William da Silva Caetano

**Identificação de Coeficientes de Manobra de Veículos Submarinos
Através de Testes com Modelos Livres**

São Paulo
2014

William da Silva Caetano

**Identificação de Coeficientes de Manobra de Veículos Submarinos
Através de Testes com Modelos Livres**

Dissertação apresentada a Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo,
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecatrônica.

Área de concentração:

Engenharia Mecatrônica

Orientador:

Prof. Dr. Ettore Apolônio de Barros

São Paulo

2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de junho de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Caetano, William da Silva

**Identificação de coeficientes de manobra de veículos submarinos através de testes com modelos livres / W.S. Caetano. – versão corr. -- São Paulo, 2014.
296 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

**1.Sistemas autônomos 2.Submersíveis não tripulados
3.Dinâmica veicular I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.**

Agradecimentos

Inicialmente gostaria de agradecer ao Centro Tecnológico da Marinha da Marinha em São Paulo – CTMSP por me ter concedido a Bolsa de estudos que através dela foi possível desenvolver essa dissertação, realizando artigos e apresentações em congressos.

Ao capitão de Corveta André Ricardo Mendonça Pinheiro, e aos outros membros da Marinha do Brasil, por permitirem a realização dos ensaios do AUV Pirajuba na Escola Naval da Marinha em Angra dos Reis, e por sempre se disponibilizarem em auxiliar e dar suporte em nossas necessidades operacionais durante realização dos testes.

Ao Prof. Dr. Ettore Apolônio de Barros, por sua orientação neste projeto de pesquisa, pelo qual sem seu auxílio e através de seus conhecimentos e experiência na área de robótica submarina esse trabalho não teria sido concretizado.

Ao Prof. Dr. Thiago de Castro Martins, cujos conselhos, observações, e discussões não diretamente ligadas a este estudo elucidaram algumas dúvidas e conceitos que nortearam o meu próprio desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos colegas de laboratório: João Lucas Dozzi Dantas, Lucas Machado de Oliveira, Persing Junior Cardenas Vivanco e Rodrigo Telles da Silva Vale, por toda a ajuda e cooperação concedidas durante estes anos de atividades rotineiras do laboratório e principalmente através do suporte durante a realização dos testes de campo, que possibilitaram a obtenção de dados muito importantes para que essa dissertação pudesse ser validada. Também não posso esquecer de agradecer a eles pela companhia e determinação conjunta que durante os árduos períodos de teste em mar fizeram toda a diferença para o sucesso das missões.

Aos meus pais e irmã, Josenilda da Silva Caetano, José Esgaci Caetano e Renata da Silva Caetano pelo suporte concedido durante todos estes anos sempre me apoiando durante os estudos e discutindo sobre assuntos tecnológicos e cotidianos diversos, nos momentos pertinentes a tais discussões.

RESUMO

Este trabalho trata da aplicação de técnicas de identificação de sistemas dinâmicos a ensaios com veículos submarinos não tripulados ou com modelos em escala auto-propelidos de veículos submarinos. Complementa-se, desta forma as investigações que vêm sendo realizadas no Laboratório de Veículos Não Tripulados, LVNT, voltadas à estimativa de parâmetros hidrodinâmicos de veículos autônomos submarinos, AUVs. Estas têm utilizado os métodos pertencentes a outras classes de abordagens para a estimativa de modelos de manobras para veículos submarinos como os métodos CFD e ASE (de BARROS, et. al., 2004, 2006, 2008a, 2008b; de BARROS e DANTAS, 2012). Outras atribuições deste trabalho dizem respeito à compreensão e desenvolvimento na modelagem linear da dinâmica de manobra de veículos submarinos, teoria e implementação de métodos de identificação de sistemas aplicados a resultados de ensaios com modelos auto-propelidos. As atividades de estudo foram divididas de acordo com os temas relativos à dinâmica de veículos submarinos, conceitos físicos envolvidos nas derivadas hidrodinâmicas de estabilidade, técnicas de identificação de sistemas e aspectos tecnológicos e experimentais da utilização de ensaios com modelos auto-propelidos. As atividades voltadas ao atendimento de tais metas envolveram, durante o programa de pesquisa, estudos de modelos analíticos, simulação numérica do movimento, realização de experimentos em piscina e campo com um AUV, e a implementação de ferramentas numéricas de análise de dados e estimação de parâmetros de manobra.

Palavras-chave: Sistemas autônomos, Submersíveis não tripulados, Dinâmica veicular.

ABSTRACT

This paper is related to the application of techniques for identifying dynamic systems testing scale models of underwater vehicles or even unmanned underwater vehicles in real scale. Complementing in this way the investigations that have been conducted in the Laboratory of Unmanned Vehicles, LVNT, aimed to estimate the hydrodynamic parameters of autonomous underwater vehicles, AUVs. They have used the methods belonging to the three other classes mentioned (of Barros, et. Al., 2004, 2006, 2008a, 2008b; Barros and the DANTAS, 2012). Other tasks of this work relates to the understanding and development in modeling linear dynamic manoeuvring underwater vehicles, theory and implementation of identification methods applied to systems test results with self-propelled models. The study activities were divided according to themes related to the dynamics of underwater vehicles, physical concepts derived in the hydrodynamic stability, system identification techniques and technological aspects and experimental trials with use of self-propelled models. The activities aimed at meeting those goals involved during the research program, studies of analytical models, numerical simulation of the movement, performing experiments with a swimming pool and AUV, and implementation of numerical tools for data analysis and parameter estimation maneuver.

Keywords: Autonomous systems, unmanned submersible, vehicular dynamics.

Lista de Figuras

Figura 2. 1: Detalhe da construção do AUV Pirajuba.	9
Figura 2. 2: Sistema de coordenadas fixo e móvel utilizado no AUV Pirajuba.	11
Figura 2. 3: Exemplo de rotação do sistema de coordenadas da plataforma para o sistema XYZ: yaw (a), pitch (b) e roll (c), (ZANONI, 2012).....	12
Figura 2. 4: Representação das forças atuantes no leme.	23
Figura 2. 5: Referências no plano vertical.	26
Figura 3. 1: Representação de um sistema com saída y , entrada u , perturbação medida w , e perturbação não medida v (GARCIA, 2011).	32
Figura 3. 2: Caracterização de um sistema dinâmico a partir de sua resposta ao impulso (ZUBEN, 2004).....	35
Figura 3. 3: a) Resposta ao impulso, b) Pulso finito, c) Pulso finito com retorno diferente de zero, d) Pulso geral, (BOOTH, 1975).	38
Figura 3. 4: Resposta característica a entrada ao pulso para o experimento com modelo livre, (TINKER et al, 1979).	40
Figura 3. 5: Resposta característica a entrada ao degrau.	42
Figura 3. 6: Exemplo da manobra padrão de Kempf, semelhante à manobra de Zig-Zag (NOMOTO, 1960).....	47
Figura 3. 7: Exemplo de uma manobra de giro para diferentes magnitudes de K e T (JOURNÉE, 2002).	48
Figura 3. 8: Alcance (reach) e atraso na curva (turning lag) (NOMOTO, 1960).	49
Figura 3. 9: Notações utilizadas para a análise da manobra padrão de Kempf, (NOMOTO, 1960).....	51
Figura 3. 10: Ângulo de rumo e sua velocidade angular durante uma manobra de giro.	56
Figura 3. 11: Exemplo do funcionamento de um registrador de deslocamentos com Flip-Flop do tipo J-K e D.	62
Figura 3. 12: Resposta ao impulso de um ZOH.....	64
Figura 3. 13: Resposta ao impulso de um ZOH.....	64

Figura 4. 1: Diagrama de blocos em Simulink para a simulação de manobras.	70
Figura 4. 2: 1ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 5 graus.	71
Figura 4. 3: 1ª Manobra de Zig-Zag de 5° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.	71
Figura 4. 4: 2ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 5 graus.	71
Figura 4. 5: 2ª Manobra de Zig-Zag de 5° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.	71
Figura 4. 6: 3ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 5 graus.	72
Figura 4. 7: 3ª Manobra de Zig-Zag de 5° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.	72
Figura 4. 8: 4ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 5 graus.	72
Figura 4. 9: 4ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de rolagem.	72
Figura 4. 10: 1ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 10 graus.	72
Figura 4. 11: 1ª Manobra de Zig-Zag de 10° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.	72
Figura 4. 12: 2ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 10 graus.	73
Figura 4. 13: 2ª Manobra de Zig-Zag de 10° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.	73
Figura 4. 14: 1ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 15 graus.	73
Figura 4. 15: 1ª Manobra de Zig-Zag de 15° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.	73
Figura 4. 16: 1ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 20 graus.	73
Figura 4. 17: 1ª Manobra de Zig-Zag de 20° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.	73

Figura 4. 18: 2ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 20 graus.....	74
Figura 4. 19: 2ª Manobra de Zig-Zag de 20° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.	74
Figura 4. 20: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme a 2 m/s.....	79
Figura 4. 21: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme a 2 m/s.....	79
Figura 4. 22: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme a 2 m/s.....	79
Figura 4. 23: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme a 2 m/s.....	79
Figura 4. 24: Gráfico para a análise da velocidade p e q a velocidade de 2 m/s em uma manobra de giro de 20 graus.	82
Figura 4. 24: Comparação entre os resultados experimentais e estimados pelos filtros regressores, (DANTAS et. al., 2013a).....	85
Figura 4. 25: Ilustração de um processamento em paralelo.	86
Figura 4. 26: Manobras PRBS realizadas pelo AUV Pirajuba na baía de Angra dos Reis.	93
Figura A. 1: Representação do raio de giração K_{gr} de um corpo, (CHAY, 2007).	115
Figura A. 2: Montagem do pendulo bífilar com o veículo AUV para a realização do experimento, (CHAY, 2007).	115
Figura A. 3: Oscilação bífilar do veículo.	116
Figura A. 4: Calculo da magnitude da tração no cabo.....	116
Figura A. 5: Desenho de projeto da montagem do experimento.	118
Figura A. 6: Esquema de montagem do experimento.	118
Figura A. 7: Detalhe de montagem do grampo tipo “C” e filamentos... ..	119
Figura A. 8: Célula de carga (esquerda) e display indicador de carga (direita).	119
Figura A. 9: Mosquetão de segurança, para prender os cabos de aço.....	119
Figura A. 10: C.G. e momentos de inércia estimados pelo software Solidworks.	123

Figura B. 1: Sistema de coordenadas fixo e móvel utilizado no AUV Pirajuba (LAWRENCE, 1998).....	127
Figura B. 2: Sistemas de posicionamento acústico (ALCOCER et al., 2006).	135
Figura B. 3: Foto demonstrativa do DVL.....	137
Figura C. 1: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme.....	139
Figura C. 2: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme.....	139
Figura C. 3: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme.....	140
Figura C. 4: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme.....	140
Figura C. 5: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme e K e T médios a 5 graus.	140
Figura C. 6: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme e K e T médios a 5 graus.	141
Figura C. 7: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme e K e T médios a 5 graus.	141
Figura C. 8: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme e K e T médios a 5 graus.	141
Figura C. 9: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme e K e T médios a 10 graus.	142
Figura C. 10: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme e K e T médios a 10 graus.	142
Figura C. 11: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme e K e T médios a 10 graus.	142
Figura C. 12: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme e K e T médios a 10 graus.	143
Figura C. 13: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme e K e T médios a 15 graus.	143
Figura C. 14: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme e K e T médios a 15 graus.	143

Figura C. 15: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme e K e T médios a 15 graus.144

Figura C. 16: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme e K e T médios a 15 graus.144

Figura C. 17: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme e K e T médios a 20 graus.144

Figura C. 18: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme e K e T médios a 20 graus.145

Figura C. 19: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme e K e T médios a 20 graus.145

Figura C. 20: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme e K e T médios a 20 graus.145

Figura C. 21: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 5 graus. 146

Figura C. 22: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 10 graus. 146

Figura C. 23: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 15 graus. 146

Figura C. 24: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 20 graus. 147

Figura C. 25: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 5 graus.147

Figura C. 26: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 5 graus.147

Figura C. 27: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 5 graus.148

Figura C. 28: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 5 graus.148

Figura C. 29: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 10 graus.148

Figura C. 30: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 10 graus.149

Figura C. 31: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 10 graus.149

Figura C. 32: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 10 graus.149

Figura C. 33: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 15 graus.150

Figura C. 34: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 15 graus.150

Figura C. 35: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 15 graus.150

Figura C. 36: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 15 graus.151

Figura C. 37: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 20 graus.151

Figura C. 38: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 20 graus.151

Figura C. 39: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 20 graus.152

Figura C. 40: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 20 graus.152

Figura C. 41: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme, e para os valores de K e T médios. 152

