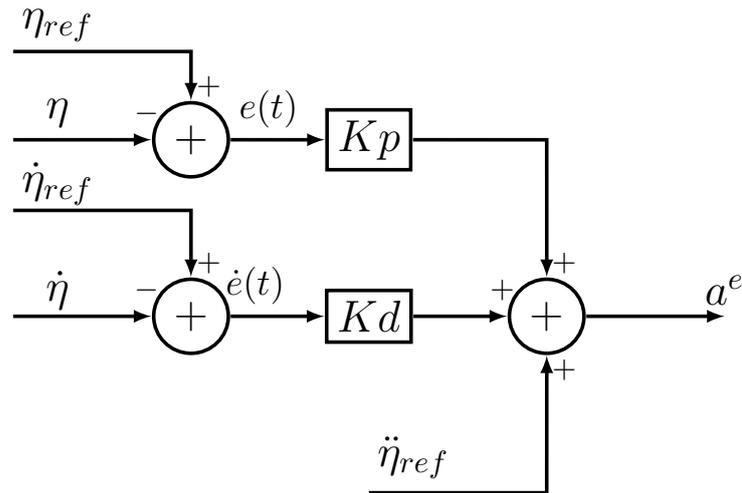


Figura 12: Diagrama de blocos do controle PD.

3.5 CONTROLADOR PID

O controle PD apresenta erro de rastreamento, pois existe uma dificuldade em seguir corretamente uma trajetória definida enquanto sofre perturbações assimétricas. Para corrigir este problema podemos acrescentar a ação integral ao controle apresentado anteriormente, formando assim um controlador PID.

A inclusão de uma ação de controle integral tende a eliminar o erro estacionário ou erro residual, no entanto ele pode conduzir a uma resposta oscilatória com uma amplitude que decresce lentamente, ou que cresce continuamente e ambas são indesejáveis (OGATA, 2011, Capítulo 5). Quando o controle PID é utilizado, é criado um controlador com alta sensibilidade com redução do erro atuante (3.17) fazendo com que a trajetória seja seguida mais fielmente, mesmo com interferência das perturbações.

Para o controle derivativo, foram lidas informações de velocidade de referência e velocidade da embarcação, não sendo necessário a derivação da respectivas posições.

Para o sistema (3.15), a lei de controle se modifica em relação a (3.16) tornando-se:

$$a^e(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \dot{e}(t) + \ddot{\eta}_{ref}(t). \quad (3.22)$$

Exitem várias formas de escolher os melhores ganhos para este controlador, Ogata (2011) apresenta por exemplo o método de *Ziegler Nichols*. Aguiar e Serra (2016) apresentam uma forma de alocação de polos para sistemas dinâmicos com atraso puro no tempo, entre outras formas. Iremos calcular os ganhos do controlador pelo método de posiciona-

mento de autovalores. Assim como no controle PD, as raízes da equação característica de malha fechada são calculadas, para o caso escalar:

$$s^3 + K_d s^2 + K_p s + K_i = 0 \quad (3.23)$$

Para este sistema, são escolhidos pólos para que o sistema tenha uma resposta transitória estável e superamortecida, assim como no controlador PD. Para isto, é necessário que os pólos do controlador sejam reais e negativos. A partir destas características, pode-se fazer

$$s^3 + k_d s^2 + k_p s + k_i = (s - \lambda_1)(s - \lambda_2)(s - \lambda_3), \quad (3.24)$$

onde $\lambda_1 < 0$, $\lambda_2 < 0$ e $\lambda_3 < 0$ são os autovalores desejados. Desta forma, a partir da solução de (3.24) é possível escolher os ganhos pelas seguintes relações para o caso escalar

$$k_p = (\lambda_1 \lambda_2) + (\lambda_1 \lambda_3) + (\lambda_2 \lambda_3), \quad k_d = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3), \quad k_i = -\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad (3.25)$$

Para que os autovalores dos três graus de liberdade sejam iguais, os ganhos da lei de controle multivariável (3.25) são

$$K_p = k_p I, \quad K_d = k_d I, \quad K_i = k_i I \quad (3.26)$$

onde I é a matriz identidade 3×3 .

O diagrama de blocos da Figura 13 representa o PID.

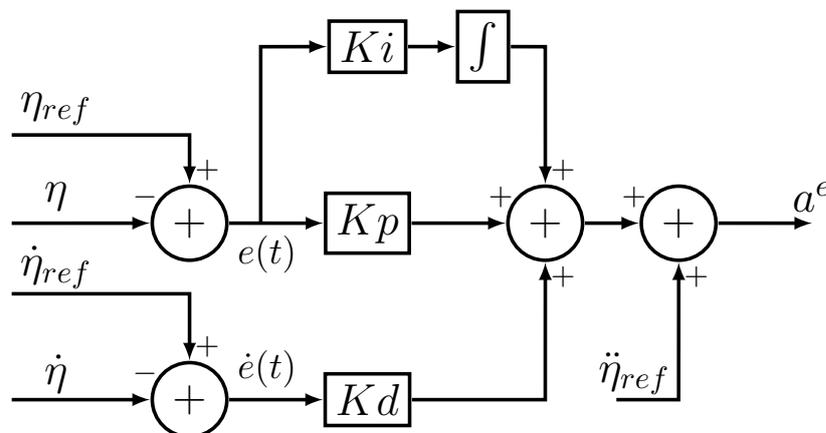


Figura 13: Diagrama de blocos do controle PID.

4 RASTREAMENTO DE TRAJETÓRIA COM CONTROLE POR MODO DESLIZANTE

O controle por modo deslizante (SMC) tem se tornado uma estratégia de controle popular em controle automático (TRIVEDI; BANDYOPADHYAY, 2021a). A idéia base deste controle é reduzir o problema de controle de um sistema genérico, descrito por equações não lineares de ordem n , para um sistema de primeira ordem. O controle por modo deslizante é capaz de rejeitar os efeitos de perturbações casadas com o sinal de controle, tais como a perturbação de entrada no modelo (3.15). De acordo com Melo (2017) e Aydin e Coban (2016), o projeto de um controlador por modo deslizante se divide em duas partes. Na primeira, deve-se projetar uma superfície no espaço de estado na qual o modo deslizante desenvolva uma trajetória de acordo com as especificações desejadas. Na segunda parte, projeta-se uma lei de controle que obedeça as condições de existência do modo deslizante e torne a superfície de deslizamento atrativa, independentemente de perturbações. Diversas técnicas para desenvolver essas etapas são bem apresentadas em (EDWARDS; SPURGEON, 1998) e (UTKIN, 1992). Em comparação a outros controladores, o controle por modo deslizante é superior em relação a rejeição de perturbações, robustez para variação de parâmetro e tem uma simples implementação. Um problema do SMC é o “*chattering*” que é a ocorrência de oscilações com alta frequência e amplitude (AYDIN; COBAN, 2016). Estas oscilações são causadas pelo chaveamento em alta frequência da excitação do SMC na dinâmica não modelada da planta (UTKIN, 1992). Para superar o efeito do “*chattering*” é possível utilizar outras funções no lugar da função sinal no termo de controle de comutação (4.1). A lei de controle do SMC é descrita da seguinte forma:

$$a^e = -\rho(t)\text{sign}(\sigma), \quad (4.1)$$

onde $\rho(t) > 0$ é a função de modulação que estabelece a amplitude do sinal de controle e σ é o sinal da superfície de deslizamento. O controle deve ser projetado para que a superfície de deslizamento $\sigma = 0$ seja atingida em tempo finito.

Dado um sistema descrito por equações de estado, sendo a entrada um termo descontínuo através de uma superfície definida no espaço de estado, a metodologia do SMC consiste em projetar uma lei de controle capaz de fazer com que todas as trajetórias desse sistema converjam para a tal superfície, denominada superfície de deslizamento

(σ). A dinâmica da superfície deve ser escolhida pelo projetista de modo que todas as trajetórias dentro da superfície σ convirjam para os valores desejados. Após a trajetória atingir a superfície deslizante, é possível dizer que o sistema está operando em modo deslizante (AGOSTINHO, 2009). Para encontrar a lei de controle a^e , assim como no controle PD e PID, o erro de rastreamento é definido como

$$e(t) = \eta_{ref}(t) - \eta(t), \quad (4.2)$$

onde

$e(t)$ é o erro de rastreamento;

η_{ref} é o sinal de saída de referência;

η é o sinal de saída medido.

Este sinal de erro será usado tanto no Controle Vetorial Unitário quanto no Controle Adaptativo que serão apresentados adiante.

A superfície deslizante pode ser representada por (SLOTINE; LI, 1991):

$$\sigma(t) = \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right)^{n-1} e(t), \quad (4.3)$$

onde λ é uma constante positiva e n é a ordem do sistema. Para um sistema de ordem $n=2$, a partir da equação (4.3) temos:

$$\sigma(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t), \quad (4.4)$$

Fazendo com que a trajetória da embarcação seja igual a trajetória de referência, ou seja, o erro $e(t) = 0$ faz com que $\sigma(t) = 0$ na equação (4.4) construindo uma superfície adequada para o deslizamento enquanto $e(t) \rightarrow 0$ e $t \rightarrow \infty$. O erro $e(t)$ vai pra zero quando $\sigma = 0$ apesar das incertezas e perturbações. Neste trabalho o sistema tem três DOF, em que cada DOF é um sistema de segunda ordem. Desta forma, a equação (4.4) se torna:

$$\sigma(t) = \dot{e}(t) + \Lambda e(t) \quad (4.5)$$

onde $-\Lambda$ escolhida pelo projetista deve ser uma matriz Hurwitz para especificar a dinâmica da convergência do erro.

4.1 CONTROLE VETORIAL UNITÁRIO

Como dito anteriormente, existem algumas formas de reduzir o efeito do “*chattering*”, uma delas é a implementação do controle vetorial unitário. O Controle Vetorial Unitário é o controle mais conveniente para sistemas com estruturas multivariáveis (EDWARDS; SPURGEON, 1998).

O objetivo deste controle é alcançar a estabilidade global e convergência em uma pequena vizinhança da superfície de deslizamento ($\sigma(t)$) na origem. A superfície de deslizamento σ também pode representar o rastreamento do erro com respeito a uma determinada trajetória. Por isto, a estabilidade da variável σ implica no rastreamento do sinal de referência.

Com isto, a perturbação pode ser rejeitada pela lei de controle:

$$a^e = U + \Lambda \dot{e}(t) + \ddot{\eta}_{ref}(t), \quad (4.6)$$

onde o sinal de controle é

$$U = S_p \rho(t) \frac{\sigma}{\|\sigma\|}, \quad (4.7)$$

sendo a matriz $S_p \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$, $S_p^T = S_p > 0$, escolhida pelo projetista para equalizar as amplitudes do sinal de controle $U \in \mathfrak{R}^3$ e σ é o sinal da superfície de deslizamento dada pela equação (4.5). O sinal de modulação $\rho(t)$ deve satisfazer a inequação:

$$\rho(t) \geq \|S_p^{-1} d(t)\| + \delta, \quad \forall t \geq 0, \quad (4.8)$$

onde $\delta > 0$ é uma constante arbitrária necessária para garantir convergência em tempo finito. Então garante-se que o modo deslizante na superfície $\sigma = 0$ será atingido em um tempo finito. Para se garantir que esta desigualdade seja sempre satisfeita, seria necessário conhecer algum majorante para a norma $\|d(t)\|$ que dispense a medição da perturbação $d(t)$, o que poderia resultar em algum procedimento muito conservador. O conservadorismo seria indesejável pois acarretaria em um controle de grande amplitude, desperdício de energia e o agravamento do fenômeno “*chattering*”.