Figura C. 42: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme, e para os valores de K e T médios. 153

Figura C. 43: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme, e para os valores de K e T médios. 153

Figura C. 44: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme, e para os valores de K e T médios. 153

Figura C. 45: Gráfico da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme a 2 m/s, para validação das estimativas. 154

Figura C. 46: Gráfico da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme a 2 m/s, para validação das estimativas. 154

Figura C. 47: Gráfico da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme a 2 m/s, para validação das estimativas. 154

Figura C. 48: Gráfico da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme a 2 m/s, para validação das estimativas. 154

Figura C. 49: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 5 graus e para entrada de 5 graus de leme..... 154

Figura C. 50: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 5 graus e para entrada de 10 graus de leme..... 155

Figura C. 51: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 5 graus e para entrada de 15 graus de leme..... 155

Figura C. 52: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 5 graus e para entrada de 20 graus de leme..... 155

Figura C. 53: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 10 graus e para entrada de 5 graus de leme..... 156

Figura C. 54: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 10 graus e para entrada de 10 graus de leme..... 156

Figura C. 55: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 10 graus e para entrada de 15 graus de leme..... 156

Figura C. 56: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 10 graus e para entrada de 20 graus de leme..... 157

Figura C. 57: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 15 graus e para entrada de 5 graus de leme..... 157

Figura C. 58: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 15 graus e para entrada de 10 graus de leme..... 157

Figura C. 59: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 15 graus e para entrada de 15 graus de leme..... 158

Figura C. 60: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 15 graus e para entrada de 20 graus de leme.....	158
Figura C. 61: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 20 graus e para entrada de 5 graus de leme.....	158
Figura C. 62: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 20 graus e para entrada de 10 graus de leme.....	159
Figura C. 63: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 20 graus e para entrada de 15 graus de leme.....	159
Figura C. 64: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 20 graus e para entrada de 20 graus de leme.....	159
Figura C. 65: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T médios e para entrada de 5 graus de leme.	160
Figura C. 66: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T médios e para entrada de 10 graus de leme.	160
Figura C. 67: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T médios e para entrada de 15 graus de leme.	160
Figura C. 68: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T médios e para entrada de 20 graus de leme.	161
Figura C. 69: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 5 graus.	161
Figura C. 70: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 10 graus.	161
Figura C. 71: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 15 graus.	161
Figura C. 72: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 20 graus.	161

- Figura C. 73: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARX..... 162
- Figura C. 74: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARX..... 162
- Figura C. 75: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARX..... 163
- Figura C. 76: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARX..... 163
- Figura C. 77: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARX..... 164
- Figura C. 78: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARX..... 164
- Figura C. 79: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARX..... 164
- Figura C. 80: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARX..... 165
- Figura C. 81: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARIMAX. 165
- Figura C. 82: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARIMAX. 166
- Figura C. 83: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARIMAX. 166
- Figura C. 84: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARIMAX. 166
- Figura C. 85: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ..... 167
- Figura C. 86: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura BJ..... 167
- Figura C. 87: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura BJ..... 168
- Figura C. 88: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura BJ..... 168
- Figura C. 89: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ Noise..... 169

Figura C. 90: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura BJ Noise.....	169
Figura C. 91: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura BJ Noise.....	169
Figura C. 92: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ Noise.....	170
Figura C. 93: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARIX - Paralelo.	170
Figura C. 94: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARIX - Paralelo.	171
Figura C. 95: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARIX - Paralelo.	171
Figura C. 96: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARIX - Paralelo.	171
Figura C. 97: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARX – IV - Paralelo.	172
Figura C. 98: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARX – IV - Paralelo.	172
Figura C. 99: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARX – IV - Paralelo.	173
Figura C. 100: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARX – IV - Paralelo.	173
Figura C. 101: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.	174
Figura C. 102: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.	174
Figura C. 103: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.	174

Figura C. 104: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.	175
Figura C. 105: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.	175
Figura C. 106: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.	176
Figura C. 107: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.	176
Figura C. 108: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.	176
Figura C. 109: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ - Paralelo.	177
Figura C. 110: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura BJ - Paralelo.	177
Figura C. 111: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura BJ- Paralelo.	178
Figura C. 112: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura BJ- Paralelo.	178
Figura C. 113: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ- Paralelo.	179
Figura C. 114: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura BJ- Paralelo.	179
Figura C. 115: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura BJ- Paralelo.	179
Figura C. 116: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura BJ- Paralelo.	180
Figura C. 117: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ Noise- Paralelo.	180

Figura C. 118: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.	181
Figura C. 119: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.	181
Figura C. 120: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.	181
Figura C. 121: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.	182
Figura C. 122: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.	182
Figura C. 123: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.	183
Figura C. 124: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.	183
Figura C. 125: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX de ordem 3 e a curva real PRBS- manobra 1.	184
Figura C. 126: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX de ordem 3 e a curva real de Pulso.	184
Figura C. 127: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX de ordem 4 e a curva real PRBS - manobra 1.	185
Figura C. 128: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX de ordem 4 e a curva real de Pulso.	185
Figura C. 129: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 1.	186
Figura C. 130: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.	186
Figura C. 131: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.	187

Figura C. 132: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	187
Figura C. 133: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 1.....	188
Figura C. 134: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	188
Figura C. 135: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.....	189
Figura C. 136: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	189
Figura C. 137: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 1.	190
Figura C. 138: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	190
Figura C. 139: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.	191
Figura C. 140: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	191
Figura C. 141: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX Paralelo de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.	192
Figura C. 142: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX - Paralelo de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	192
Figura C. 143: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX_IV - Paralelo de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.	193
Figura C. 144: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX_IV - Paralelo de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	193
Figura C. 145: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX - Paralelo de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 2.	194
Figura C. 146: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX - Paralelo de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	194
Figura C. 147: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX - Paralelo de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.	195
Figura C. 148: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX - Paralelo de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	195

Figura C. 149: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX - Paralelo de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 2.	196
Figura C. 150: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX - Paralelo de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	196
Figura C. 151: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ - Paralelo de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.....	197
Figura C. 152: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ - Paralelo de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	197
Figura C. 153: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ - Paralelo de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.....	198
Figura C. 154: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ - Paralelo de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	198
Figura C. 155: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise - Paralelo de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 3.	199
Figura C. 156: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise - Paralelo de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	199
Figura C. 157: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise - Paralelo de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 3.	200
Figura C. 158: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise - Paralelo de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	200
Figura C. 159: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.	201
Figura C. 160: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARX de ordem 2 e a curva real de Pulso.	201
Figura C. 161: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARMAX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.....	202
Figura C. 162: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	202
Figura C. 163: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 1.....	203
Figura C. 164: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	203
Figura C. 165: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 3.....	204

Figura C. 166: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	204
Figura C. 167: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 4.....	205
Figura C. 168: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	205
Figura C. 169: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.....	206
Figura C. 170: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	206
Figura C. 171: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ-Noise de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 3.....	207
Figura C. 172: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ-Noise de ordem 2 e a curva real de Pulso.	207
Figura C. 173: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ-Noise de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 3.....	208
Figura C. 174: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ-Noise de ordem 4 e a curva real de Pulso.	208
Figura C. 175: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 3.	209
Figura C. 176: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARX de ordem 2 e a curva real de Pulso.	209
Figura C. 177: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARIX de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 3.	210
Figura C. 178: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARIX de ordem 4 e a curva real de Pulso.	210
Figura C. 179: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARMAX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.....	211
Figura C. 180: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.	211
Figura C. 181: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARIMAX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 3.....	212
Figura C. 182: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARIMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.	212

Figura C. 183: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARIMAX de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.....	213
Figura C. 184: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	213
Figura C. 185: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 3.	214
Figura C. 186: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	214
Figura C. 187: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.	215
Figura C. 188: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	215
Figura C. 189: Comparação entre a curva estimada por outra combinação de PRBS - Paralelo pelo método BJ de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 3.	216
Figura C. 190: Comparação entre a curva estimada por outra combinação de PRBS - Paralelo pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	216
Figura C. 191: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ-Noise de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 3.	217
Figura C. 192: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ-Noise de ordem 2 e a curva real de Pulso.	217
Figura C. 193: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ-Noise de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.	218
Figura C. 194: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ-Noise de ordem 4 e a curva real de Pulso.	218
Figura C. 195: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIX de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.	219
Figura C. 196: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIX de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	219
Figura C. 197: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.	220
Figura C. 198: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	220
Figura C. 199: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.	221

Figura C. 200: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	221
Figura C. 201: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.	222
Figura C. 202: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	222
Figura C. 203: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.....	223
Figura C. 204: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	223
Figura C. 205: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.....	224
Figura C. 206: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	224
Figura C. 207: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.	225
Figura C. 208: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	225
Figura C. 209: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.	226
Figura C. 210: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	226
Figura C. 211: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX – IV de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.	227
Figura C. 212: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX - IV de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	227
Figura C. 213: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX – IV de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.	228
Figura C. 214: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX - IV de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	228
Figura C. 215: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.	229
Figura C. 216: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	229

Figura C. 217: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.	230
Figura C. 218: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	230
Figura C. 219: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.....	231
Figura C. 220: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	231
Figura C. 221: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.....	232
Figura C. 222: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	232
Figura C. 223: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.....	233
Figura C. 224: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	233
Figura C. 225: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.....	234
Figura C. 226: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	234
Figura C. 227: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARX-IV de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.....	235
Figura C. 228: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARX-IV de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	235
Figura C. 229: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARX-IV de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 2.....	236
Figura C. 230: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARX-IV de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	236
Figura C. 231: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.....	236
Figura C. 232: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	237
Figura C. 233: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 2.....	237

Figura C. 234: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	238
Figura C. 235: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.....	238
Figura C. 236: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	238
Figura C. 237: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 2.....	239
Figura C. 238: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	239
Figura C. 239: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ Noise de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.	240
Figura C. 240: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ Noise de ordem 2 e a curva real de Pulso.	240
Figura C. 241: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ Noise de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 2.	241
Figura C. 242: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ Noise de ordem 4 e a curva real de Pulso.	241
Figura C. 243: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX – IV de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.	242
Figura C. 244: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX - IV de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	242
Figura C. 245: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIX – IV de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.	243
Figura C. 246: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIX - IV de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	243
Figura C. 247: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.	244
Figura C. 248: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	244
Figura C. 249: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.	245
Figura C. 250: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	245

Figura C. 251: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.....	246
Figura C. 252: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	246
Figura C. 253: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.....	247
Figura C. 254: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	247
Figura C. 255: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.	248
Figura C. 256: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 2 e a curva real de Pulso.....	248
Figura C. 257: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.	249
Figura C. 258: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 4 e a curva real de Pulso.....	249
Figura C. 259: Comportamento do ângulo e da taxa de Yaw durante a execução de uma manobra de Pulso 10 graus.	250
Figura C. 260: Comportamento do ângulo e da taxa de Yaw durante a execução de uma manobra de PRBS.	250
Figura C. 261: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de zig-zag 5 graus.....	251
Figura C. 262: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de zig-zag 10 graus.....	251
Figura C. 263: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de zig-zag 15 graus.....	252
Figura C. 264: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de zig-zag 20 graus.....	252
Figura C. 265: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de Giro 5 graus.....	253
Figura C. 266: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de Giro 10 graus.....	253
Figura C. 267: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de Giro 15 graus.....	254

Figura C. 268: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de Giro 20 graus.....	254
Figura C. 269: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de Pulso 5 graus.	255
Figura C. 270: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de Pulso 10 graus.	255
Figura C. 271: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de PRBS.....	256
Figura C. 272: Analise das velocidades de rotação nos eixos x,y e z, durante um zig-zag de 5 graus.....	256
Figura C. 273: Analise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um zig-zag de 10 graus.....	256
Figura C. 274: Analise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um zig-zag de 15 graus.....	256
Figura C. 275: Analise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um zig-zag de 20 graus.....	256
Figura C. 276: Analise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um Giro de 5 graus.....	257
Figura C. 277: Analise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um Giro de 10 graus.....	257
Figura C. 278: Analise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um Giro de 15 graus.....	257
Figura C. 279: Analise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um Giro de 20 graus.....	257
Figura C. 280: Analise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante uma manobra de Pulso de 5 graus.	257
Figura C. 281: Analise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante uma manobra de Pulso de 10 graus.	257
Figura C. 282: Analise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante uma manobra de PRBS.....	257
Figura C. 283: Analise dos ângulos de pitch e roll durante a manobra de Pulso de 10 graus.	258
Figura C. 284: Analise dos ângulos de pitch e roll durante a manobra de PRBS.	258

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1: Parâmetros Geométricos do Corpo do AUV Pirajuba.....	10
Tabela 2. 2: Parâmetros geométricos das superfícies de controle do AUV Pirajuba.	10
Tabela 2. 3: Nomenclatura usual para movimentos navais, segundo SNAME (1950) e Dantas (2012).	10
Tabela 2. 5: Parâmetros dimensionais utilizados nas equações (2.49) a (2.50).	28
Tabela 2. 6: Definição dos termos das funções de transferência para o movimento no plano horizontal.....	30
Tabela 3. 1: Funções de transferência em Yaw, identificadas através de pulsos (TINKER et al, 1979).....	41
Tabela 3. 2: Funções de transferência do plano horizontal (Tinker et al, 1979).	41
Tabela 3. 3: Equações utilizadas para calcular as integrais de δm (NOMOTO, 1960).	53
Tabela 4. 1: Resultados estimados para os índices K e T em ambiente marinho com entrada de leme a 5 graus, e para o angulo residual do leme....	75
Tabela 4. 2: entrada de leme a 10 graus, e para o angulo residual do leme.	75
Tabela 4. 3: Resultados estimados para os índices K e T em ambiente marinho com entrada de leme a 15 graus, e para o angulo residual do leme..	75
Tabela 4. 4: Resultados estimados para os índices K e T em ambiente marinho com entrada de leme a 20 graus, e para o angulo residual do leme..	75
Tabela 4. 5: Tempo estimado para o veículo completar uma volta de 360 graus em comparação aos dados experimentais, para K e T estimados com zig-zag de 5 graus.	76
Tabela 4. 6: Tempo estimado para o veículo completar uma volta de 360 graus em comparação aos dados experimentais, para K e T estimados com zig-zag de 10 graus.	76

Tabela 4. 7: Tempo estimado para o veículo completar uma volta em comparação aos dados experimentais para K e T estimados com zig-zag de 15 graus.	76
Tabela 4. 8: Tempo estimado para o veículo completar uma volta em comparação aos dados experimentais para K e T estimados com zig-zag de 20 graus.	76
Tabela 4. 9: Comparação entre as curvas das velocidades angulares.	77
Tabela 4. 10: Comparação entre a porcentagem de erro em relação aos tempos de manobra, para K e T estimados com zig-zag de 5 graus.	77
Tabela 4. 11: Comparação entre a porcentagem de erro em relação aos tempos de manobra, para K e T estimados com zig-zag de 10 graus.	77
Tabela 4. 12: Comparação entre a porcentagem de erro em relação aos tempos de manobra, para K e T estimados com zig-zag de 15 graus.	77
Tabela 4. 13: Comparação entre a porcentagem de erro em relação aos tempos de manobra, para K e T estimados com zig-zag de 20 graus.	77
Tabela 4. 14: Comparação entre a porcentagem de erro em relação às velocidades angulares.....	78
Figura 4. 15: Comparação entre os raios de giro R simulado e real.....	78
Figura 4. 16: Comparação entre a porcentagem dos erros dos raios de giro R simulado e real.....	78
Tabela 4. 17: Resultados estimados para os índices K, T em ambiente marinho, com o AUV a 2 m/s.....	80
Tabela 4. 18: Tempo estimado para o veículo completar uma volta de 360 graus, em comparação aos dados experimentais.....	80
Tabela 4. 19: Comparação entre as curvas das velocidades angulares em relação à manobra de Giro.....	80
Tabela 4. 20: Comparação entre a porcentagem de erro em relação aos tempos de manobra.	81
Tabela 4. 21: Comparação entre a porcentagem de erro em relação às velocidades angulares.....	81
Tabela 4. 22: Comparação entre os raios de giro real e estimados.	81
Tabela 4. 23: Comparação entre a porcentagem de erro entre os raios de giro real e estimados.....	81
Tabela 4. 24: Comparação entre os períodos simulados e reais para o AUV completar um Giro de 360 graus.....	83

Tabela 4. 25: Comparação entre as velocidades angulares simuladas e reais para o AUV completar um Giro de 360 graus.....	83
Tabela 4. 26: Porcentagem de erro em relação à estimativa do período de manobra.	84
Tabela 4. 27: Porcentagem de erro em relação à estimativa das velocidades angulares.....	84
Tabela 4. 28: Funções de transferência estimadas pelos regressores lineares.	84
Tabela 4. 29: Comparação entre os raios de giro R estimado e experimental.	84
Tabela 4. 30: Comparação entre as porcentagens de erro dos raios de giro R estimado e real.....	84
Tabela 4. 31: Comparação entre os períodos simulados e reais para o AUV completar um Giro de 360 graus para a identificação em paralelo.	87
Tabela 4. 32: Comparação entre as curvas das velocidades angulares em relação à manobra de Giro para a identificação em paralelo.	87
Tabela 4. 33: Comparação entre a porcentagem de erro em relação aos tempos de manobra.	88
Tabela 4. 34: Comparação entre a porcentagem de erro em relação às velocidades angulares.....	88
Tabela 4. 35: Funções de transferência para a identificação em paralelo.....	88
Tabela 4. 36: Continuação das funções de transferência para a identificação em paralelo.....	88
Tabela 4. 37: Parâmetros de ajuste do Pulso referente à quantidade de manobras executadas.	90
Tabela 4. 38: Comparação dos melhores resultados de ajuste, identificados por manobras excitadas por Pulso.	91
Tabela 4. 39: Comparação da media dos resultados de ajuste, identificados por manobras excitadas por Pulso.	91
Tabela 4. 40: Funções de transferência, identificados por manobras excitadas por Pulso.	92
Tabela 4. 41: Funções de transferência, identificados por manobras excitadas por Pulso.	92
Tabela 4. 42: Comparação dos melhores resultados de ajuste, identificados por manobras excitadas por PRBS.	94

Tabela 4. 43: Comparação da media dos resultados de ajuste, identificados por manobras excitadas por PRBS.	94
Tabela 4. 44: Funções de transferências identificadas por PRBS.	95
Tabela 4. 45: Continuação das funções de transferências identificadas por PRBS.	95
Tabela 4. 46: Comparação dos melhores resultados de ajuste, identificados por manobras excitadas por Pulso.	97
Tabela 4. 47: Comparação da media dos resultados de ajuste, identificados por manobras excitadas por Pulso.	97
Tabela 4. 48: Funções de transferências identificadas por Pulso para taxa de profundidade.	97
Tabela 4. 49: Continuação das funções de transferências identificadas por Pulso para taxa de profundidade.	98
Tabela 4. 50: Comparação dos melhores resultados de ajuste, identificados por manobras excitadas por PRBS.	99
Tabela 4. 51: Comparação da media dos resultados de ajuste, identificados por manobras excitadas por PRBS.	100
Tabela 4. 52: Funções de transferências estimadas para profundidade utilizando PRBS.	100
Tabela 4. 53: Continuação das funções de transferências estimadas para profundidade utilizando PRBS.	101
 Tabela A. 1: Comparação entre os resultados obtidos para a massa do AUV.	 123
Tabela A. 2: Comparação entre os resultados obtidos para a posição do C.G. para o AUV.	124
Tabela A. 3: Comparação entre os resultados obtidos para os momentos de inércia do AUV.	124
Tabela A. 4: Análise de incertezas geradas nos experimentos de pêndulo bifilar.	125
 Tabela B. 1: Classificação de IMUs através dos valores máximos de erro medido.	 130
Tabela B. 2: Classificação dos sensores acústicos (ZANONI, 2012). .	131

Lista de Abreviaturas

ARX	Autorregressivo com entrada externa
ARIX	Autorregressivo com integração e entrada externa
ARMAX	Autorregressivo de média móvel com entrada externa
ARIMAX	Autorregressivo de média móvel com integração e entrada externa
ASV	Métodos Analíticos e Semi-Empíricos
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
BJ	Box-Jenkins
BJ - Noise	Box-Jenkins com integração de ruído externo
CEPEUSP	Centro de Práticas Esportivas da Universidade de São Paulo
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacionais
DVL	Doppler Velocity Log
GIB	GPS Intelligent Buoy
IMU	Inertial Measurement Unit
ISR	Instituto de Sistemas e Robótica
IST	Instituto Superior Técnico de Lisboa
LBL	Long Baseline
LVNT	Laboratório de Veículos Não tripulados da USP
NOA	Instituto Nacional de Oceanografia da Índia
PVC	Policloreto de Polivinila
ROV	Remote Operated Vehicle
SBL	Short Baseline
USBL	Ultra Short Baseline

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO	3
1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE.....	4
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	6
2. MODELAGEM DA DINÂMICA DE UM VEÍCULO AUTÔNOMO SUBMARINO	8
2.1. O AUV PIRAJUBA	8
2.2. EQUAÇÕES DE MOVIMENTO	10
2.2.1. <i>Modelo Cinemático</i>	11
2.2.2. <i>Modelo dinâmico</i>	13
2.3. ESFORÇOS HIDROSTÁTICOS	17
2.4. ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS	18
2.4.1. <i>Massa Adicional</i>	18
2.4.2. <i>Amortecimento</i>	19
2.4.3. <i>Propulsão</i>	20
2.4.4. <i>Esforços Produzidos pelo Sistema de Manobra</i>	22
2.5. LINEARIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MOVIMENTO.....	24
2.5.1. <i>Derivação das Funções de Transferência</i>	27
3. MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO APLICADOS A ENSAIOS COM MODELOS LIVRES	31
3.1. SISTEMAS DINÂMICOS.....	32
3.1.1. <i>Tipos de Modelos para Sistemas Dinâmicos</i>	32
3.1.2. <i>Modelos Paramétricos e Não- Paramétricos</i>	33
3.1.3. <i>Modelos Determinísticos e Estocásticos</i>	33
3.2. FORMAS MAIS COMUNS DE REPRESENTAR MODELOS MATEMÁTICOS DE PROCESSOS	34
3.3. SINAIS DETERMINÍSTICOS: IMPULSO (PULSO), DEGRAU E SENOIDE	34
3.3.1. <i>Impulso (pulso)</i>	34
3.4. DEGRAU – MANOBRA DE GIRO E MANOBRA PADRÃO DE KEMPF E OS ÍNDICES DE QUALIDADE DE MANOBRA	
K E T	42
3.4.2. <i>Equação de movimento de primeira ordem</i>	45
3.4.3. <i>Análise em Frequência: Senoide</i>	59
3.4.4. <i>Sequência Binária Pseudo-aleatória – PRBS</i>	61
3.5. FILTROS LINEARES – ARX, ARMAX, ARIMAX, BOX- JENKINS.....	63
3.5.1. <i>Segurador de ordem Zero - ZOH</i>	63
3.5.2. <i>Estrutura de modelo</i>	64