Substituindo o sinal de controle (4.7) na lei de controle (4.6) encontramos a nova lei de controle

$$a^e = S_p \rho(t) \frac{\sigma}{\|\sigma\|} + \Lambda \dot{e}(t). \quad (4.9)$$

Desta forma, substituindo (4.9) em (3.15) a dinâmica da embarcação linearizada torna-se:

$$\ddot{\eta}(t) = \ddot{\eta}_{ref}(t) + S_p \rho(t) \frac{\sigma}{\|\sigma\|} + \Lambda \dot{e}(t) + d(t). \quad (4.10)$$

O diagrama de blocos Figura 14 representa o Controle Vetorial Unitário, onde Λ é o mesmo de (4.2) e a perturbação $d(t)$ continua por partes em t e satisfaz:

$$\|d(t)\| \leq d < +\infty, \quad \forall t \in \mathfrak{R}^+. \quad (4.11)$$

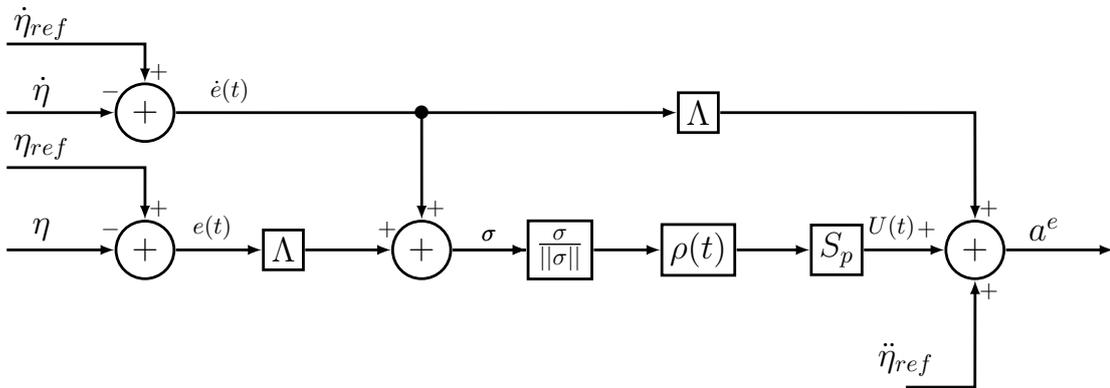


Figura 14: Diagrama de blocos do controle UVC.

4.1.1 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Para analisar a estabilidade com a lei de controle (4.9), deriva-se duas vezes a equação (4.2), já que o sistema tem grau relativo dois, obtendo-se

$$\ddot{e}(t) = \ddot{\eta}_{ref} - \ddot{\eta}. \quad (4.12)$$

Combinando as equações (4.10) em (4.12), temos:

$$\ddot{e}(t) = -S_p \rho(t) \frac{\sigma}{\|\sigma\|} - \Lambda \dot{e}(t) - d(t). \quad (4.13)$$

A derivada de (4.5) é

$$\dot{\sigma} = \ddot{e}(t) + \Lambda \dot{e}(t). \quad (4.14)$$

Substituindo (4.13) em (4.14), resulta

$$\dot{\sigma} = -S_p \rho(t) \frac{\sigma}{\|\sigma\|} - d. \quad (4.15)$$

Utiliza-se a função de *Lyapunov* (KHALIL, 2002, Capítulo 4)

$$V(\sigma) = \frac{\sigma^T S_p^{-1} \sigma}{2} \quad (4.16)$$

com $S_p^T = S_p > 0$. Derivando-se (4.16), obtém-se:

$$\dot{V}(\sigma) = \sigma^T S_p^{-1} \dot{\sigma}. \quad (4.17)$$

Substituindo (4.15) em (4.17) obtém-se

$$\dot{V}(\sigma) = -\rho(t)\|\sigma\| - \sigma^T S_p^{-1} d(t) \leq -\rho(t)\|\sigma\| + \|S_p^{-1} d(t)\|\|\sigma\|, \quad (4.18)$$

Escolhendo-se uma função de modulação que satisfaça a desigualdade (4.18)

$$\rho(t) \geq \|S_p^{-1} d(t)\| + \delta, \quad \forall t \geq 0, \quad (4.19)$$

resultará em

$$\dot{V} \leq -\delta\|\sigma\| < 0, \quad \sigma \neq 0. \quad (4.20)$$

Sendo assim, o estado atinge a superfície de deslizamento $\sigma = 0$ em tempo finito. Como $\sigma(t) \rightarrow 0$ e a matriz $-\Lambda$ é Hurwitz. É possível verificar que da equação (4.5)

$$\sigma(t) = \dot{e}(t) + \Lambda e(t), \quad (4.21)$$

de onde se obtém

$$0 = \dot{e}(t) + \Lambda e(t), \quad (4.22)$$

que equivale a

$$\dot{e}(t) = -\Lambda e(t), \quad (4.23)$$

a qual permite concluir que o erro (4.2) converge exponencialmente para a origem. Já que $V(\sigma)$ é radialmente ilimitada, pode-se concluir que este sistema de controle é globalmente assintoticamente estável.

4.2 CONTROLE POR MODO DESLIZANTE ADAPTATIVO

Para o funcionamento do controle por modo deslizante há a necessidade de conhecimento de algum majorante da perturbação, para que a função de modulação satisfaça $\rho > \|d\|$ e, desta forma, o estado convirja para a superfície de deslizamento $\sigma = 0$. O avanço que o controle por modo deslizante adaptativo propõe é que não haja a necessidade de conhecimento prévio da perturbação nem da sua magnitude. O valor de $\rho(t)$ se adapta conforme a necessidade, o que reduz o consumo de energia e o desgaste dos atuadores.

Cheng, Yi e Zhao (2007) apresentaram um controle adaptativo por modo deslizante que foi inspiração para o desenvolvimento deste controlador. Assim como neste trabalho, foi utilizado o controle de linearização por realimentação para anular as não linearidades da dinâmica da embarcação e em seguida aplicado o controle por modo deslizante adaptativo. Porém, na estratégia utilizada, a lei de controle era composta por um controle equivalente e outro chaveado.

Melo (2017) apresentou no Capítulo 4 da sua dissertação, o controle por estrutura variável com adaptação baseada no controle equivalente estendido (OLIVEIRA; CUNHA; HSU, 2016). Esta abordagem tem como vantagem a sua simplicidade e a possibilidade de resistir a perturbações não suaves. Tanto nos trabalhos citados anteriormente quanto nesta Dissertação, foi utilizado o controle equivalente para estimar a perturbação, e em seguida aplicada uma lei de controle adaptativa.

4.2.1 CONTROLE EQUIVALENTE

Na prática, o modo deslizante ideal não é alcançável, pois imperfeições como atrasos, histereses e dinâmicas não modeladas resultam no movimento de “*chattering*” na vizinhança da superfície de deslizamento (EDWARDS; SPURGEON, 1998). Para superar algumas destas dificuldades, foi implementado o controle equivalente (U_{eq}) que estima as perturbações.

Este controle foi formalmente discutido por Utkin (1992). Edwards e Spurgeon (1998, Capítulo 3.3) relatam que o método do controle equivalente mais intuitivo foi proposto por (UTKIN, 1977). De forma mais abrangente, o controle equivalente é a ação necessária para manter o modo deslizante na superfície de deslizamento.

Trivedi e Bandyopadhyay (2021b) apresentaram o método de controle equivalente

onde um Sistema Linear Invariante no Tempo (LTI) na forma canônica é do tipo

$$\dot{x} = Ax + bu, \quad (4.24)$$

onde $x \in \mathfrak{R}^n$ e $u \in \mathfrak{R}$. O objetivo era projetar um controle por modo deslizante para (4.24) considerando uma função de chaveamento como $\sigma(x) : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$. Assumindo que a função de chaveamento $\sigma(x)$ tem grau relativo um em relação a (4.24). Pode-se representar $\sigma(x)$ como

$$\sigma(x) = Sx \equiv (S_1 1)x, \quad (4.25)$$

onde $S_1 \in \mathfrak{R}^{1 \times n-1}$. O controle equivalente pode ser definido como em Edwards e Spurgeon (1998, Capítulo 3) da seguinte forma:

$$\dot{\sigma}(x) = 0, \quad S(Ax + Bu_{eq}) = 0, \quad u_{eq} = -(SB)^{-1}SAx, \quad (4.26)$$

onde SB é uma matriz não singular. Assumindo que B tem *rank* completo e S é um parâmetro do projeto. Portanto, o controle equivalente é único. Ao substituir (4.26) em (4.24) encontramos o modo deslizante ideal como

$$\dot{x}(t) = (I_n - B(SB)^{-1}S)Ax(t), \quad \forall t > t_s, Sx(t_s) = 0, \quad (4.27)$$

onde t_s é o tempo durante o estado do sistema até atingir o modo deslizante.

O controle equivalente funciona apenas durante o modo deslizante, porém (OLIVEIRA; CUNHA; HSU, 2016) apresentaram preliminarmente um controle equivalente estendido (u_{xeq} que foi complementado por Melo (2017)). Este controle foi desenvolvido para que o método do controle equivalente seja válido para todo o tempo, independente da presença do modo deslizante.

Em geral, u_{xeq} não é um sinal disponível para implementar no controle. Entretanto, em sistemas afins, esse coincide com uma componente de baixa frequência do sinal de controle u , na presença de modo deslizante. Sendo assim, é possível estimar um controle médio (u_{av}) aplicando um sinal de controle em um filtro com constante de tempo $\tau > 0$ pequena o bastante se comparada com a componente lenta de u , mas grande o suficiente para filtrar o chaveamento da alta frequência em u (MELO, 2017). Sendo assim, o filtro

passa-baixas

$$\tau \dot{U}_{av} = -U_{av} + U, \quad (4.28)$$

gera o controle médio que serve como uma estimativa da u_{xeq} .

4.2.2 LEI ADAPTATIVA

A seguir são apresentadas algumas hipóteses sobre a perturbação semelhantes às aquelas assumidas em (OLIVEIRA; CUNHA; HSU, 2016; MELO, 2017) para o caso do controle escalar, aqui adaptadas para o controle vetorial unitário.

O desenvolvimento do controle aqui exposto foi apresentado em (BARBAS; CUNHA; GARCIA-ROSA, 2021) no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2021).

Hipótese 1 (H1) *A perturbação de entrada $d(t)$ é desconhecida, integrável localmente e possui norma limitada por $\|d(t)\| \leq \bar{d} < +\infty, \forall t$, na qual \bar{d} é um escalar desconhecido.*

Hipótese 2 (H2) *Assume-se conhecido um escalar $\bar{d}_0 \geq \|d(0)\|$.*

Hipótese 3 (H3) *Há constantes conhecidas $c_f > \gamma_f > 0$ e $\tau > 0$ tais que a desigualdade*

$$\|d(t)\| \leq c_f e^{-\gamma_f t} * \|\tau^{-1} e^{-t/\tau} * d(t)\| + e^{-\gamma_f t} \bar{d}_0, \quad (4.29)$$

seja satisfeita $\forall t \geq 0$, na qual τ é a constante de tempo do filtro de média, c_f é o ganho de alta frequência da lei adaptativa e γ_f é o seu fator de esquecimento.

O sinal de modulação do UVC (4.10) é gerado pela lei de adaptação:

$$\dot{\rho}(t) = -\gamma_f \rho(t) + c_f (\|U_{xeq}(t)\| + \Delta), \quad \rho(0) \geq \bar{d}_0 + \delta, \quad (4.30)$$

na qual $U_{xeq}(t)$ é o sinal de *controle equivalente estendido* do controle vetorial unitário U e $\Delta \geq \delta \gamma_f c_f^{-1} > 0$ é uma constante escolhida para garantir a mínima amplitude de controle desejada δ , vide desigualdade (4.8).

Na ausência de modo deslizante, $\|U_{xeq}(t)\| = \rho(t)$. Quando ocorrer o modo deslizante, então o sinal de controle U rejeita a perturbação, logo $U_{xeq}(t)$ converge para $d(t)$. Assim,

antes de atingir o modo deslizante,

$$\dot{\rho}(t) = (c_f - \gamma_f)\rho(t) + c_f\Delta \quad (4.31)$$

é uma expressão equivalente à equação diferencial (4.30) quando $\|U_{xeq}(t)\| = \rho(t)$. Da Hipótese **H3**, conclui-se que $c_f - \gamma_f > 0$, então $\rho(t)$ crescerá exponencialmente superando a magnitude da perturbação a partir de algum momento, de forma que a superfície de deslizamento seja atingida em tempo finito.

Após a superfície de deslizamento ser atingida, a adaptação é feita pelo filtro (4.30), cuja entrada é a estimativa de $\|d(t)\|$ dada pelo controle equivalente. Então, o sinal de modulação é a solução da equação diferencial (4.30):

$$\rho(t) = e^{-\gamma_f t} \rho(0) + c_f e^{-\gamma_f t} * (\|U_{xeq}(t)\| + \Delta), \quad t \geq 0. \quad (4.32)$$

Entretanto, o controle equivalente estendido U_{xeq} não é um sinal disponível. Contudo, o mesmo pode ser aproximado pela componente de baixa frequência do sinal de controle U quando ocorrer o modo deslizante. De acordo com Utkin (1992), o controle médio U_{av} pode servir como uma estimativa de U_{xeq} . O controle médio pode ser obtido por um filtro passa-baixas

$$\tau \dot{U}_{av}(t) = -U_{av}(t) + U. \quad (4.33)$$

A desigualdade (4.29) na Hipótese 3 pode ser obtida a partir de (4.8) e (4.32) pela inclusão do efeito do filtro de média (4.33).

O diagrama de blocos da Figura 15 representa o controle por modo deslizante adaptativo.

Foi proposto uma matriz $S_p \in \Re^{m \times m}$, $S_p^T = S_p > 0$ de projeto escolhida pelo projetista para balancear os ganhos nos propulsores.