4. CARACTERIZAÇÃO DA MANOBRABILIDADE DO AUV PIRAJUBA.....	69
4.1. REALIZAÇÃO DE MANOBRAS DE ZIG-ZAG E GIRO COM O AUV PIRAJUBA NO PLANO HORIZONTAL – MÉTODO DETERMINÍSTICO	69
4.1.1. <i>Manobra em ambiente Marinho: Baía de Angra dos Reis</i>	<i>70</i>
4.1.2. <i>Estimação dos índices K e T através da manobra Giro em ambiente marinho para velocidade de 2 metros por segundo.</i>	<i>79</i>
4.2. APRIMORAMENTO DA IDENTIFICAÇÃO NO PLANO HORIZONTAL – FILTROS LINEARES – MÉTODOS ESTOCÁSTICOS	82
4.3. APRIMORAMENTO DA IDENTIFICAÇÃO NO PLANO HORIZONTAL – FILTROS LINEARES COM PROCESSAMENTO EM PARALELO	86
4.4. REALIZAÇÃO DE MANOBRAS DE PRBS E PULSO COM O AUV PIRAJUBA NO PLANO VERTICAL – IDENTIFICAÇÃO POR MÉTODOS ESTOCÁSTICOS	89
4.4.1. <i>Manobra Pulso vertical – Identificação ângulo de Pitch</i>	<i>89</i>
4.4.2. <i>Manobra PRBS plano vertical – Identificação do Ângulo de Pitch</i>	<i>93</i>
4.4.3. <i>Junção de manobras – Identificação utilizando manobra de PRBS com processamento em paralelo</i>	<i>94</i>
4.4.4. <i>Manobra Pulso plano vertical – Identificação da Taxa de Profundidade</i>	<i>96</i>
4.4.5. <i>Manobra PRBS plano vertical – Identificação da Taxa de Profundidade</i>	<i>99</i>
5. CONCLUSÕES	102
6. TRABALHOS FUTUROS.....	106
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
APÊNDICE A	114
A. ESTIMATIVA TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS DE DISTRIBUIÇÃO DE MASSA.....	114
A.1. EXPERIMENTO: PENDULO BIFILAR.....	114
A.1.1 <i>Raio de Giração</i>	<i>115</i>
A.1.2 <i>Modelagem das Equações do Experimento.....</i>	<i>115</i>
A.1.3 <i>Equipamentos.....</i>	<i>117</i>
A.1.4 <i>Medições Experimentais.....</i>	<i>120</i>
A.1.5 <i>Análise de incerteza.....</i>	<i>121</i>
A.2 MODELAGEM DO AUV PIRAJUBA EM AMBIENTE SOLIDWORKS	122
A.3 ESTIMATIVA DO MOMENTO DE INÉRCIA COM MASSA ADICIONAL	123
APÊNDICE B	126
B. ESTUDO DE SENSORES UTILIZADOS EM EXPERIMENTOS DE IDENTIFICAÇÃO E NA INSTRUMENTAÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS SUBMARINOS (AUVS).....	126
B.1. SENSORES	126
B.1.1. <i>Sistemas Inerciais</i>	<i>126</i>

B.1.1.1. ACELERÔMETROS	127
B.1.1.2. GIROSCÓPIO	128
B.2. RUÍDOS E ERROS DE SENSORES.....	128
B.3. CLASSIFICAÇÃO DE UMA IMU	129
B.4. SISTEMAS ACÚSTICOS DE POSICIONAMENTO	130
B.4.1. Sistemas de Linhas de Base Longa.....	132
B.4.2. Sistemas de Linhas de Base Curta.....	133
B.4.3. Sistemas de Linhas de Base Ultra Curta.....	134
B.4.4. Boias Inteligentes com GPS	135
B.5. TRANSDUTOR	135
B.6. TRANSPONDER.....	136
B.7. PROFUNDÍMETRO	136
B.8. SENSOR DE VELOCIDADE POR EFEITO DOPPLER (DVL).....	136
B.9. SENSOR DE ATITUDE	138
APÊNDICE C	139
C.2. GRÁFICOS: MANOBRA DE GIRO EM AMBIENTE MARINHO A 2 M/S – PLANO HORIZONTAL.....	147
C.3. GRÁFICOS: IDENTIFICAÇÃO NO PLANO HORIZONTAL – FILTROS LINEARES – MÉTODOS ESTOCÁSTICOS	161
C.4. GRÁFICOS: IDENTIFICAÇÃO NO PLANO HORIZONTAL – FILTROS LINEARES COM PROCESSAMENTO EM PARALELO	170
C.5. GRÁFICOS: MANOBRA PULSO VERTICAL – IDENTIFICAÇÃO ÂNGULO DE PITCH	183
C.6. Gráficos: Identificação utilizando manobra de Pulso com processamento em paralelo	191
C.7. Gráficos: Manobra PRBS plano vertical – Identificação Ângulo de Pitch.....	200
C.8. Gráficos: Identificação utilizando manobra de PRBS com processamento em paralelo.....	208
C.9. Gráficos: plano vertical – Identificação Taxa de Profundidade	218
C.10. Gráficos: Identificação utilizando Pulso com processamento em paralelo para taxa de profundidade.....	226
C.11. Gráficos: Identificação utilizando PRBS com processamento em paralelo para taxa de profundidade.....	234
C.12. Gráficos: Identificação utilizando PRBS com processamento em paralelo para taxa de profundidade.....	241
ANEXO A	259
A.1.1. FORÇAS E MOMENTOS GERADOS PELA MASSA ADICIONAL	259
ANEXO B	261
B.1.1 ADMENSIONALIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MOVIMENTO.....	261

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, com o desenvolvimento tecnológico, vem crescendo a exploração de oceanos e rios. Essa exploração tem o objetivo de realizar a extração de recursos naturais como petróleo, gás e minérios, como também para realizar a manutenção da segurança do território nacional, utilizando tecnologias específicas militares, onde estas não devem ser detectadas por radares, e também para fins de pesquisas científicas ambientais.

A partir destes fatos e com o objetivo de reduzir os riscos à integridade física dos responsáveis pela a execução desses serviços, o desenvolvimento de veículos submarinos não tripulados de pequeno e médio porte para realizar missões específicas, tem atraído o interesse de instituições públicas e privadas voltadas à tecnologia submarina.

Os veículos submarinos ou robôs submarinos mais comuns encontrados são os AUVs e os ROVs (do inglês Autonomous Underwater Vehicle e Remote Operated Vehicle), podendo caracterizá-los da seguinte forma:

- O ROV é operado de uma estação base; localizada na superfície através de um cabo umbilical, que é responsável pelo fornecimento de energia ao veículo e pela sua comunicação com a superfície. A precisão dos movimentos desse veículo depende essencialmente da habilidade do operador, sendo que atualmente existem alguns tipos de cursos preparatórios para a pilotagem do robô.
- O AUV por sua vez, dispensa o uso do cabo umbilical, possuindo sistema computacional embarcado para a execução de missões pré-programadas. A comunicação com veículo é estabelecida indiretamente, podendo ser efetuada através de sinais acústicos entre o veículo e um transponder flutuante. O fornecimento de energia é proveniente de baterias elétricas a bordo do veículo. A autonomia do veículo também depende da presença de um sistema de navegação, que dispõe de algoritmos de fusão sensorial, que integram e corrigem as informações de movimento recebidas pelos sensores.

Durante o seu desenvolvimento, a avaliação da manobrabilidade de veículos aquáticos é importante para o projeto de seus sistemas de governo (lemes, propulsores, etc) e piloto automático. Modelos matemáticos que descrevem a dinâmica destes veículos são baseados na representação de esforços inerciais, hidrostáticos e hidrodinâmicos, que são funções de variáveis de movimento (deslocamentos, velocidades e acelerações lineares e angulares) da embarcação.

Para a construção destes modelos, faz-se necessária a estimativa de parâmetros de natureza inercial, hidrostática e hidrodinâmica presentes nas respectivas funções. Os métodos de estimação, em relação ao comportamento do veículo ao realizar manobras, incluem testes com modelos em escala em tanques de prova, simulações do escoamento ao redor das embarcações através de técnicas da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), métodos de cálculo analítico e semi-empíricos (ASE) e a aplicação de técnicas de identificação de sistemas.

Cada método mencionado carrega vantagens e desvantagens em relação aos demais, em termos de precisão alcançada e custos envolvidos.

Os maiores geradores de custo são, sem dúvida, os métodos baseados em experimentos com modelos cativos em tanques de prova, entretanto estes experimentos ainda são considerados como os mais confiáveis pela indústria naval tradicional.

A abordagem de menor custo baseia-se na utilização de fórmulas de natureza analítica e semi-empírica, que são estimadas em função da forma geométrica e distribuição de massa dos veículos. Esta carrega limitações na exatidão das estimativas, principalmente em condições de manobra em que esforços de natureza viscosa ganham papel predominante. Além disso, os métodos apresentam dificuldades, em geral, na consideração de imperfeições na superfície do casco das embarcações, tais como sonares, eixos, etc.

Métodos de custo e precisão intermediários incluem as abordagens baseadas na utilização de recursos da dinâmica dos fluidos computacionais e na aplicação de técnicas de identificação de sistemas para ensaios com modelos auto-propelidos. Através da aplicação dos métodos de CFD, este pode alcançar um ganho bem significativo de qualidade em relação aos métodos analíticos, principalmente ao se abordarem geometrias e regimes de escoamentos mais complexos de serem descritos por equações de movimento.

A qualidade e precisão geradas pelo método de CFD têm evoluído nos últimos anos, porém, custos computacionais de hardware e software, bem como a capacitação necessária de pessoas que utilizam os recursos ainda são determinantes ao escolher a análise por esse tipo de abordagem. A qualidade das estimativas baseadas em CFD ainda é questionável em relação aos esforços gerados por efeitos viscosos, que desempenham um papel significativo na dinâmica do movimento, tais como os esforços que surgem em movimentos rotacionais do veículo analisado.

Ensaio com modelos em escala auto-propelidos, ou “modelos livres”, têm apresentado um potencial de aplicação crescente com o aumento da qualidade dos sensores que medem o movimento e a redução de seus custos, bem como dos custos envolvidos na implementação dos veículos. A realização de ensaios demanda recursos de infraestrutura e custos associados bem menores do que aqueles dos ensaios com modelos

cativos em tanques de prova. Por fim, as técnicas de identificação de sistemas, relativas ao processamento dos resultados destes ensaios, podem ser aplicadas a provas de mar para o veículo em escala real, o que é importante para a validação das estimativas dos parâmetros provenientes de quaisquer outras técnicas aplicadas a ensaios com modelos livres, e possibilitando, todavia a eliminação de possíveis problemas relacionados à escala de cada veículo.

Tendo em vista essa tendência na utilização de AUV's, e como forma de validar as pesquisas nas áreas de naval e robótica submarina, o Laboratório de Veículos não Tripulados (LVNT) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desenvolveu um veículo autônomo submarino, que recebeu o nome de Pirajuba. Através desse AUV foi possível realizar manobras de identificação utilizadas nessa dissertação e em outros trabalhos nessa área (CAETANO, et. al., 2013), (DANTAS, et. al. 2013a e 2013b).

1.1. Objetivo

Este trabalho trata da aplicação de técnicas de identificação de sistemas a ensaios com modelos em escala de veículos submarinos ou mesmo com veículos submarinos não tripulados em escala real. Complementa-se, desta forma as investigações que vêm sendo realizadas no Laboratório de Veículos Não Tripulados, LVNT, voltadas à estimativa de parâmetros hidrodinâmicos de veículos autônomos submarinos, AUVs. Estas têm utilizado os métodos pertencentes às três outras classes mencionadas (de BARROS, et. al., 2004, 2006, 2008a, 2008b; de BARROS e DANTAS, 2012).

Os objetivos deste trabalho dizem respeito à compreensão e desenvolvimento na modelagem linear da dinâmica de manobra de veículos submarinos, teoria e implementação de métodos de identificação de sistemas aplicados a resultados de ensaios com modelos auto-propelidos. Especificamente, podem-se mencionar as seguintes metas do trabalho:

- Estudos de modelos lineares e parâmetros de manobrabilidade
- Estudos de métodos de identificação de sistemas dinâmicos lineares
- Investigação de métodos de identificação aplicados à estimativa de modelos lineares de manobra de veículos submarinos
- Proposta de procedimento experimental para os ensaios com modelos livres de veículos submarinos

As atividades do plano de estudo foram divididas de acordo com os temas relativos à dinâmica de veículos submarinos, conceitos físicos envolvidos nas derivadas hidrodinâmicas de estabilidade, técnicas de identificação de sistemas e aspectos tecnológicos e experimentais da utilização de ensaios com modelos auto-propelidos. As etapas são sumarizadas a seguir.

As atividades diretamente voltadas ao atendimento de tais metas envolveram, durante o programa de pesquisa, estudos de modelos analíticos, simulação numérica do movimento, realização de experimentos em piscina e campo com um AUV, e a implementação de ferramentas numéricas de análise de dados e estimação de parâmetros de manobra.