4.2.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

O controle adaptativo desenvolvido nesta Dissertação é baseado no controle vetorial unitário. Desta forma, parte da análise de estabilidade é parecida com aquela apresentada na Seção 4.1.1, onde as equações de erro (4.2) e sua derivada segunda (4.12), superfície de deslizamento (4.4), sua derivada (4.14) e a lei de controle (4.10) são iguais. Desta forma,

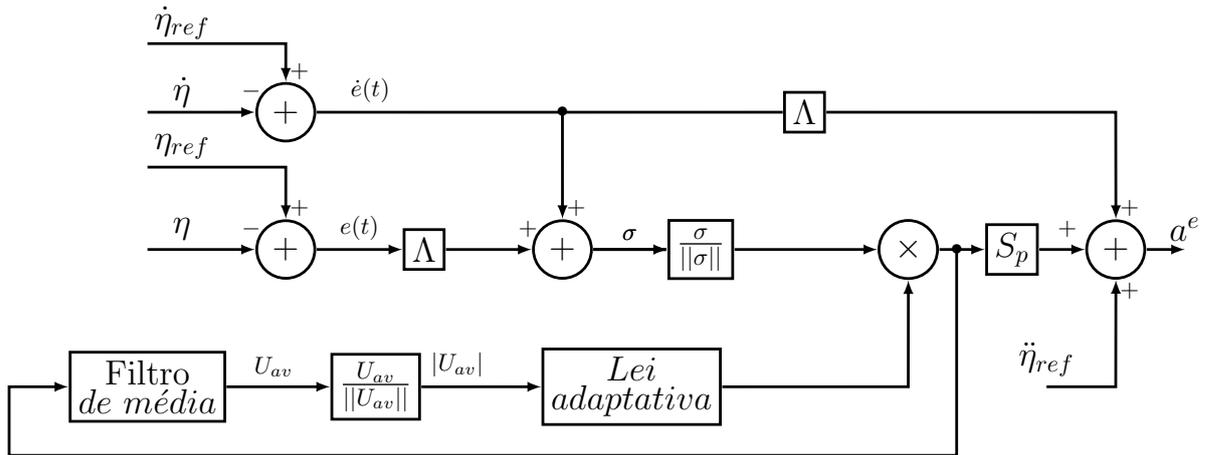


Figura 15: Diagrama de blocos do controle por modo deslizante adaptativo.

ao escolher a mesma função de *Lyapunov* (4.16) encontra-se como sua derivada

$$\dot{V}(\sigma) = -\rho(t)\|\sigma\| - \sigma^T S_p^{-1} d(t) \leq -\rho(t)\|\sigma\| + \|S_p^{-1}\| \|d(t)\| \|\sigma\|. \quad (4.34)$$

Para que o controlador seja estável, (4.34) < 0 , ou seja:

$$-\rho(t)\|\sigma\| + \|S_p^{-1}\| \|d(t)\| \|\sigma\| \leq 0 \quad (4.35)$$

fazendo a desigualdade

$$\rho(t) \geq \|S_p^{-1}\| \|d(t)\|. \quad (4.36)$$

A hipótese **H3** exige que a perturbação seja limitada por

$$\|d(t)\| \leq c_f e^{-\gamma_f t} * \|\tau^{-1} e^{-t/\tau} * d(t)\| + e^{-\gamma_f t} \bar{d}_0. \quad (4.37)$$

Logo, fazendo (4.37) em (4.36) tem-se

$$\rho(t) \geq \|S_p^{-1}\| [e^{-\gamma_f t} \bar{d}_0 + c_f e^{-\gamma_f t} * \|\tau^{-1} e^{-t/\tau} * d(t)\|] \geq \|S_p^{-1}\| \|d(t)\|. \quad (4.38)$$

A análise de estabilidade do controle adaptativo divide-se em duas partes, antes de encontrar a superfície de deslizamento e após encontrar a superfície de deslizamento.

É possível verificar que o primeiro termo da inequação (4.38) refere-se a condição inicial que decai exponencialmente para zero e o segundo termo de acordo com a hipótese **H3**, onde $c_f > \gamma_f > 0$, cresce exponencialmente. Como de acordo com a hipótese **H1** $d(t)$

é limitada, então $\rho(t) > d(t)$ em um tempo finito t_m . Desta forma, o modo deslizante é atingido em um tempo finito. Após alcançado o modo deslizante, pode-se considerar que

$$|U_{av}| = \|\tau^{-1}e^{-t/\tau} * d(t)\|. \quad (4.39)$$

Logo, a partir da hipótese **H3** é possível concluir que $\rho(t) > d(t)$, $\forall t \geq t_m$ e o modo deslizante é mantido indefinidamente. Desta forma, o sistema tende exponencialmente a zero quando $\sigma = 0$, que demonstra que o sistema é globalmente assintoticamente estável.

5 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas simulações realizadas em um modelo de embarcação do tipo *supply vessel*, amplamente utilizado na indústria marítima. As simulações foram baseadas nas informações apresentadas nos capítulos anteriores e em características da embarcação.

Inicialmente serão simuladas as perturbações apresentadas no Capítulo 2. Para um melhor entendimento do comportamento das perturbações, as mesmas foram simuladas de forma separada (correnteza, onda, vento) e para melhor entendimento cada uma será simulada com três características diferentes.

5.1 SIMULAÇÃO DAS PERTURBAÇÕES AMBIENTAIS

As perturbações simuladas nesta Dissertação e apresentadas neste capítulo foram calculadas utilizando blocos disponíveis do *toolbox Marine Systems Simulator* (MSS) (FOSSEN; PEREZ, 2004).

A trajetória a qual a embarcação percorre foi definida na seção 3.1 e é de grande importância para o desenvolvimento das simulações das perturbações, pois a variação de posição da embarcação causa variação no ângulo de ataque das perturbações e com isso uma variação na força e momento da mesma durante o movimento da embarcação.

As simulações das perturbações de onda e correnteza foram utilizadas em (BARBAS; CUNHA; GARCIA-ROSA, 2021).

5.1.1 CORRENTEZA

Para um melhor entendimento da correnteza apresentada na seção 2.3, essas foram simuladas variando sua velocidade segundo a Tabela 4.

A partir dos modelos da Tabela 4 são gerados os gráficos de força e momento gerado pela correnteza e apresentados nas Figuras 16 a 18.

5.1.2 ONDAS

Para um melhor entendimento das ondas apresentadas na seção 2.2, foram simulados três tipos de estados de mar, a partir da Tabela 3, variando a altura da onda H_s , de modo

Tabela 4: Modelos da correnteza

Modelo	Símbolo	Descrição	valor	Unidade
Modelo 1	V_c	Velocidade da correnteza	1	m/s
	α_c	Ângulo de ataque	$320 \times \frac{\pi}{180}$	rad
Modelo 2	V_c	Velocidade da correnteza	1,5	m/s
	α_c	Ângulo de ataque	$320 \times \frac{\pi}{180}$	rad
Modelo 3	V_c	Velocidade da correnteza	2,5	m/s
	α_c	Ângulo de ataque	$320 \times \frac{\pi}{180}$	rad

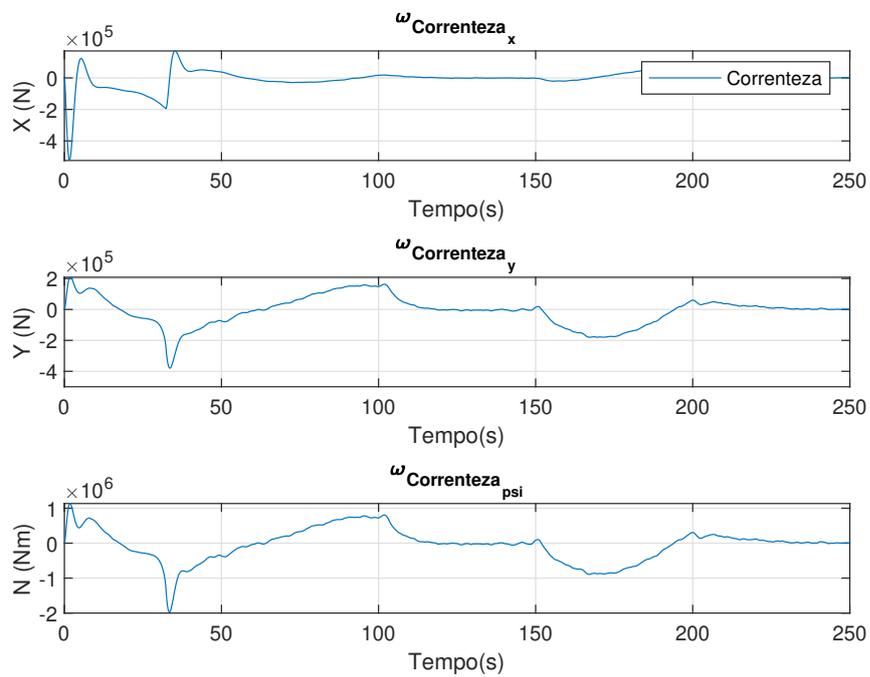


Figura 16: Comportamento das forças da correnteza a partir do modelo 1 da Tabela 4.

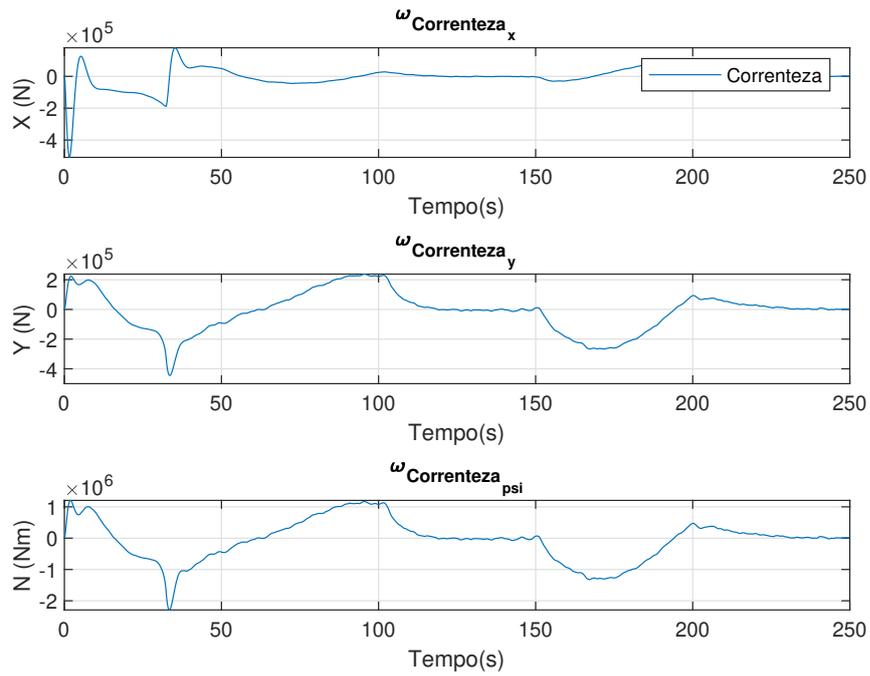


Figura 17: Comportamento das forças da correnteza a partir do modelo 2 da Tabela 4.

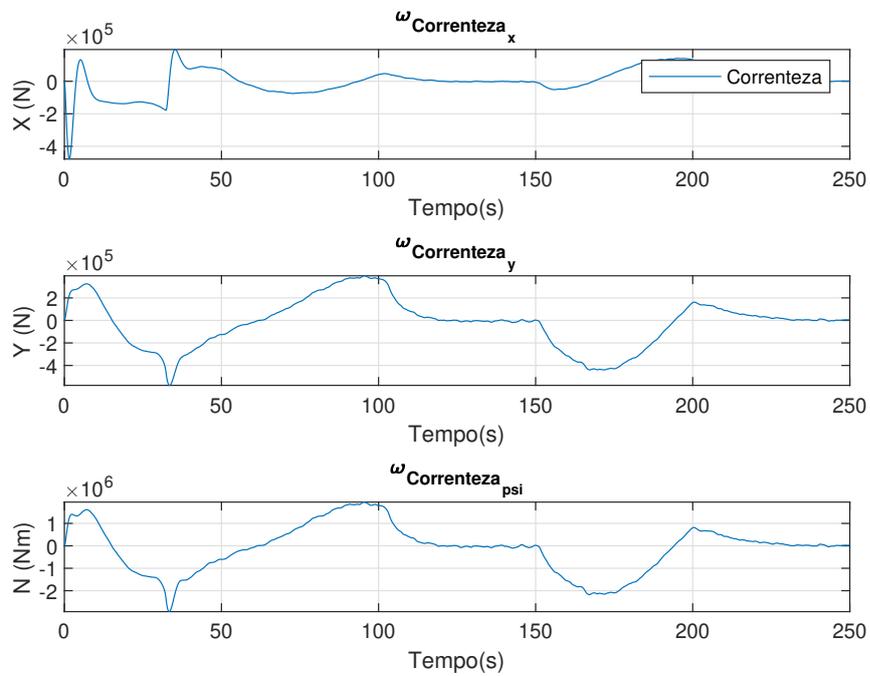


Figura 18: Comportamento das forças da correnteza a partir do modelo 3 da Tabela 4.

a simular condições do mar moderado, bravo e muito bravo. A seguir são apresentados os gráficos das ondas de alta frequência e baixa frequência a partir do espectro de JONSWAP. A cada simulação apresentamos dois gráficos, um de baixa frequência e outro de alta frequência. Desta forma, para um mar do tipo moderado, com altura de onda de 1,4 m, obtém-se os gráficos nas Figuras 19 e 20. Somando as duas ondas, é encontrada uma onda resultante que é apresentada no gráfico da Figura 21.

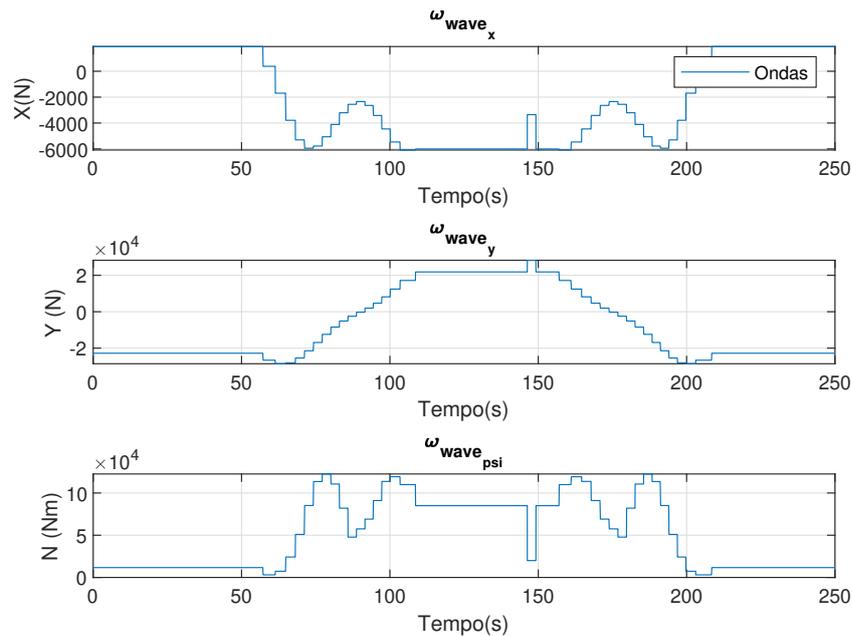


Figura 19: Comportamento das forças da onda de baixa frequência para um mar moderado.

As Figuras 22 e 23 apresentam os gráficos das ondas para um mar do tipo bravo. Somando as duas ondas, é encontrado uma onda resultante que é apresentada no gráfico da Figura 24.

Por último, são apresentados os gráficos das ondas para um mar do tipo muito bravo nas Figuras 25 a 27.

5.1.3 VENTO

Para um melhor entendimento do comportamento do vento, as forças e momentos do vento são simulados nesta seção, de acordo com as informações apresentadas na seção 2.1. Serão simulados de acordo com a Tabela 2 ventos do tipo brisa forte, vendaval moderado e vendaval forte, onde em cada um dos tipos foram variadas as velocidades do vento.

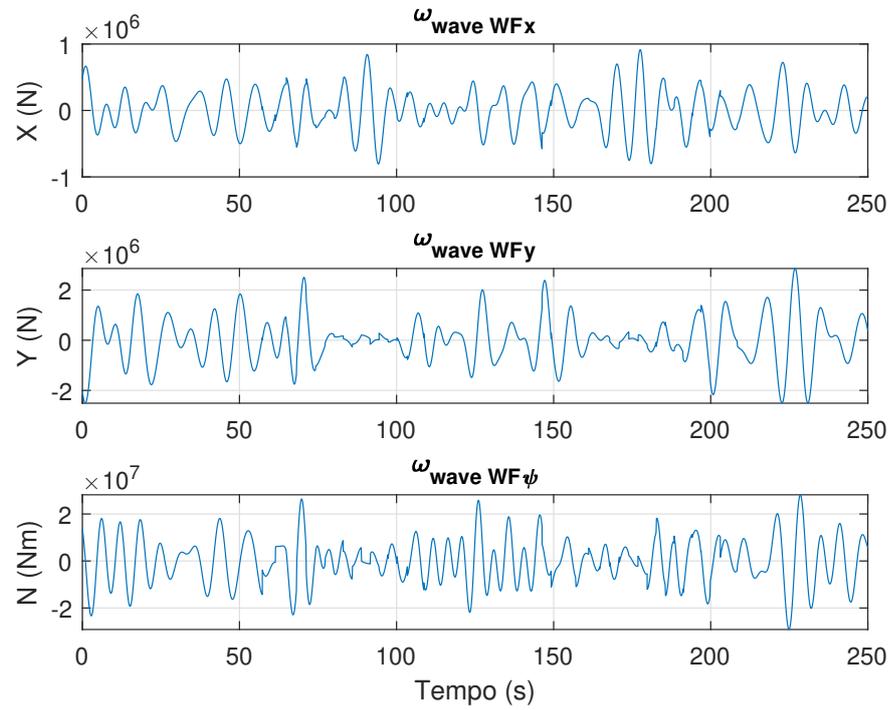


Figura 20: Comportamento das forças da onda de alta frequência para um mar moderado.

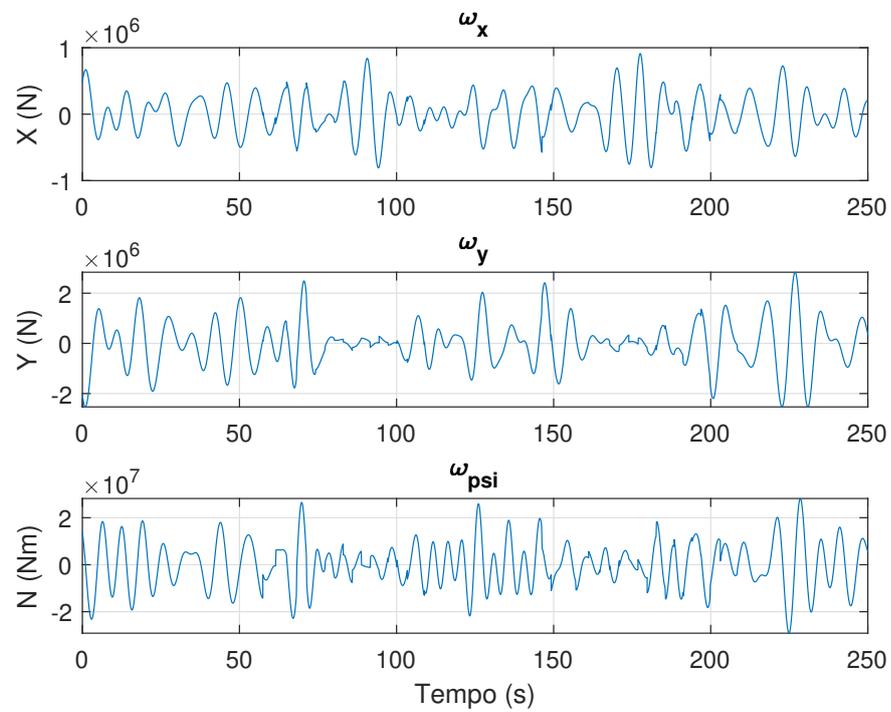


Figura 21: Comportamento da resultante das forças das ondas para um mar moderado.

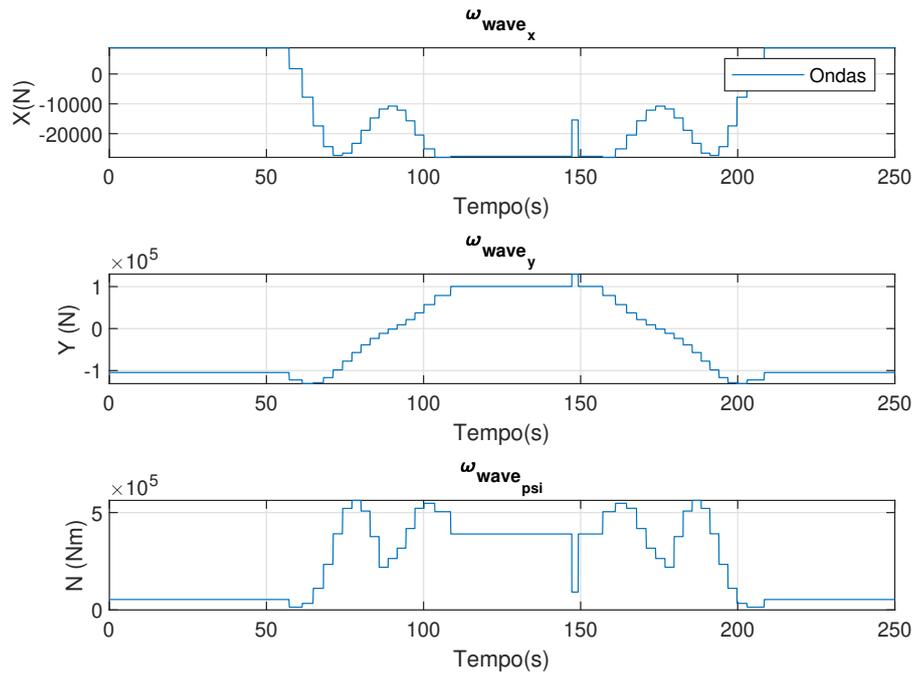


Figura 22: Comportamento das forças da onda de baixa frequência para um mar bravo.

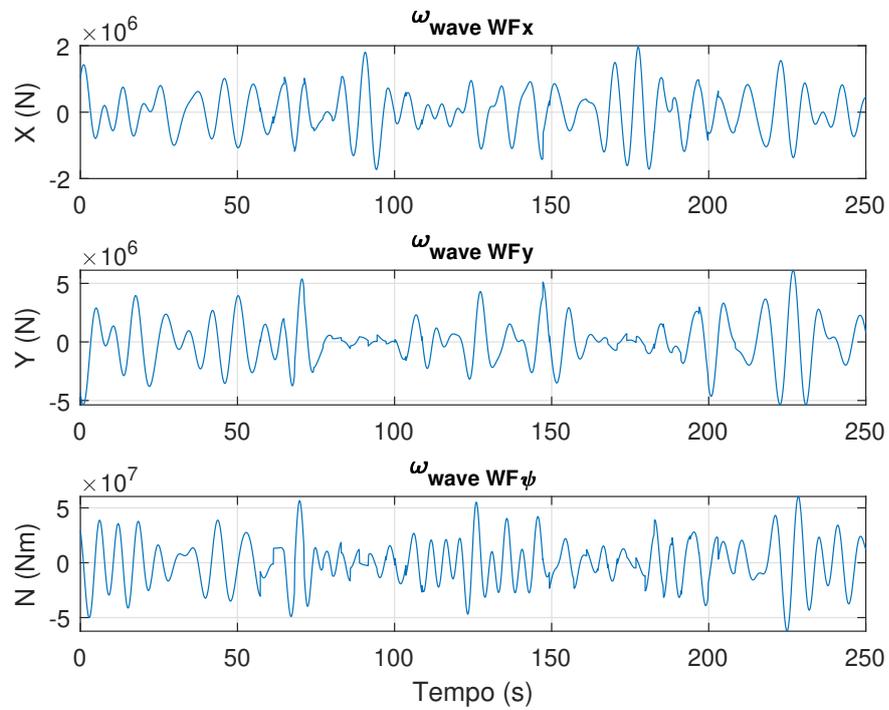


Figura 23: Comportamento das forças da onda de alta frequência para um mar bravo.