1.2. Revisão Bibliográfica e Estado da Arte

A modelagem da dinâmica de veículos submarinos em espaço de estados é um assunto muito difundido na área da Engenharia Naval, tanto que diversos autores tratam desse assunto, como é o caso de Abkowitz (1972), Fossen (1994 e 2002), Newman (1977) e Lewis (1990). Desta forma, ao iniciar este trabalho, foi apresentada uma modelagem inicial básica, de forma a embasar os métodos de identificação utilizados no decorrer desse projeto, e para facilitar o entendimento do comportamento do AUV quando em operação. Outro trabalho mais recente também desenvolvido nesta área de modelagem e identificação de AUV's pode ser visto em Luque (2012), que utiliza filtros de Kalman estendido e o método de verossimilhança para estimar os coeficientes hidrodinâmicos do veículo.

Durante o desenvolvimento desse projeto foi necessário atentar-se aos parâmetros de caracterização da estabilidade e manobrabilidade de veículos submarinos, para que fosse possível descrever o comportamento do AUV de forma correta. Neste caso foram utilizados os trabalhos de Newman (1977), Nomoto (1960) e Journée (1970 e 2002) como base para os estudos. No caso da modelagem das equações adotou-se a convenção da SNAME (1950).

Sendo o foco da pesquisa relacionado a experimentos com modelos auto-propelidos dos veículos subaquáticos, considerou-se também a investigação de sensores de movimento, cujas informações alimentam os algoritmos de identificação estudados. Pode-se mencionar os sistemas inerciais, bússolas magnéticas, profundímetros, velocímetros Doppler e sistemas acústicos de posicionamento. Informações sobre tecnologias de sensores inerciais e suas aplicações são apresentadas por Lawrence (1998), Junqueira (2003), Zanoni (2007 e 2012) bem como uma análise de técnicas para aperfeiçoar a utilização de suas medições podem ser encontradas em Crossbow (2002).

Os sistemas de posicionamento acústicos atuais como o GIB (em inglês GPS Intelligent Buoy), o LBL (em inglês Long Baseline), o SBL (em inglês Short Baseline) e o USBL (em inglês Ultra Short Baseline), para veículos submarinos não tripulados tais como AUVs e ROVs, têm apresentado seus princípios de funcionamento e suas finalidades de utilização em Desset et al. (2003), Alcocer et al. (2006), LaPointe (2006), Morgado e Silvestre (2009), Whitcomb et al. (1999) e Milne (1983). As técnicas de calibração e alinhamento do sensor de efeito Doppler são apresentadas por Kinsey e Whitcomb (2007),

este artigo utiliza o método de mínimos quadrados, para fazer a estimativa de uma matriz de calibração.

Várias técnicas de identificação de sistemas através de sinais determinísticos já foram aplicadas a modelos de manobra de veículos aquáticos, de maneira geral, sendo que os sinais mais comuns aplicados são os de tipo pulso, degrau e senoidal. Métodos de identificação de sistemas baseados nesses sinais de excitação são apresentados em Aström e Wittenmark (1997), Camacho e Bordons (2004), Garcia (2005 e 2011), Ljung (1999), Soderstrom e Stoica (1989) e Eykhoff (1974). Em relação ao estudo de técnicas de identificação de sistemas referentes a veículos submarinos, foi visto em Booth (1975), Kim et. al (2002), Alessandri et. al. (1998), e Tinker et al. (1979), de Barros et. al. (1992), Luque (2012), Avila (2008) onde são utilizados os sinais do tipo pulso, senoidal e PRBS e também as manobras de zig zag e giro em experimentos para identificar a dinâmica de modelos livres e compará-los com modelos cativos, onde também são destacadas as dificuldades da realização de tais experimentos.

O estudo da identificação da manobrabilidade do AUV foi dividido em relação aos planos horizontal e vertical. Em relação a esta etapa de identificação da dinâmica do veículo no plano horizontal, foram realizadas manobras de giro e zig-zag com o AUV Pirajuba, para que fosse possível estimar a qualidade da manobrabilidade do veículo. Desta forma, foi utilizada a equação de primeira ordem de Nomoto (1960) e Journée (1970 e 2002), onde através de manobras de zig-zag é possível estimar os índices de qualidade K e T, que predizem com grande confiabilidade a manobrabilidade do veículo através de seu ângulo de rumo e suas derivadas. Com o objetivo de aprimorar as previsões de movimento e comparar com o desempenho da equação de Nomoto foram utilizados os filtros ou regressores lineares de identificação ARX, ARMAX, BJ e suas variações para estimar equações de ordem superiores, utilizando o método dos mínimos quadrados para minimizar a função custo objetivo, como visto em Kirk (1998), Garcia (2011), Tao et. al. (2012) e Ljung (1999). Ainda assim, foram utilizadas técnicas de processamento de dados em paralelo, Abkowitz (1980), para refinar as previsões dos filtros lineares na identificação dos coeficientes de manobra.

Para a identificação no plano vertical foram utilizados como base os trabalhos de Tinker (1979) e Booth (1975), que utilizam o sinal de pulso e de Barros et. al. (1992), que utiliza o sinal binário pseudo-aleatório (PRBS) como técnica de identificação de sistemas para identificar o movimento de um AUV. Com isso foram utilizados os mesmos filtros de identificação mencionados anteriormente para o plano horizontal realizando manobras distintas das executadas no plano horizontal, sendo elas realizadas através da excitação do sinal de pulso e de PRBS, aplicadas diretamente nos hidroplanos (profundores) e como a referência do controlador de profundidade, respectivamente com objetivo de prever o

comportamento do veículo através do ângulo de caturro (*pitch*) e também analisando a sua taxa de profundidade pela entrada dos hidroplanos. Para esse plano foram estimadas funções de transferência de segunda e quarta ordem, pois foi percebido através do processo de identificação, um desempenho superior dessas funções em relação às de primeiro grau sem elevar os custos computacionais.

De forma a aliviar a tarefa de identificação aplicada ao veículo em movimento, pode-se estimar alguns dos parâmetros de distribuição de massa através de técnicas mais simples aplicadas ao veículo no ambiente de laboratório. Para realizar estas estimativas, foi realizada a experiência de um pêndulo bifilar, que através de seu período de oscilação e a forma como esse pêndulo é montado, foi possível obter os valores de I_y , I_z e do C.G. Depois de obtidos os respectivos valores, foram realizadas comparações com esses índices estimados através do software de CAD 3D Solidworks. Os procedimentos para a realização da experiência de pêndulo bifilar podem ser encontrados em Hewitt e Waterman (2005) e Chai (2007). Para a implementação de manobras no AUV e para a verificação dos dados técnicos do mesmo, foram utilizados como referência de estudos os trabalhos de Costello et al. (1995), Pascoal et al. (1994), Kojima et al. (1998), Dantas et al. (2011), de Barros et al. (2006, 2008a, 2008b).

1.3. Organização do Texto

As investigações relativas ao plano de estudo foram divididas de acordo com os temas relativos à dinâmica de veículos submarinos, conceitos físicos envolvidos nas derivadas hidrodinâmicas de estabilidade, técnicas de identificação de sistemas e aspectos tecnológicos e experimentais da utilização de ensaios com modelos auto-propelidos. As etapas são sumarizadas a seguir.

No capítulo 2 serão apresentados os modelos matemáticos referentes à modelagem não linear de um AUV e suas propriedades hidrodinâmicas, e posteriormente as equações linearizadas desacopladas em relação aos planos horizontal e vertical. Também são indicadas as aproximações da dinâmica do veículo feitas por Nomoto (1960). No capítulo 3 estão apresentados os métodos de identificação de sistemas dinâmicos mais comumente utilizados na área naval, como a realização de manobras de giro e zig zag para o plano horizontal e a aplicação de sinais do tipo pulso e PRBS no plano vertical. Esses sinais posteriormente são combinados com o método de estimação adequado, na tentativa de estimar o movimento do veículo.

Os resultados obtidos com os testes de identificação são apresentados e analisados no capítulo 4. Nele, propõem-se funções de transferências que melhor descreveram o comportamento do AUV em manobras tipicamente realizadas em suas missões.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre os estudos realizados e sobre a qualidade dos resultados obtidos com a aplicação dos métodos de identificação investigados, bem como sugestões para o prosseguimento desta pesquisa.

2. Modelagem da dinâmica de um veículo autônomo submarino

Os AUVs operantes no ambiente oceânico movem-se através dos esforços produzidos pelos seus propulsores, pelos sistemas de manobras e por excitações geradas pela sua interação com o meio ambiente. No desenvolvimento de AUVs, a modelagem matemática vem sendo utilizada no desenvolvimento de simuladores, sistemas de controle, determinação do desempenho destes veículos, dimensionamento estrutural, navegação, entre outras aplicações.

Nesse capítulo será apresentada a modelagem matemática da dinâmica do AUV, a partir das equações de movimento do veículo. A seguir, através da simplificação e linearização dessas equações, serão gerados outros modelos representativos da dinâmica do veículo, que serão aproveitados nas aplicações dos métodos de identificação de sistemas analisados nos capítulos posteriores.

2.1. O AUV Pirajuba

Através dos trabalhos de Dantas et al. (2012 e 2013b) e de Barros et al. (2010 e 2011) é possível conhecer mais sobre o desenvolvimento, os equipamentos e o modo de operação durante os últimos anos sobre o AUV Pirajuba. Atualmente, o AUV Pirajuba se encontra em sua terceira versão, onde a estrutura de seu casco é constituída por fibra de vidro, sendo que este recebe um enchimento de espuma de PVC expandido, servindo de flutuador, e três vasos de pressão internos: o principal, o de manobra e o propulsor, conforme visto na figura 2.1.

O AUV Pirajuba possui quatro superfícies de controle dispostas na posição cruz (duas superfícies de controle no plano horizontal e duas no plano vertical), localizadas próximas à sua popa. Desta forma, pode-se garantir maior manobrabilidade ao veículo, sem que sejam gerados efeitos de rolagem.

Os equipamentos embarcados no veículo estão situados dentro de três vasos de pressão, que fornecem a proteção dos componentes eletroeletrônicos ao contato com a água e resistem à pressão hidrostática que surge durante a imersão do veículo. Esses três vasos internos são:

- Vaso principal;
- Vaso de manobra;
- Vaso propulsor.

O vaso principal carrega as unidades eletrônicas de aquisição e processamento de dados, unidades de comando embarcadas, sistemas de comunicação, eletrônicas de potência e sensores de navegação, presença de líquido e sobrecarga. Todos os equipamentos embarcados são alimentados através de baterias de polímero de lítio, também posicionadas no vaso principal, de forma a oferecer uma distribuição de massa conveniente à estabilidade hidrostática (resultando no centro de massa e mais distante possível do centro de flutuação e proporcionando o nivelamento do veículo).

O vaso de manobra é composto pelos sistemas de servomecanismo, responsáveis por movimentar as superfícies de controle e pela eletrônica de controle do propulsor.

Um motor DC de 150W acoplado a um hélice Kaplan da série Wageningen é utilizado como sistema de propulsão do veículo, e este está protegido no interior do vaso de propulsão.

O sistema de navegação do AUV Pirajuba é composto pelo sensor externo de pressão, utilizado para medir a profundidade, uma unidade de medição inercial (IMU, Inertial Measurement Unit), que é utilizada primariamente para que se obtenha a orientação do veículo, uma bússola que, em conjunto com a IMU, é responsável por indicar o rumo do veículo e, finalmente, um velocímetro Doppler (DVL, Doppler Velocity Log), que serve para medir as velocidades lineares do veículo.

As características geométricas do corpo deste veículo são apresentadas nas tabelas 2.1 e 2.2.

Figura 2. 1: Detalhe da construção do AUV Pirajuba.

Tabela 2. 1: Parâmetros Geométricos do Corpo do AUV Pirajuba.

Parâmetros AUV Pirajuba	Dimensões
Comprimento Total [m]	1,742
Diâmetro Externo Max. [m]	0,234
Diâmetro da base [m]	0,057
Comprimento da proa [m]	0,217
Comprimento do Corpo [m]	1,246

Tabela 2. 2: Parâmetros geométricos das superfícies de controle do AUV Pirajuba.

Parâmetros AUV Pirajuba	Dimensões
Altura [m]	0,160
Corda na Raiz [m]	0,090
Corda na Ponta [m]	0,060
Enflexamento	Simétrico
Perfil	NACA 0012
Posição do bordo de Ataque [m] (Em relação à proa)	1.373

Esta geometria é muito utilizada por outros inúmeros AUVs, por aproveitarem de forma bastante satisfatória o espaço interno do veículo, que por sua vez acomoda a maioria dos equipamentos embarcados. Outra qualidade importante dessa estrutura de casco é representada por suas boas características hidrodinâmicas (baixo arrasto e facilidade na predição de algumas características de manobra).

2.2. Equações de movimento

Para realizar a modelagem do AUV é necessário adotar um sistema de referência que, preferencialmente, facilite o equacionamento do movimento do AUV. Para esta finalidade, foram utilizadas como base as nomenclaturas de movimento navais sugeridas por SNAME (1950) e Dantas (2012). Na tabela 2.3, são apresentadas estas nomenclaturas em inglês e português.

Tabela 2. 3: Nomenclatura usual para movimentos navais, segundo SNAME (1950) e Dantas (2012).

Símbolo	Eixo de Referência	Nomenclatura em inglês	Nomenclatura em português
x_0	x	<i>Surge</i>	Avanço
y_0	y	<i>Sway</i>	Deriva
z_0	z	<i>Heave</i>	Arfagem
Φ	x	<i>Roll</i>	Jogo
θ	y	<i>Pitch</i>	Caturro
Ψ	z	<i>Yaw</i>	Guinada

Figura 2. 2: Sistema de coordenadas fixo e móvel utilizado no AUV Pirajuba.

Admite-se que o referencial da Terra OXYZ é um sistema de coordenadas fixo num ponto convenientemente escolhido sobre a superfície da água onde o veículo realizará suas manobras. O eixo Z aponta na direção vertical de modo que sua ordenada indica diretamente a profundidade do veículo e os outros eixos formam em conjunto com Z um sistema positivo.

A origem do referencial móvel xyz é definida no centro de flutuabilidade (C.B.) do veículo. Os eixos xy e xz correspondem aos planos de simetria do veículo. Com essa escolha de origem para o sistema de eixos devido a simetrias, são cancelados alguns esforços hidrodinâmicos (ABKOWITZ 1980).

2.2.1. Modelo Cinemático

A cinemática pode ser definida como o ramo da física que estuda as equações matemáticas que descrevem o movimento de um corpo, sem se preocupar com a análise de suas causas, ou seja, as equações cinemáticas são utilizadas para descrever as posições, velocidades e acelerações de um corpo com seus estados conhecidos.

O equacionamento cinemático no caso dos AUVs é mais comumente utilizado como um instrumento de mudança de coordenadas inerciais (referência fixa), para as coordenadas não inerciais (referencial no veículo), conforme ilustrado na figura 2.2. Desta forma, é possível escrever a seguinte equação:

$$\vec{P}_i = [T] \cdot \vec{P}_{ni} \quad (2.1)$$

onde:

- $\vec{P}_{ni}$ é uma grandeza vetorial representada num referencial não inercial;
- $\vec{P}_i$ é uma grandeza vetorial representada num referencial considerado inercial;
- $[T]$ é uma matriz de transformação de coordenadas.

Tendo em vista as definições acima, a relação matemática entre os dois sistemas de coordenadas pode ser representada por uma matriz, a “matriz de rotação”. Seus componentes podem ser descritos em função dos ângulos de Euler (KLEIN, 2006) e (FOSSEN,1994). A matriz de rotação é obtida pela rotação independente e consecutiva ao redor de cada eixo do sistema de coordenadas não inercial na sequencia de movimentos que o faz coincidir com o sistema solidário ao veículo. A sequência adota neste trabalho coincide com aquela geralmente utilizada na dinâmica de veículos aéreos e marítimos (SNAME (1950) e ABKOWITZ (1972)). Ou seja, adota-se a sequência de rotações em torno de eixos consecutivos Z, Y' e X". A matriz de rotação T está representada conforme a equação (2.2) e as relações mostradas na figura 2.3.

Figura 2. 3: Exemplo de rotação do sistema de coordenadas da plataforma para o sistema XYZ: yaw (a), pitch (b) e roll (c), (ZANONI, 2012).

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Conforme também indica a figura 2.3, é possível obter-se uma relação entre as componentes da velocidade angular nos eixos x, y e z (velocidades p, q, r respectivamente), e os vetores cujas magnitudes são as taxas temporais dos ângulos de Euler ($\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$):

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & \cos(\theta) \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

A matriz inversa da utilizada na relação acima fornece, portanto, a relação entre as leituras de sensores de velocidade angular solidários ao corpo e as taxas de variação dos ângulos de Euler (equação 2.4).

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi) \tan(\theta) & \cos(\phi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) \sec(\theta) & \cos(\phi) \sec(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Para o caso em que os AUVs realizem navegações de grandes distâncias com sistemas inerciais de alta precisão, faz-se necessária a introdução de correções, que levem em conta a geometria e a rotação da Terra. Em Brown e Hwang (1997) pode ser encontrado o equacionamento cinemático para estas condições. Tal não é o caso da maioria das missões em que um AUV como o Pirajuba é utilizado atualmente.

2.2.2. Modelo dinâmico

O modelo dinâmico relaciona as excitações, esforços aplicados no veículo, com as taxas de variação em suas velocidades linear e angular. Embora essas variações sejam absolutas, isto é, tomadas em relação ao referencial adotado como inercial, suas expressões matemáticas são escritas utilizando variáveis de movimento e de distribuição de massa representadas no referencial solidário ao corpo. Justifica-se a escolha, pois, pode-se utilizar diretamente as informações de movimento que são obtidas por sensores solidários ao veículo, podendo-se modelar com maior facilidade neste referencial os esforços atuantes, bem como se podem medir facilmente os parâmetros de distribuição de massa em relação a um sistema como o representado por oxyz.

Com esta escolha, o cálculo da taxa de variação temporal das variáveis de movimento é realizado de acordo com a expressão da derivada total, ou absoluta, onde comparecem os termos de derivada explícita no tempo e o termo de arrastamento, devido à existência da mudança de orientação de um sistema de referência em relação ao outro. Ou seja, para uma grandeza vetorial $\vec{X}$ representada no referencial solidário ao corpo, a expressão de sua derivada em relação ao referencial inercial é calculada por:

$$\frac{d\vec{X}}{dt} = \frac{\partial \vec{X}}{\partial t} + \vec{\omega} \times \vec{X} \quad (2.5)$$

onde $\vec{\omega}$ é a velocidade angular do referencial oxyz, que é a velocidade angular do veículo expressa neste mesmo referencial.

Para o movimento de translação, com base no Teorema do Movimento do Baricentro (França e Matsumura, 2011) para o movimento de corpos rígidos, a resultante das forças externas agindo sobre o veículo é igual à taxa de variação do momento linear, calculado como se toda a massa do AUV estivesse concentrada no seu centro de massa. Ou seja,

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \dot{\vec{U}}_G \quad (2.6)$$

onde:

$$- \sum \vec{F}_{ext} = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k} \quad (2.7)$$

representa o somatório das forças externas aplicadas ao AUV, expresso no sistema oxyz;

- m é a massa do veículo (suposta invariante no tempo)

- $\vec{U}_G$ é o vetor velocidade do centro de massa do veículo, cuja expressão no sistema oxyz fica:

$$\vec{U}_G = \vec{U} + \vec{\omega} \times \vec{p}_G \quad (2.8)$$

onde,

$$\vec{U} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \quad (2.9)$$

é o vetor velocidade da origem “o” expresso no sistema solidário ao corpo (oxyz),

$$\vec{\omega} = p\vec{i} + q\vec{j} + r\vec{k} \quad (2.10)$$

é a velocidade angular do AUV expressa no sistema oxyz e

$$\vec{p}_G = x_G\vec{i} + y_G\vec{j} + z_G\vec{k} \quad (2.11)$$

é o vetor posição do centro de massa do AUV expresso em coordenadas do sistema solidário ao veículo, oxyz.

Logo, o vetor aceleração do centro de massa, expresso no sistema oxyz, é obtido através da derivada absoluta da expressão (2.8):

$$\dot{\vec{U}}_G = \dot{\vec{U}} + \vec{\omega} \times \vec{U} + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{p}_G + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{p}_G) \quad (2.12)$$

Aplicando as expressões (2.7) a (2.12) em (2.6), resulta na expressão da equação de movimento para cada uma das coordenadas do sistema solidário:

$$X = m \cdot [\dot{u} + q \cdot w - r \cdot v - x_G \cdot (q^2 + r^2) + y_G \cdot (p \cdot q - \dot{r}) + z_G \cdot (p \cdot r + \dot{q})] \quad (2.13a)$$

$$Y = m \cdot [\dot{v} + r \cdot u - p \cdot w - y_G \cdot (r^2 + p^2) + z_G \cdot (q \cdot r - \dot{p}) + x_G \cdot (q \cdot p + \dot{r})] \quad (2.13b)$$

$$Z = m \cdot [\dot{w} + p \cdot v - q \cdot u - z_G \cdot (p^2 + q^2) + x_G \cdot (r \cdot p - \dot{q}) + y_G \cdot (r \cdot q + \dot{p})] \quad (2.13c)$$

A equação de momento angular, expressa no referencial solidário ao corpo (onde momentos de inércia e posições do centro de massa são facilmente expressos), é obtida pela aplicação do Teorema do Momento Angular (França e Matsumura, 2011). De acordo com o mesmo, a resultante dos momentos externos que agem no veículo é igual à taxa de variação de momento angular em relação ao tempo.

Para a sua apresentação, utiliza-se a definição do momento angular de um corpo rígido representado pelo conjunto de pontos materiais interligados:

$$\vec{H}_o = \sum \vec{r}_i \times m_i \vec{v}_i \quad (2.14)$$

onde,

- $\vec{H}_o$ é o momento angular do AUV em relação à origem do sistema solidário oxyz;
- $\vec{r}_i$ é o vetor posição de um ponto material π_i do corpo rígido em relação à origem do sistema solidário oxyz;
- $\vec{v}_i$ é o vetor velocidade de π_i em relação ao sistema inercial OXYZ;
- m_i é a massa de π_i ;

A derivada temporal da expressão (2.14), utilizando a definição de centro de massa, pode ser representada por:

$$\dot{\vec{H}}_o = \vec{M}_{oext} + m \vec{U}_G \times \vec{U} \quad (2.15)$$

onde

$$\vec{M}_{oext} = K\vec{i} + M\vec{j} + N\vec{k} \quad (2.16)$$

é o momento aplicado pelos esforços externos em relação ao pólo “o”, expresso no sistema solidário oxyz.

Por outro lado, aplicando a expressão (2.8) na definição (2.14), pode-se obter a expressão do mesmo momento angular do veículo no sistema solidário oxyz (França e Matsumura, 2011):

$$\vec{H}_o = m\vec{p}_G \times \vec{U} + \vec{H} \quad (2.17)$$

onde,

- $\vec{H}_o$ é o momento angular do veículo em relação ao referencial inercial, porém, expresso no referencial solidário ao AUV.

$$\vec{H} = H_x\vec{i} + H_y\vec{j} + H_z\vec{k} \quad (2.18)$$

cujo cálculo pode ser expresso na forma matricial, pela aplicação do tensor de inércias sobre o vetor velocidade angular, ambos tomados em relação ao sistema oxyz:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Ou seja,

$$\vec{H} = I_o(\vec{\omega}) \quad (2.20)$$

Calculando-se a derivada absoluta de (2.16) e igualando o resultado a (2.14), obtém-se a expressão do teorema no momento angular desejado:

$$\vec{M}_{oext} = \vec{\omega} \times I_o(\vec{\omega}) + I_o(\dot{\vec{\omega}}) + m\vec{p}_G \times \dot{\vec{U}} \quad (2.21)$$

Aplicando as expressões (2.9) a (2.11), (2.19) e (2.20) em (2.21), para cada componente do momento aplicado no veículo, tem-se:

$$\begin{aligned} K = & I_x \cdot \dot{p} + (I_z - I_y) \cdot q \cdot r - I_{xz} \cdot (\dot{r} + p \cdot q) + I_{yz} \cdot (r^2 - q^2) + I_{xy} \cdot \\ & (p \cdot r - \dot{q}) + m \cdot [y_G \cdot (\dot{w} - u \cdot q + v \cdot p) - z_G \cdot (\dot{v} - w \cdot p + u \cdot r)] \end{aligned} \quad (2.22a)$$

$$M = I_y \cdot \dot{q} + (I_x - I_z) \cdot p \cdot r - I_{xy} \cdot (\dot{p} + q \cdot r) + I_{xz} \cdot (p^2 - r^2) + I_{yz} \cdot (p \cdot q - \dot{r}) + m \cdot [z_G \cdot (\dot{u} - v \cdot r + w \cdot q) - x_G \cdot (\dot{w} - u \cdot q + v \cdot p)] \quad (2.22b)$$

$$N = I_z \cdot \dot{r} + (I_y - I_x) \cdot p \cdot q - I_{yz} \cdot (\dot{q} + p \cdot r) + I_{xy} \cdot (q^2 - p^2) + I_{xz} \cdot (q \cdot r - \dot{p}) + m \cdot [x_G \cdot (\dot{v} - w \cdot p + u \cdot r) - y_G \cdot (\dot{u} - v \cdot r + w \cdot q)] \quad (2.22c)$$

Os conjuntos de expressões apresentados em (2.13) e (2.22), representam as equações de movimento do AUV, no sistema solidário oxyz, relacionando as variáveis de movimento e suas derivadas temporais com os esforços externos aplicados sobre o veículo.