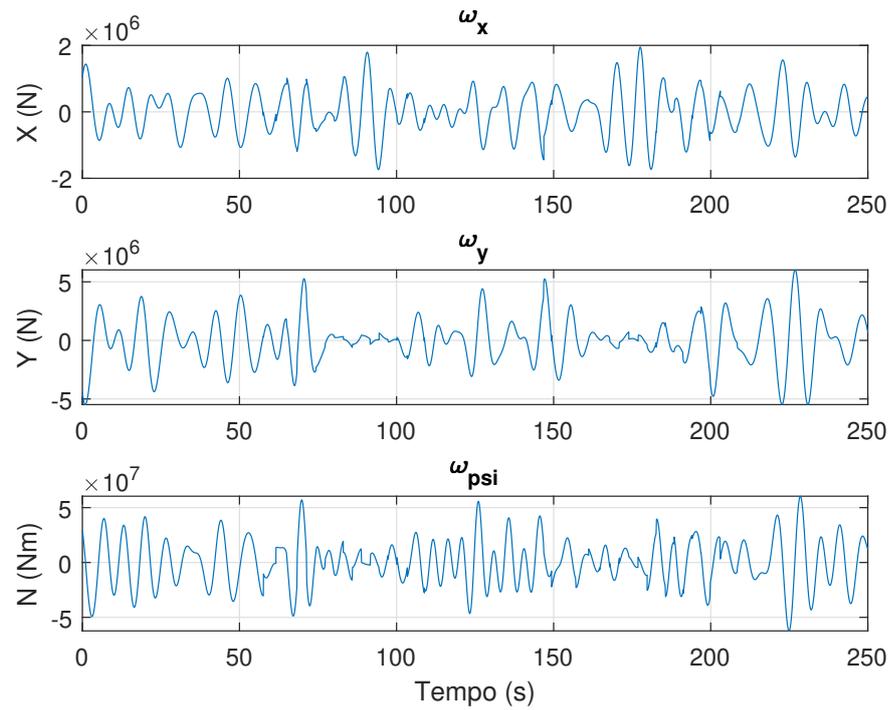


Figura 24: Comportamento da resultante das forças das ondas para um mar bravo.

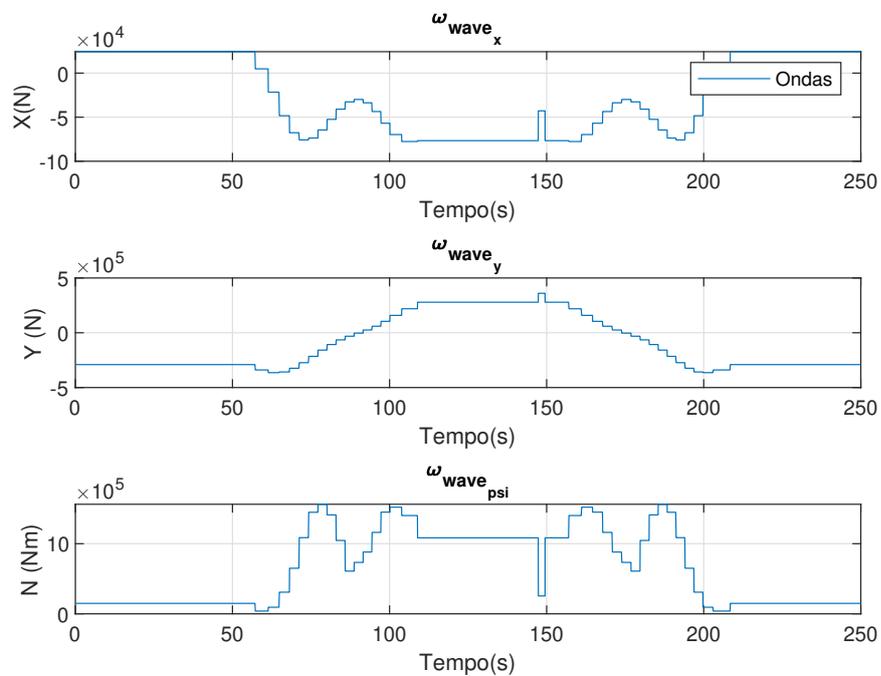


Figura 25: Comportamento das forças da onda de baixa frequência para um mar muito bravo.

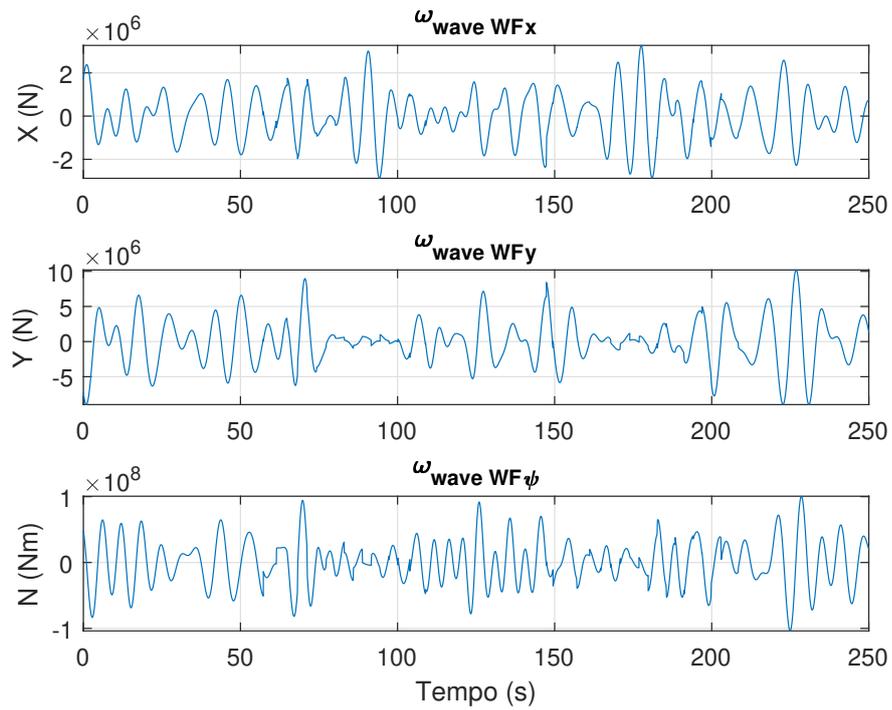


Figura 26: Comportamento das forças da onda de alta frequência para um mar muito bravo.

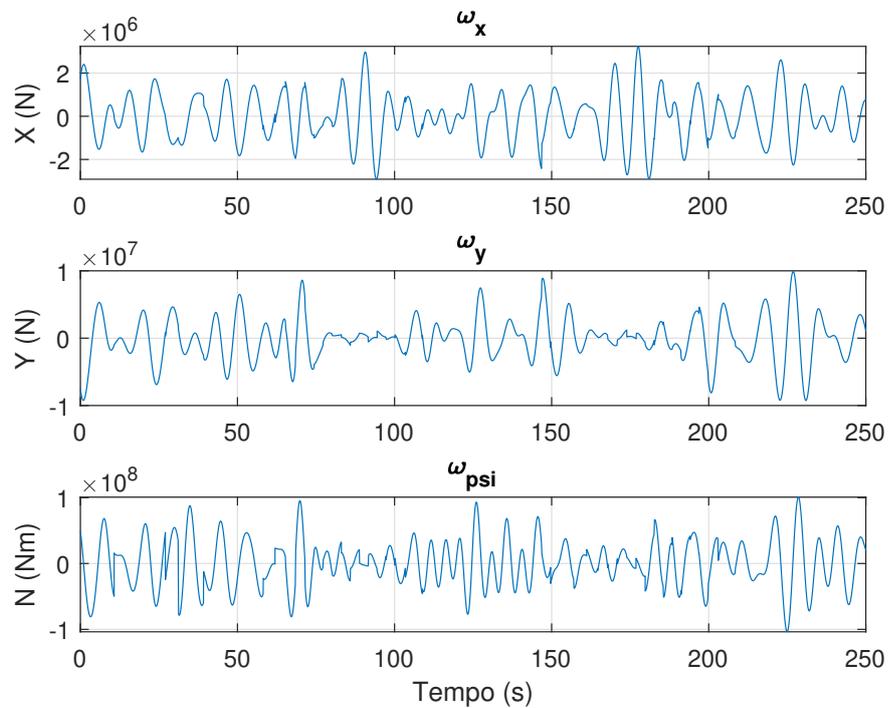


Figura 27: Comportamento da resultante das forças das ondas para um mar muito bravo.

Inicialmente foi simulado o modelo brisa forte que de acordo com a Tabela 2 tem velocidade entre 11,32 e 13,89 m/s (22 e 27 nós). Neste caso, foi simulada uma velocidade de 12,86 m/s (25 nós) apresentando o gráfico da Figura 28.

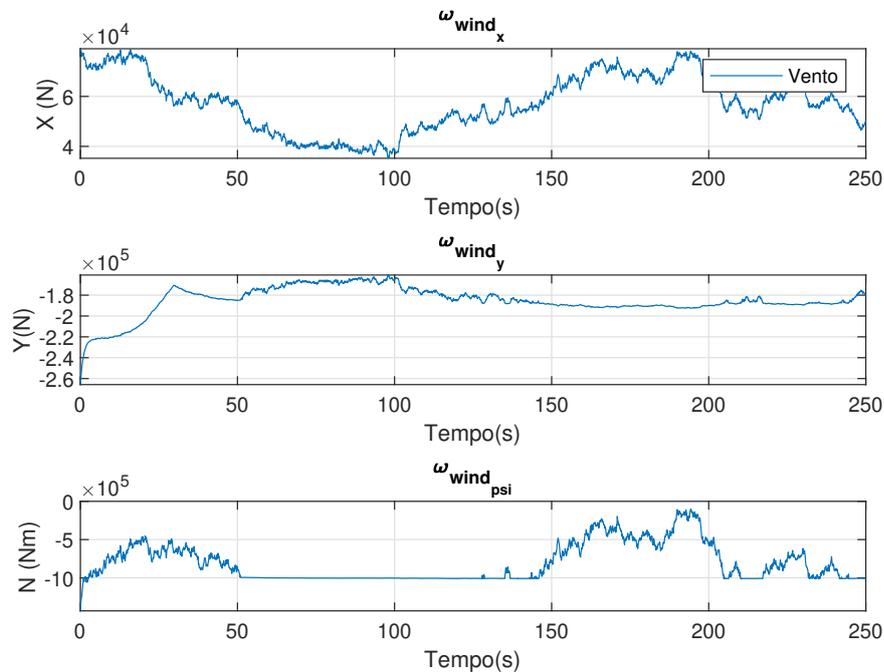


Figura 28: Comportamento da resultante da brisa forte.

Em seguida foi simulado o modelo vendaval moderado que de acordo com a Tabela 2 tem velocidade entre 14,4 e 16,98 m/s (28 e 33 nós). Neste caso, foi simulada uma velocidade de 15,43 m/s (30 nós) apresentando o gráfico da Figura 29.

E finalmente foi simulado o modelo vendaval forte que de acordo com Tabela 2 tem velocidade entre 21,09 e 24,69 m/s (41 e 48 nós). Neste caso, foi simulada uma velocidade de 23,15 m/s (45 nós) apresentando o gráfico da Figura 30.

5.1.4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

Nesta Dissertação, as simulações foram realizadas considerando o modelo de uma embarcação do tipo *supply vessel*, amplamente utilizada na indústria marítima. As características principais da embarcação são apresentadas na Tabela 5 (FOSSÉN, 2002). Para avaliar o desempenho do algoritmo de controle proposto, a embarcação deve seguir uma trajetória de referência curvilínea enquanto é submetida a perturbações ambientais.

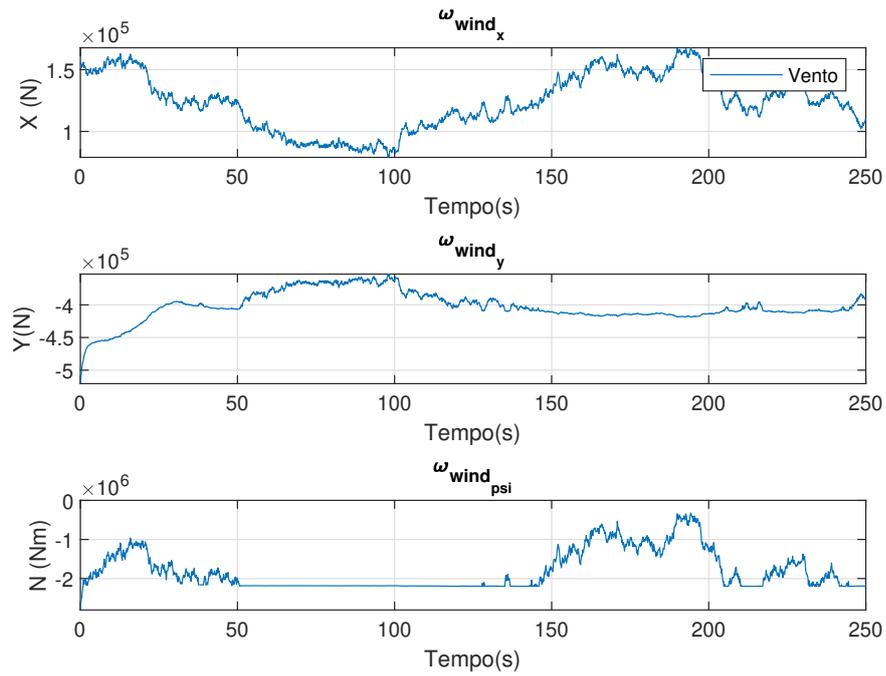


Figura 29: Comportamento da resultante vendaval moderado.