2.3. Esforços Hidrostáticos

Os esforços de gravidade e empuxo são gerados pela aceleração da gravidade e flutuabilidade, respectivamente. É usual que estas duas forças sejam representadas por um único termo, expresso em função da diferença entre peso e empuxo. As forças peso (mg) e empuxo ($\rho \nabla$) são representadas em suas componentes no sistema oxyz com a utilização dos ângulos inerciais (ângulos de Euler). Já os momentos levam em conta as posições do centro de massa e do centro de empuxo (ou carena, usando a terminologia naval) em relação à origem do sistema oxyz. O centro de massa possui coordenadas $[x_G; y_G; z_G]$, enquanto o centro de empuxo, em geral, possui como coordenadas os mesmos valores a menos da coordenada “z”, ou seja, admite-se que ambos estejam na mesma vertical, não gerando momento quando o veículo está em repouso. Em alguns casos, para se compensar o momento de reação provocado pelo propulsor, coloca-se o centro de massa pouco deslocado na coordenada “y”.

De qualquer forma, a expressão geral desses esforços é dada por:

$$F_G + F_B = F_{GB} = g \begin{bmatrix} -(m - \rho \nabla) \sin(\Theta) \\ (m - \rho \nabla) \sin(\Phi) \cdot \cos(\Theta) \\ (m - \rho \nabla) \cos(\Phi) \cdot \cos(\Theta) \\ (m y_G - \rho \nabla y_B) \cos(\Phi) \cos(\Theta) - (m z_G - \rho \nabla z_B) \sin(\Phi) \cos(\Theta) \\ (m x_G - \rho \nabla x_B) \cos(\Phi) \cos(\Theta) - (m z_G - \rho \nabla z_B) \sin(\Theta) \\ -(m x_G - \rho \nabla x_B) \sin(\Phi) \cos(\Theta) + (m y_G - \rho \nabla y_B) \sin(\Theta) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Sendo:

- ρ a massa específica do fluido;
- ∇ o volume de todo o veículo;
- m a massa do veículo;
- g o módulo da aceleração da gravidade local.

2.4. Esforços Hidrodinâmicos

Os esforços hidrodinâmicos são, sem sombra de dúvida, os mais difíceis de se estimar e por si justificam a utilidade da aplicação de métodos de identificação de sistemas na construção de modelos dinâmicos de AUVs. Efeitos viscosos de difícil modelagem, assimetrias na geometria do veículo e manobras complexas produzem as dificuldades para a construção de modelos usando métodos tradicionais de estimativa, tais como os analítico e semi-empíricos. Mesmo a aplicação de abordagens numéricas (CFD) sofreria o impacto na modelagem e execução de simulações do escoamento na tentativa de levar em conta assimetrias devido à presença de apêndices externos ao casco (sensores, antenas, transmissores acústicos, etc).

2.4.1. Massa Adicional

Independentemente dos efeitos da viscosidade, quando um corpo submerso em um fluido está em movimento com aceleração não nula, surgem esforços de resistência a este movimento. Tais esforços correspondem, em magnitude, a aqueles necessários para alterar a energia cinética do fluido que se encontra ao redor do corpo.

A partir da expressão da energia cinética do fluido ideal (sem viscosidade), usando as componentes das velocidades linear e angular no referencial $oxyz$, a expressão desses esforços é derivada, resultando no somatório de produtos entre coeficientes e as acelerações lineares ou entre coeficientes e as acelerações angulares (Anexo A). No primeiro caso, os coeficientes são denominados de massa adicional, enquanto que, no segundo caso, esses são denominados momentos adicionais.

Adotando-se a convenção da SNAME para a nomenclatura desses coeficientes, para cada coordenada do sistema $oxyz$, tem-se:

$$X_{ADD} = X_{\dot{u}}\dot{u} + Z_{\dot{q}}\dot{q}^2 + -Y_{\dot{v}}vr - Y_{\dot{r}}r^2 \quad (2.24a)$$

$$Y_{ADD} = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + -Y_{\dot{v}}vr - X_{\dot{u}}ur \quad (2.24b)$$

$$Z_{ADD} = Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} - X_{\dot{u}}uq - X_{\dot{q}}q^2 \quad (2.24c)$$

$$K_{ADD} = K_{\dot{p}} \dot{p} \quad (2.24d)$$

$$M_{ADD} = Z_{\dot{q}}(\dot{w} - uq) + M_{\dot{q}} \dot{q} - (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})wu - X_{\dot{q}} q^2 \quad (2.24e)$$

$$N_{ADD} = N_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\dot{r}} \dot{v} - (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})uv + Y_{\dot{r}} ur \quad (2.24f)$$

As equações acima são resultado de uma simplificação significativa da expressão original proveniente da dinâmica do veículo afetada pela massa adicional. Podem-se eliminar vários termos na expressão dos esforços devido a massas adicionais, ao se considerar a simetria geométrica do AUV Pirajuba em relação aos planos “vertical” (xz) e “horizontal” (xy):

$$X_{\dot{v}} = X_{\dot{w}} = Y_{\dot{w}} = 0 \quad (2.25a)$$

$$X_{\dot{p}} = X_{\dot{q}} = X_{\dot{r}} = Y_{\dot{p}} = Y_{\dot{q}} = Z_{\dot{p}} = Z_{\dot{r}} = 0 \quad (2.25b)$$

$$K_{\dot{q}} = K_{\dot{r}} = M_{\dot{r}} = 0 \quad (2.25c)$$

Além disso, será admitido que o movimento é realizado separadamente nos planos XY e XZ, desprezando-se o ângulo de banda e suas taxas de variação com o tempo ($\dot{P}$ e $\dot{P}$). Com isso, o efeito de esforços hidrodinâmicos devido ao movimento de banda é desprezado:

$$K_{ADD} = 0 \quad (2.26)$$

2.4.2. Amortecimento

Esforços hidrodinâmicos denominados, neste trabalho como esforços de amortecimento provenientes do meio onde o AUV esta submerso, e são expressos em função das componentes u,v,w,p,q,r. Estes surgem como consequência dos fenômenos de arrasto e sustentação atuando sobre o casco e superfícies de controle (lemes). Junto com os esforços provenientes do termo composto pela massa adicional, atuam sobre o veículo em movimento. De fato, a separação entre as duas categorias é didática. A sustentação, por exemplo, costuma ser estimada em métodos analíticos e semi-empíricos, através de considerações sobre o escoamento ideal em conjunto com efeitos explicados pela existência da viscosidade. A integração entre ambos os modelos, nos casos pertinentes, será considerada na derivação das funções de transferência apresentadas na sequência.

A modelagem física desses esforços pode ser complexa e pouco precisa (de Barros et al. 2008a), devido à influência da viscosidade, mesmo em cascos com geometria simples, como é o caso do AUV Pirajuba. O procedimento usual em modelos de manobra é

descrever estes esforços como expansões em série de Taylor em torno de uma condição de equilíbrio dinâmico, geralmente adotada como aquela referente a um movimento com velocidade de cruzeiro constante representada por um vetor de módulo, U , na direção do eixo longitudinal do veículo. Os coeficientes da série são então estimados através de testes com o modelo cativo em tanques de prova ou testes com o modelo auto-propelido. Esta última é a abordagem adotada neste trabalho. Além disso, aplica-se a condição de movimentos independentes realizados separadamente nos planos xy e xz , conforme descrito no início desta seção.

Com estas hipóteses, a expressão de cada esforço de amortecimento hidrodinâmico fica reduzida à expansão em série de Taylor em torno de um número menor de variáveis:

$$X_D = X(u) = X_D(U) + (u - U) \left. \frac{dX_D(u)}{du} \right|_{u=U} + \frac{1}{2!} (u - U)^2 \left. \frac{d^2 X_D(u)}{du^2} \right|_{u=U} + \dots \quad (2.27a)$$

$$Y_D = Y_D(u, v, r) = Y_D(U, 0, 0) + (u - U) \left. \frac{\partial Y_D}{\partial u} \right|_{u=U, v=0, r=0} + v \left. \frac{\partial Y_D}{\partial v} \right|_{u=U, v=0, r=0} + r \left. \frac{\partial Y_D}{\partial r} \right|_{u=U, v=0, r=0} + \dots \quad (2.27b)$$

$$Z_D = Z(u, w, q) = Z_D(U, 0, 0) + (u - U) \left. \frac{\partial Z_D}{\partial u} \right|_{u=U, w=0, q=0} + w \left. \frac{\partial Z_D}{\partial w} \right|_{u=U, w=0, q=0} + q \left. \frac{\partial Z_D}{\partial q} \right|_{u=U, w=0, q=0} + \dots \quad (2.27c)$$

$$M_D = M(u, w, q) = M_D(U, 0, 0) + (u - U) \left. \frac{\partial M_D}{\partial u} \right|_{u=U, w=0, q=0} + w \left. \frac{\partial M_D}{\partial w} \right|_{u=U, w=0, q=0} + q \left. \frac{\partial M_D}{\partial q} \right|_{u=U, w=0, q=0} + \dots \quad (2.27d)$$

$$N_D = N(u, v, r) = N_D(U, 0, 0) + (u - U) \left. \frac{\partial N_D}{\partial u} \right|_{u=U, v=0, r=0} + v \left. \frac{\partial N_D}{\partial v} \right|_{u=U, v=0, r=0} + r \left. \frac{\partial N_D}{\partial r} \right|_{u=U, v=0, r=0} + \dots \quad (2.27e)$$

onde, $\Delta U = u - U$.

2.4.3. Propulsão

O sistema de propulsão de um veículo subaquático é composto por um hélice acoplado a um motor, tipicamente de corrente contínua. O propulsor gera uma força de propulsão e um momento. A força de propulsão atua segundo a direção do eixo de rotação do hélice, com sinal dependente do sentido de rotação.

Considerando o modelo em que o veículo encontra-se em velocidade de cruzeiro constante, onde a força de propulsão e a força de arrasto hidrodinâmica estão em equilíbrio e se despreza, a princípio, oscilações na resistência ao avanço devido à manobra do veículo, estes esforços podem ser estimados pelos parâmetros do hélice ou hélice-duto caso haja um duto, em função da rotação do hélice (n) e da velocidade em que o veículo se encontra (U).

A obtenção dos parâmetros do hélice é realizada, em geral, empiricamente, através de ensaios em tanque de provas. Estes coeficientes são expressos nas formas adimensionais dos esforços de tração e torque resistivo, onde é definido o termo K_T para a tração gerada pelo hélice, K_Q para o torque absorvido (resistivo) pelo hélice.

Para estimar os parâmetros do hélice, primeiramente deve-se encontrar o ponto de operação do sistema, onde a tração requerida pelo veículo ($K_{T(req)}$) se iguala à tração fornecida pelo hélice (K_T). Esta tração requerida pode ser calculada pela equação (2.28).

$$K_{T(req)} = \frac{T_{req}}{\rho \cdot D_h^2 \cdot U^2 \cdot (1-\omega)^2} \cdot J^2 \quad (2.28)$$

onde:

- U é a velocidade de operação do veículo;
- D_h é o diâmetro do hélice;
- ω é o coeficiente de esteira do veículo;
- J é o coeficiente de avanço;
- T_{req} é o empuxo requerido para superar o arrasto do veículo (F_D).