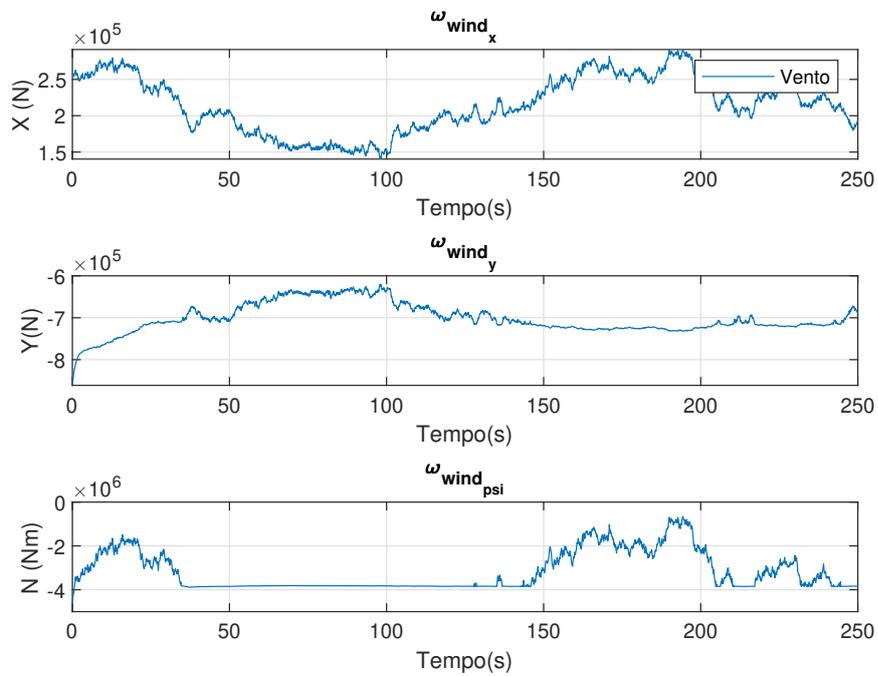


Figura 30: Comportamento da resultante vendaval forte.

Tabela 5: Características do *supply vessel*.

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Massa	m	3268×10^3	kg
Comprimento	L	74,3	m
Área lateral projetada	A_L	400	m ²
Área transversal projetada	A_T	1000	m ²
Boca	B	16,4	m
Comprimento do perímetro da projeção do modelo	S	50	m

Para o rastreamento da trajetória, foram aplicados os controladores apresentados anteriormente, i.e. controle PD, controle PID, controle por modo deslizante com função de modulação constante e controle por modo deslizante adaptativo.

O rastreamento da trajetória foi realizado com velocidade de 2,0 m/s (3,89 nós náuticos). As perturbações ambientais que foram apresentadas anteriormente, foram aplicadas ao mesmo tempo simulando um mar moderado com ondas de 1,4 m de altura e ventos considerados como um vendaval moderado com velocidade de 15,43 m/s (30 nós) e uma correnteza com 1,5 m/s de velocidade. Essas foram aplicadas 100 segundos após o início da trajetória, para permitir comparações entre os desempenhos dos controladores após o transitório inicial.

Algumas dificuldades foram contornadas para seguir uma trajetória ideal onde existem retas interpoladas com curvas. No momento em que a embarcação inicia a curva, haveria um salto na velocidade angular de referência $\dot{\psi}_{ref}$, para que a orientação da embarcação fosse mantida tangencial à trajetória. Isso produziria impulsos na aceleração angular de referência e no sinal de controle, que por sua vez causariam deslocamentos indesejados. Para contornar este problema, o filtro passa-baixas (3.5) suavizou a referência do ângulo de rumo, conforme sugerido em Rosario e Cunha (2016).

Inicialmente, o controlador PD foi implementado. Este controlador é o mais simples e mais utilizado e por isto serve como base para comparações. Para que o controlador PD funcione corretamente, os ganhos k_p e k_d são calculados por (3.20) de acordo com o comportamento desejado. Os autovalores $\lambda_1 = -0,06$ rad/s e $\lambda_2 = -0,18$ rad/s foram escolhidos com o auxílio de simulações de modo que os sinais de controle sejam condizentes com a realidade. A Figura 32 apresenta os resultados de simulação obtidos com o controle PD. Observa-se que a embarcação busca rastrear a trajetória, mas apesar de fazer uma

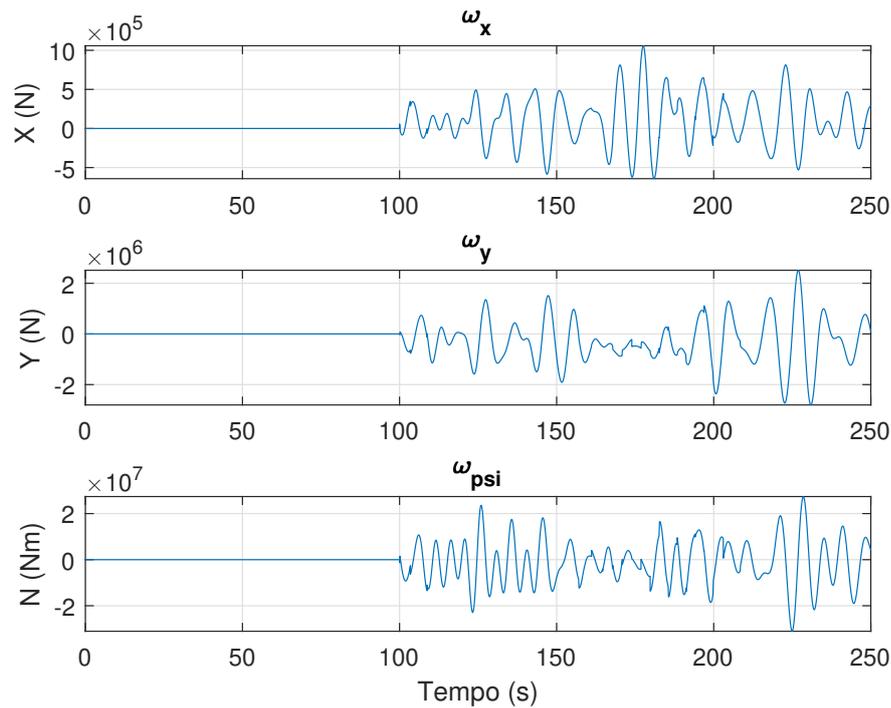


Figura 31: Forças resultantes das perturbações ambientais.

trajetória similar a desejada, não a percorre de forma fiel (Figura 32(a)) devido às perturbações ambientais. O rumo seguido pela embarcação (Figura 32(b)) também não é o desejado. Na Figura 32(c) são apresentadas as atuações do controle nos três graus de liberdade. Verifica-se o esforço inicial em X da ordem de 10^6 N para que a embarcação siga na direção da trajetória, assim como em Y . No gráfico inferior da Figura 32(c), verifica-se a atuação do controlador para que a embarcação faça o movimento de curva, tanto para a direita quanto para a esquerda. Observa-se que após o período da curva, o controle neste eixo tenderia a ficar em repouso caso não houvesse perturbação.

O segundo algoritmo utilizado foi o controle PID apresentado na Seção 3.5. Esse foi implementado para que o controle integral pudesse agir reduzindo o erro $e(t)$ encontrado no controle PD e assim melhorar a comparação com outros controles. Para que o controle PID pudesse funcionar de forma correta, os ganhos k_p , k_d e k_i são calculados por (3.24) de acordo com o comportamento desejado.

Para uma melhor comparação entre os controles, os autovalores do controlador PID são parecidos com os do controlador PD, sendo $\lambda_1 = -0,06\text{rad/s}$, $\lambda_2 = -0,18\text{rad/s}$ e $\lambda_3 = -0,18\text{rad/s}$. A Figura 33 apresenta os resultados de simulação obtidos com o controle PID. Observa-se que a embarcação busca rastrear a trajetória com um menor erro

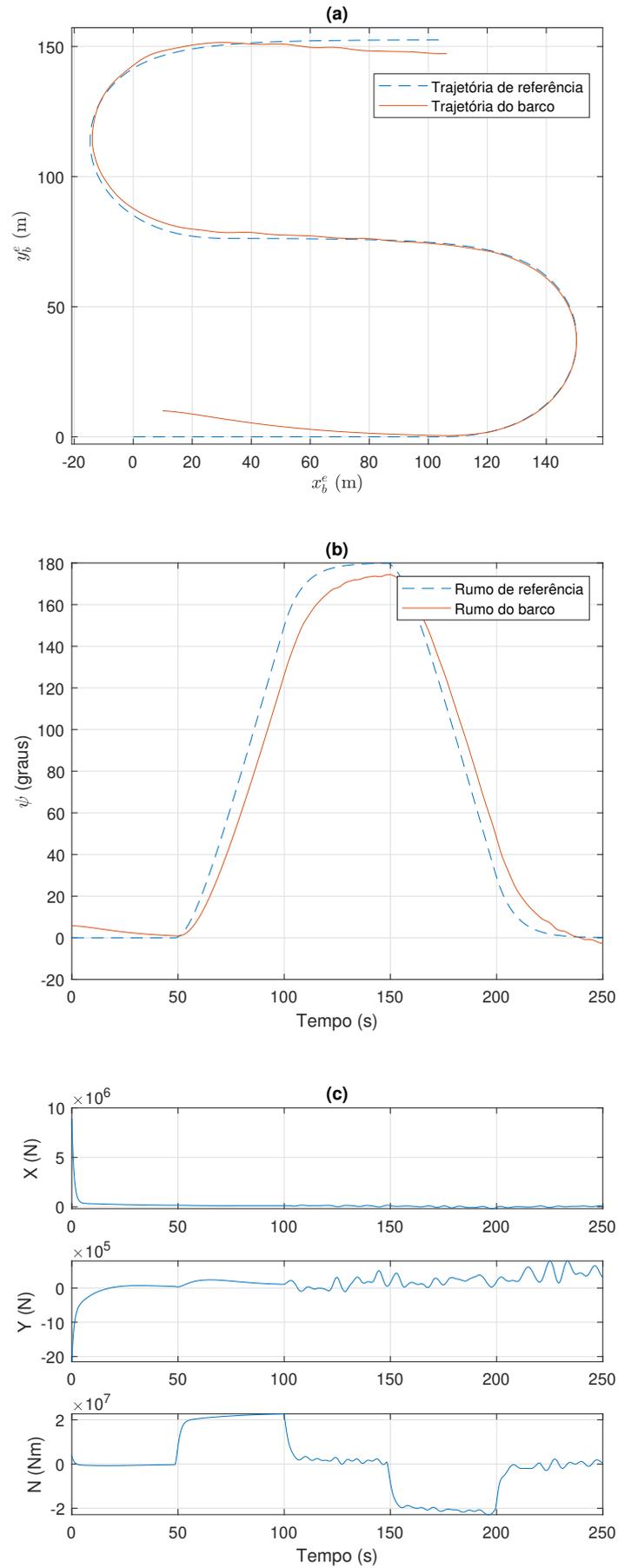


Figura 32: Resultados de simulação com controle PD: (a) trajetória, (b) ângulo de rumo e (c) forças geradas pelos propulsores.

em relação ao controle PD (Figura 33(a)), porém ainda não consegue seguir fielmente a trajetória de referência. O rumo seguido pela embarcação (Figura 33(b)) também não é o desejado mas apresenta uma melhora significativa em relação a Figura 33(b). Verifica-se o esforço inicial em X da ordem de 10^6 N para que a embarcação siga na direção da trajetória, assim como em Y . No gráfico inferior da Figura 33(c) verifica-se a atuação do controlador para que a embarcação faça o movimento de curva, tanto para a esquerda quanto para a direita.

O terceiro algoritmo utilizado foi o controle por modo deslizante. Este foi apresentado na Seção 4.1, onde é criada uma superfície de deslizamento σ no espaço de estado atrativa, de forma que o controle tenda sempre a ela. Neste tipo de controle, onde a amplitude do controle ρ é constante, esta deve ser sempre maior do que $\|d\|$. Isto garante que o estado convirja para a superfície $\sigma = 0$, ao custo de que o controle esteja sempre atuando à espera do maior pico da perturbação, ainda que a perturbação seja geralmente bem menor. Com isto há um gasto desnecessário de energia. Foram utilizados ganhos conservadores $\rho = 0,85$ e $\Lambda = -0,06I$.

Os resultados de simulação do controle por modo deslizante são apresentados na Figura 34. Na Figura 34(a) percebe-se que a trajetória de referência foi seguida corretamente e, além disso, é nítida a melhora em relação ao controle PD na Figura 32(a) e PID na Figura 33(a). Na Figura 34(b) é possível observar que a embarcação segue o rumo desejado. Na Figura 34(c), nota-se que o controle está a todo momento ativo, não apenas durante as curvas mas também durante os trechos retos, com ou sem influências de perturbações.

O quarto e último algoritmo aplicado é o controle por modo deslizante adaptativo apresentado na Seção 4.2, no qual o valor de ρ varia de acordo com o controle equivalente e se adapta às perturbações. Desta forma, haveria economia de energia nos propulsores. Para a lei de adaptação (4.30) foram escolhidos, com o auxílio de simulações, $c_f = 0,2$ rad/s e $\gamma_f = 0,1$ rad/s, respeitando-se a Hipótese 3, e $\Delta = 0,08$. O controle equivalente foi estimado pelo filtro de média (4.33) com constante de tempo $\tau = 0,1$ s. Foi usada a mesma matriz $\Lambda = -0,06I$ para definir a superfície de deslizamento do controlador com modulação constante. Os valores escolhidos para a matriz S_p utilizada tanto no controle UVC quanto no SMC adaptativo são $[1 \ 1 \ 0,08]I$.

Os resultados de simulação do controle por modo deslizante adaptativo são apresen-

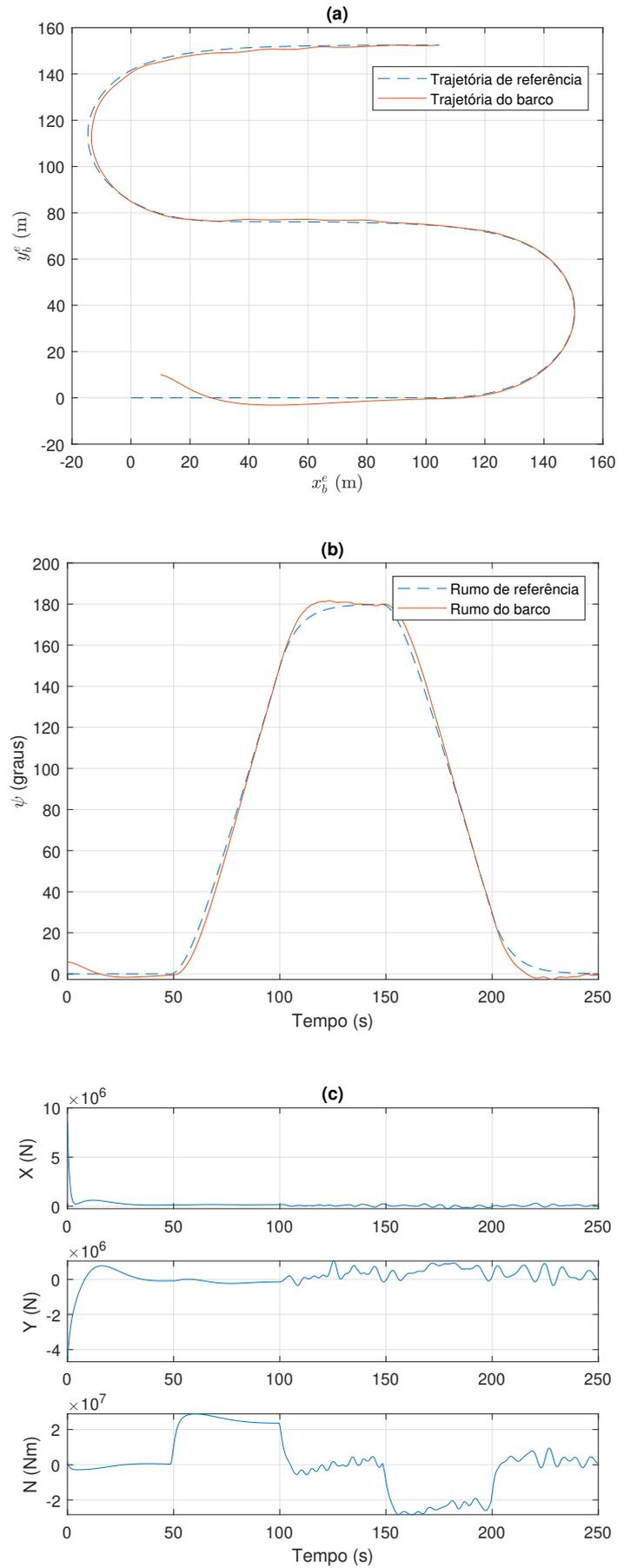


Figura 33: Resultados de simulação com controle PID: (a) trajetória, (b) ângulo de rumo e (c) forças geradas pelos propulsores.

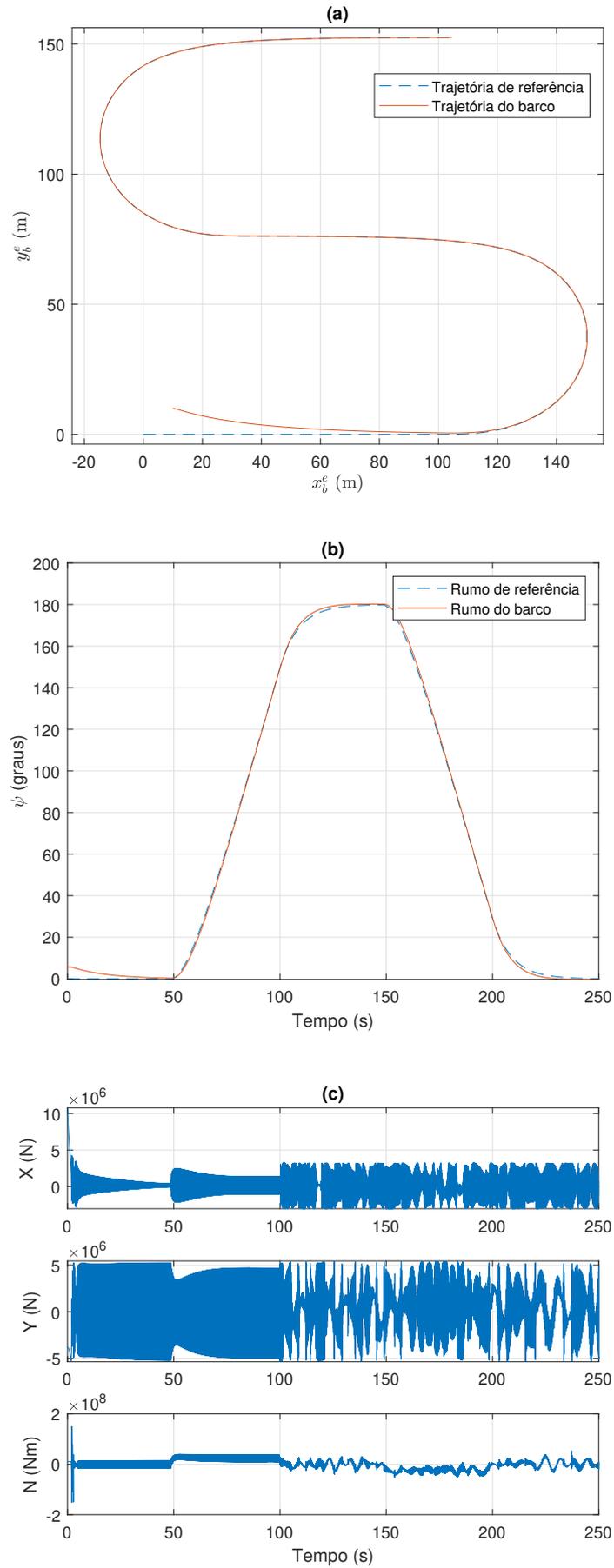


Figura 34: Resultados de simulação com Controle Vetorial Unitário : (a) trajetória, (b) ângulo de rumo e (c) forças geradas pelos propulsores.

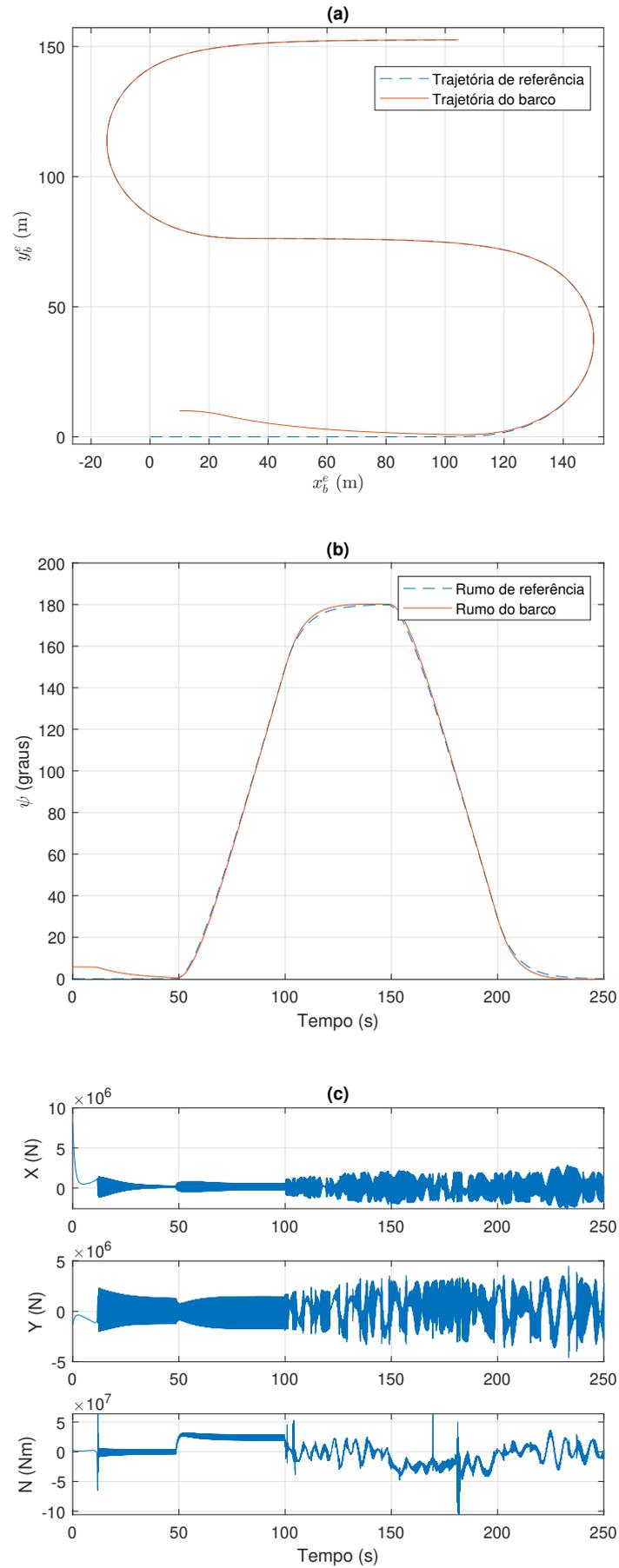


Figura 35: Resultados de simulação com o controle por modo deslizante adaptativo: (a) trajetória, (b) ângulo de rumo e (c) forças geradas pelos propulsores.

tados na Figura 35. Pode-se verificar que, assim como no controle por modo deslizante com função de modulação constante, nas Figura 35(a) e Figura 35(b) a embarcação rastreia a trajetória corretamente. Como a perturbação foi aplicada ao sistema com a embarcação em movimento, foi considerado $\rho(0)$ como o erro em relação a trajetória de referência. Verifica-se que na Figura 34(a), a embarcação encontra mais rapidamente a trajetória de referência. Isto se dá pela superestimação do controle. Por outro lado, observa-se na Figura 35(a) que a embarcação demora um pouco mais para alcançar a trajetória por causa do transitório inicial da adaptação do controlador. A vantagem em relação ao controlador com modo deslizante e modulação constante anterior é que $\rho(t)$ se adapta conforme a trajetória e a influência da perturbação, o que se observa na Figura 36, economizando energia e deixando o controle mais suave.

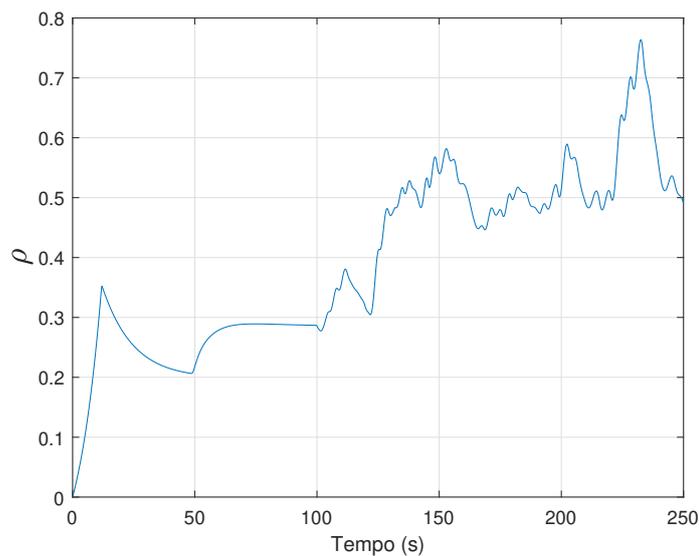


Figura 36: Sinal de modulação adaptativo.

Para efeito de comparação, a Tabela 6 apresenta os erros máximos de rastreamento de trajetória medidos a partir do início da perturbação, do avanço, desvio e guinada dos controladores.

A partir da Tabela 6, podemos verificar a melhora sensível no rastreamento de trajetória feita do controlador PD para o PID e maior ainda para os controles UVC e SMC adaptativo. Comparando o controlador UVC e o SMC adaptativo, verifica-se um menor erro do controle SMC adaptativo em relação ao UVC no avanço e um comportamento

Tabela 6: Valores máximos dos erros do rastreamento de trajetória para $t > 100s$.

Controlador	Avanço (m)	Desvio (m)	Guinada (rad)
PD	4,227	5,233	0,3368
PID	1,401	1,1771	0,1046
UVC	0,02219	0,02631	0,03321
SMC	0,00865	0,04012	0,03321
adaptativo			

parecido no desvio e guinada.

6 CONCLUSÃO

Nesta Dissertação foi considerado um problema de rastreamento de trajetória para uma embarcação de superfície completamente atuada, que deve seguir uma trajetória predeterminada de forma mais perfeita possível apesar de sofrer perturbações ambientais de amplitudes desconhecidas.

Para desenvolver o controle, foi apresentada a dinâmica de uma embarcação com seis graus de liberdade e em seguida reduzida para um sistema de três graus de liberdade. Como a dinâmica da embarcação é não-linear, foi utilizado um controle de linearização por realimentação o qual transforma a dinâmica não-linear da embarcação em um sistema linear formado por três duplo-integradores, um para cada grau de liberdade e assim facilitar a implementação de controles para o rastreamento da trajetória.

Foram apresentados quatro tipos de controles para efeito de comparação, onde o controle PD apresentou pior desempenho entre os quatro com dificuldades de seguir corretamente a trajetória a partir do momento que se iniciam as perturbações. A aplicação do controlador PID apresenta melhora em relação ao controle PD, reduzindo o erro residual causado pelas perturbações, mas ainda apresenta dificuldades com perturbações ambientais, pois são variantes no tempo.

Foram considerados então dois controladores robustos, o SMC Vetorial Unitário e o SMC Adaptativo. O Controle Vetorial Unitário conseguiu, utilizando um sinal de modulação conservador, rastrear a trajetória desejada com o custo de maior gasto de energia dos propulsores. Já o SMC Adaptativo teve um rastreamento de trajetória mais suave, por meio do uso do controle equivalente e um filtro de média para estimar as perturbações e uma lei adaptativa para ajustar o sinal de modulação. Com isto, o SMC adaptativo conseguiu rastrear a trajetória com menor custo de energia, reduzir os erros de rastreamento de trajetória e rejeitar perturbações de amplitude desconhecidas.

A implementação da estratégia adaptativa parece simples, pois requer apenas dois filtros adicionais em comparação com o UVC e apresenta um ganho interessante sobre os outros controladores propostos pois não requer o conhecimento da amplitude das perturbações. Esta estratégia foi apresentada preliminarmente no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (BARBAS; CUNHA; GARCIA-ROSA, 2021).

Trabalhos Futuros

Alguns trabalhos propostos como continuidade deste são:

- Comparar o desempenho desta estratégia de controle vetorial unitário adaptativo baseada no controle equivalente estendido com a estratégia baseada em funções de monitoração proposta em (HSU et al., 2019);
- Aplicar de forma experimental o que foi apresentado nesta dissertação para comprovar o que foi simulado;
- Utilização de derivadores exatos no lugar do controle equivalente utilizado neste trabalho para estimação das perturbações na entrada;
- Utilização de função sinal em vez do controle vetorial unitário para ter uma adaptação independente para cada grau de liberdade a fim de reduzir ainda mais as amplitudes dos sinais de controle.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, A. C. *Controle por modos deslizantes aplicado a sistema de posicionamento dinâmico*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.
- AGUIAR, J. N.; SERRA, G. O. Projeto de controle pid por alocação de pólos para sistemas dinâmicos com atraso puro de tempo. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, v. 4, n. 1, 2016.
- AYDIN, M. N.; COBAN, R. Sliding mode control design and experimental application to an electromechanical plant. In: *2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4.
- BARBAS, V. M.; CUNHA, J. P. V. S.; GARCIA-ROSA, P. B. Controle por modo deslizante adaptativo aplicado ao rastreamento de trajetória de uma embarcação. *XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Rio Grande – RS, 2021.
- BARSLETT, S.; LONGVA, M. N.; NYGARD, T.-I. Auto-docking of vessel. *NTNU - Norwegian University of Science and Technology*, 2018.
- BISHOP, R. E. D.; PRICE, W. G. On modal analysis of ship strength. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, The Royal Society London, v. 341, n. 1624, p. 121–134, 1974.
- CABECINHAS, D.; SILVESTRE, C. Trajectory tracking control of a nonlinear autonomous surface vessel. In: IEEE. *2019 American Control Conference (ACC)*. [S.l.], 2019. p. 4380–4385.
- CHENG, J.; YI, J.; ZHAO, D. Design of a sliding mode controller for trajectory tracking problem of marine vessels. *IET control theory & applications*, IET, v. 1, n. 1, p. 233–237, 2007.
- CUNHA, J. P. V. S. *Design and simulation study of a variable structure control system of a remotely operated underwater vehicle*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Feb. 1992. (in portuguese).
- EDWARDS, C.; SPURGEON, S. K. *Sliding Mode Control: Theory and Applications*. London: Taylor & Francis Ltd., 1998.
- FALTINSEN, O. *Sea loads on ships and offshore structures*. [S.l.]: Cambridge university press, 1993. v. 1.
- FANG, M.-C.; LIN, Y.-H.; WANG, B.-J. Applying the pd controller on the roll reduction and track keeping for the ship advancing in waves. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 54, p. 13–25, 2012.
- FANG, M.-C.; ZHUO, Y.-Z.; LEE, Z.-Y. The application of the self-tuning neural network pid controller on the ship roll reduction in random waves. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 37, n. 7, p. 529–538, 2010.

- FEEMSTER, M. G.; ESPOSITO, J. M. Comprehensive framework for tracking control and thrust allocation for a highly overactuated autonomous surface vessel. *JFR*, v. 28, n. 1, p. 80–100, January/February 2011.
- FOSSSEN, T. I. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs, and Underwater Vehicles*. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2002.
- FOSSSEN, T. I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- FOSSSEN, T. I.; PEREZ, T. *Marine Systems Simulator (MSS)*. [S.l.]: <<https://github.com/cybergalactic/MSS>>, 2004.
- GONZALEZ-GARCIA, A.; CASTAÑEDA, H. Guidance and control based on adaptive sliding mode strategy for a usv subject to uncertainties. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 46, n. 4, p. 1144–1154, 2021.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de física 1: mecânica*. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos Rio de Janeiro, 1996.
- HSU, L. et al. Avaliação experimental da modelagem e simulação da dinâmica de um veículo submarino de operação remota. *Revista Controle e Automação*, v. 11, n. 2, p. 82–93, 2000.
- HSU, L. et al. Adaptive unit vector control of multivariable systems using monitoring functions. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, v. 29, n. 3, p. 583–600, 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rnc.4253>>.
- IBRAHIM, H. A. et al. A hybrid deep learning based autonomous vehicle navigation and obstacles avoidance. In: SPRINGER. *The International Conference on Artificial Intelligence and Computer Vision*. [S.l.], 2020. p. 296–307.
- ISHERWOOD, R. Wind resistance of merchant ships. In: . [S.l.: s.n.], 1972.
- JOHANNESSEN, K.; MELING, T. S.; HAYER, S. Joint distribution for wind and waves in the northern north sea. In: ONEPETRO. *The eleventh international offshore and polar engineering conference*. [S.l.], 2001.
- KHALIL, H. K. *Nonlinear Systems 3rd ed*. Englewood Cliffs, NJ, USA:: Prentice Hall, 2002.
- MASSEL, S. R. *Ocean surface waves: their physics and prediction*. [S.l.]: World scientific, 1996. v. 11.
- MATEOS, L. A. et al. Autonomous latching system for robotic boats. In: IEEE. *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [S.l.], 2019. p. 7933–7939.
- MELO, G. T. *Controle por Modo Deslizante Adaptativo para Perturbações com Limitantes Desconhecidos*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, UERJ, Rio de Janeiro, Feb. 2017. (in portuguese).
- OCHI, M. K. *Ocean waves*. [S.l.]: Cambridge university press, 1998. v. 1.

- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. São Paulo, BRASIL: Pearson Education do Brasil, 2011.
- OLIVEIRA, T. R.; CUNHA, J. P. V. S.; HSU, L. Adaptive sliding mode control for disturbances with unknown bounds. In: *Proc. 14th Int. Workshop on Variable Structure Sys.* Nanjing, Jiangu, China: [s.n.], 2016. p. 59–64.
- ORT, T.; PAULL, L.; RUS, D. Autonomous vehicle navigation in rural environments without detailed prior maps. In: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 2040–2047.
- PARK, B. S. A simple output-feedback control for trajectory tracking of underactuated surface vessels. *Ocean engineering*, Elsevier, v. 143, p. 133–139, 2017.
- PARK, B. S.; KWON, J.-W.; KIM, H. Neural network-based output feedback control for reference tracking of underactuated surface vessels. *Automatica*, Elsevier, v. 77, p. 353–359, 2017.
- ROSARIO, R. V. C. *Controle a Estrutura Variável de um Barco Empurrando uma Carga Flutuante Subatuada*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, UERJ, Rio de Janeiro, 2017.
- ROSARIO, R. V. C.; CUNHA, J. P. V. S. Experimentos de rastreamento de trajetória de uma embarcação de superfície utilizando linearização por realimentação e controle a estrutura variável. In: *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática*. Vitória – ES: [s.n.], 2016. p. 3034–3039.
- SILVA, G. V. M. *Controlo não linear*. [S.l.]: Escola superior de tecnologia de Setúbal, 2006.
- SLOTINE, J.-J. E.; LI, W. *Applied Nonlinear Control*. New Jersey: Prentice-Hall, 1991.
- SNAME. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. *Technical and Research Bulletin*, n. 1-5, 1950.
- SOARES-GOMES, C. L. T. M. A. *CIRCULAÇÃO NOS OCEANOS CORRENTES OCEÂNICAS E MASSAS D'ÁGUA*. 2007. Disponível em: <<http://ole.uff.br/wp-content/uploads/sites/290/2017/11/Correntes.pdf>>.
- SOKAL, G. J. et al. Posicionamento dinâmico utilizando controle a estrutura variável e servovisão. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2010.
- STERLING, T.; WOUW, P. van de. *Barcos autônomos estão prontos para teste nos canais de Amsterdã*. 2021. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/tec/2021/10/barcos-autonomos-estao-prontos-para-teste-nos-canais-de-amsterda.shtml>>.
- TAKAHASHI, Y.; NAKAURA, S.; SAMPEI, M. Position control of surface vessel with unknown disturbances. In: IEEE. *2007 46th IEEE Conference on Decision and Control*. [S.l.], 2007. p. 1673–1680.
- TRIVEDI, P.; BANDYOPADHYAY, B. A new formulation of sliding mode control and its applications. In: *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6.

- TRIVEDI, P.; BANDYOPADHYAY, B. A new formulation of sliding mode control and its applications. In: IEEE. *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. [S.l.], 2021. p. 1–6.
- UTKIN, V. Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic control*, IEEE, v. 22, n. 2, p. 212–222, 1977.
- UTKIN, V. Sliding modes in control and optimization. In: *Communications and Control Engineering Series*. [S.l.: s.n.], 1992.
- UTKIN, V.; GULDNER, J.; SHI, J. *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*. London: Taylor & Francis Ltd., 1999.
- WANG, K.; LIU, Y.; LI, L. Vision-based tracking control of underactuated water surface robots without direct position measurement. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, IEEE, v. 23, n. 6, p. 2391–2399, 2015.
- WANG, W. et al. Design, modeling, and nonlinear model predictive tracking control of a novel autonomous surface vehicle. In: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 6189–6196.
- WANG, Y.; WANG, H.; FU, M. Adaptive trajectory tracking control of dynamic positioning vessels with guaranteed performance. In: IEEE. *2018 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*. [S.l.], 2018. p. 1180–1185.
- YIN, S.; XIAO, B. Tracking control of surface ships with disturbance and uncertainties rejection capability. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, IEEE, v. 22, n. 3, p. 1154–1162, 2016.