O coeficiente de esteira do veículo ω_e relaciona a velocidade do veículo com a velocidade do escoamento que chega ao hélice, ou seja, o termo $U(1-\omega_e)$, conhecido como velocidade de avanço, representa a verdadeira velocidade do escoamento na região do hélice. O coeficiente J , conhecido como coeficiente de avanço representa esta velocidade, na sua forma adimensional:

$$J = \frac{U(1-\omega_e)}{D_h n} \quad (2.29)$$

Para se representar a resistência sofrida pelo veículo em velocidade de cruzeiro, utiliza-se inicialmente a expressão do arrasto hidrodinâmico:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot U^2 \quad (2.30)$$

sendo:

- C_D é o coeficiente de arrasto, função da velocidade relativa entre veículo e fluido, e de propriedades físicas do fluido;

- A é uma área de referência, tal como o comprimento ao quadrado ou a área transversal calculada na seção de maior diâmetro do veículo.

A força de empuxo proveniente da rotação do propulsor deve ser pouco maior que o arrasto calculado pela expressão anterior. Isto porque, a própria ação do propulsor altera o campo de pressões na popa, fazendo com que haja um aumento líquido da resistência que o veículo enfrenta. Este acréscimo é representado pelo coeficiente de “redução de empuxo”, comumente representado por “ t ”. Ou seja,

$$T_{req} = \frac{F_D}{1-t} \quad (2.31)$$

onde, $0 \leq t < 1$.

O motor do sistema propulsivo deve ser capaz de fornecer energia ao hélice de maneira a impor a velocidade de rotação n necessária ao empuxo requerido. Para tal, deve fornecer o torque igual a aquele, de natureza hidrodinâmica, que se opõe ao movimento do hélice. Esse torque resistivo é dado por

$$Q_p = K_Q \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D_h^5 \quad (2.32)$$

Deve-se salientar que as equações apresentadas são obtidas em condições de regime permanente. Sua aplicação na modelagem de um sistema dinâmico é, portanto, também uma aproximação. No modelo de manobra adotado neste trabalho, para servir de base ao processo de identificação de parâmetros, foi admitido que o propulsor gira a uma velocidade constante, n_0 , produzindo também empuxo invariante no tempo, T_0 , de forma a equilibrar a resistência hidrodinâmica (arrasto) e produzir a velocidade de cruzeiro constante e de intensidade U .

2.4.4. Esforços Produzidos pelo Sistema de Manobra

Em um AUV de cruzeiro típico, como o Pirajuba, as manobras do veículo são produzidas por superfícies de controle: os lemes verticais, doravante denominados lemes e os horizontais, que serão referidos como profundores. Em ambos os casos, trata-se de perfis de asa, cujos esforços fundamentais produzidos são a força de sustentação (L_f), o arrasto (D_f) e o momento (M_f). Este último é função da distribuição de pressão na superfície de controle e será desprezado neste trabalho, face ao momento que a força de sustentação produz em relação a um polo localizado no centro de flutuação do veículo (origem usual do

sistema de coordenadas oxyz). As forças de sustentação e de arrasto podem ser representadas pela expressão 2.33:

Figura 2. 4: Representação das forças atuantes no leme.

$$L_f = \frac{1}{2} C_{L_f} \rho A_f U_f^2 \quad (2.33a)$$

$$D_f = \frac{1}{2} \rho C_{D_f} A_f U_f^2 \quad (2.33b)$$

Admite-se que os lemes são perfis de asa simétricos (como alguns da família NACA), sem cambagem, e não possuem estrutura fixa no casco, ou seja, totalmente móveis, como no caso do AUV Pirajuba. Neste caso, a força de sustentação é produzida através da presença de um ângulo de incidência do escoamento em relação à superfície de controle, ou seja, com a ocorrência de um ângulo de ataque entre a direção do escoamento e o eixo longitudinal do perfil (figura 2.4). No caso representado na figura (2.4), o ângulo de ataque produzido é o próprio ângulo de deflexão do leme. Tomando o caso da força vertical em oz e a força longitudinal em ox oriundas das deflexões no profundor, por exemplo, tem-se:

$$F_{Lz} = L_f = -\frac{1}{2} \rho C_{L_f} (\delta_E) U_f^2 \quad (2.34a)$$

$$F_{Lx} = D_f = -\frac{1}{2} \rho C_{D_f} (\delta_E) U_f^2 \quad (2.34b)$$

A força na direção vertical, F_{Lz} , causa o momento em relação à origem do sistema oxyz, na direção do eixo oy, com sentido oposto ao mesmo e cujo valor algébrico é:

$$M_{Ly} = -x_{\delta_E} F_{Lz} \quad (2.35)$$

onde,

- x_{δ_e} é a coordenada do centro de aplicação da força F_{L_z} (centro hidrodinâmico da superfície de controle).

2.5. Linearização das equações de movimento

Conforme apresentado nas seções anteriores, as condições de simetria e as manobras independentes nos planos horizontal e vertical já propiciam uma simplificação considerável para a análise dos esforços aplicados ao veículo. Como etapa final no processo de simplificação das equações de movimento, aplica-se a linearização às mesmas. Modelos lineares podem ser então utilizados no entendimento e caracterização de aspectos fundamentais da dinâmica do veículo, bem como serem aproveitados diretamente no projeto de pilotos automáticos baseados em técnicas clássicas e comumente empregadas no desenvolvimento de algoritmos de controle de servomecanismos e sistemas mecatrônicos de maneira geral.

O processo de linearização é realizado pelo truncamento da expansão em séries de Taylor nos termos lineares ou, considerando a técnica de perturbações, desprezando-se termos de ordem maior ou igual a 2. A condição em torno da qual se realiza a linearização é definida pelo movimento do AUV com velocidade constante, de intensidade U , alinhada com seu eixo longitudinal (“ x ”). As demais variáveis de movimento, expressas no sistema $oxyz$, e suas derivadas temporais, são nulas nesta condição, que é a de equilíbrio dinâmico. Nesta situação, admite-se também que o veículo tenha flutuabilidade neutra (peso e empuxo hidrostático se equilibram) e esteja nivelado (são nulos os ângulos de banda e caturro) e não se consideram variações na rotação e empuxo fornecidos pelo propulsor. Ou seja:

$$u = u_0 = U, v_0 = w_0 = p_0 = q_0 = r_0 = 0, \theta_0 = \phi_0 = 0, \psi = \psi_0, ,$$

$$\delta_e = \delta_{e0}, \delta = \delta_0, n = n_0, T = T_0,$$

e

$$\dot{u}_0 = \ddot{u}_0 = \dots = \dot{v}_0 = \ddot{v}_0 = \dots = \dot{w}_0 = \ddot{w}_0 = \dots = \dot{p}_0 = \ddot{p}_0 = \dots = \dot{q}_0 = \ddot{q}_0 = \dots = 0$$

Com isto, os esforços inerciais se reduzem a:

$$m[\Delta \dot{u} - y_G \dot{r} + z_G \dot{q}] = X_{\dot{u}} \Delta \dot{u} + X_u \Delta u + X_{\delta} \Delta \delta + X_{\delta_e} \Delta \delta_e \quad (2.36)$$

onde:

$$\bullet \quad X_u = \left. \frac{\partial X_D}{\partial u} \right|_{u=U, \delta_e=\delta_{e0}, \delta=\delta_0} ;$$

- $X_{\delta} = -\frac{1}{2}\rho U_f^2 A_f \frac{\partial C_D(\delta)}{\partial \delta} \Big|_{\delta=\delta_0};$
- $X_{\delta_e} = -\frac{1}{2}\rho U_f^2 A_f \frac{\partial C_D(\delta_e)}{\partial \delta_e} \Big|_{\delta_e=\delta_{e0}}$

Em geral, considerando os valores de δ_0 e δ_{e0} próximos de zero, os parâmetros X_{δ} e X_{δ_e} são desprezíveis.

$$m[\dot{v} + rU + x_G \dot{r}] = Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} - X_u Ur + Y_v v + Y_r Ur + Y_{\delta} \Delta \delta \quad (2.37)$$

onde:

- $Y_v = \frac{\partial Y_D}{\partial v} \Big|_{u=U, v=0, r=0};$
- $Y_r = \frac{\partial Y_D}{\partial r} \Big|_{u=U, v=0, r=0} - X_u Ur;$
- $Y_{\delta} = \frac{\partial Y_L}{\partial \delta} \Big|_{v=0, r=0, \delta=\delta_0} = \frac{1}{2}\rho A_f U_f^2 \frac{\partial C_L(\delta)}{\partial \delta} \Big|_{\delta=\delta_0}$

$$m[\dot{w} - Uq + x_G \dot{q}] = Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{\dot{q}} \dot{q} + Z_w w + Z_q q + Z_{\delta_e} \Delta \delta_e \quad (2.38)$$

- $Z_q = \left(\frac{\partial Z_D}{\partial q} \Big|_{u=U, w=0, q=0} - X_u U \right);$
- $Z_w = \frac{\partial Z_D}{\partial w} \Big|_{u=U, w=0, q=0};$
- $Z_{\delta_e} = \frac{\partial Z_L}{\partial \delta_e} \Big|_{u=U, w=0, q=0, \delta_e=\delta_{e0}} = -\frac{1}{2}\rho A_f U_f^2 \frac{\partial C_L(\delta_e)}{\partial \delta_e} \Big|_{\delta_e=\delta_{e0}}$

$$I_{yy} \dot{q} + m[z_G \Delta \dot{u} - x_G (\dot{w} + Uq)] = M_{\dot{w}} \dot{w} + M_{\dot{q}} \dot{q} + M_w w + M_q q + M_{\theta} \theta + M_{\delta_e} \Delta \delta_e \quad (2.39)$$

- $M_{\dot{w}} = Z_{\dot{q}};$
- $M_w = \left[\frac{\partial M_D}{\partial w} \Big|_{u=U, w=0, q=0} - (Z_{\dot{w}} - X_u)U \right]; \quad M_q = \left(\frac{\partial M}{\partial q} \Big|_{u=U, w=0, q=0} - Z_{\dot{q}} U \right);$
- $M_{\delta_e} = \frac{\partial M_L}{\partial \delta_e} \Big|_{u=U, w=0, q=0, \delta_e=\delta_{e0}} = -Z_{\delta_e} x_{\delta_e}, \quad M_{\theta} = (mz_G - \rho \nabla z_B) \quad (\text{obtida na linearização de 2.23});$

- $I_{zz}\dot{r} + m[x_G(\dot{v} + Ur) - y_G\Delta\dot{u}] = N_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{\dot{r}}\dot{v} + N_v v + N_r r + N_{\delta}\Delta\delta$ (2.40)

- $N_{\dot{v}} = Y_{\dot{r}};$
- $N_v = \left[\frac{\partial N_D}{\partial v} \right]_{u=U, v=0, r=0} - (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})U;$
- $N_r = \left(\frac{\partial N_D}{\partial r} \right)_{u=U, v=0, r=0} + Y_{\dot{r}}U;$
- $N_{\delta} = \left. \frac{\partial N_L}{\partial \delta} \right|_{u=U, w=0, q=0, \delta=\delta_0} = Y_{\delta}x_{\delta};$

Com o modelo linear obtido e indicado pelas equações (2.36) até (2.40), conclui-se que os esforços na direção Ox (surge) não influenciam nos esforços e movimentos dos demais eixos. Portanto teremos apenas duas equações de movimento a serem consideradas na derivação das funções de transferência para cada plano.

No caso do movimento do plano vertical, é de valor prático a representação do modelo em função da profundidade do veículo, a qual é intuitiva e pode ser medida facilmente por um sensor. Para isto, utiliza-se também a linearização da relação cinemática conforme equação (2.41):

Figura 2. 5: Referências no plano vertical.

A taxa de variação da profundidade pode ser descrita pela equação (Fig. 2.5):

$$\frac{dz_0}{dt} = \dot{z}_0 = w \cdot \cos \theta - u \cdot \sin \theta$$

Linearizando em torno de $w=\theta=0$ e $u=U$ constante, tem-se:

ou

$$\dot{z}_0 = -\theta \cdot U + w \quad (2.41)$$

Para pequenos valores de w o ângulo de ataque, α , pode ser aproximado pelo quociente, w/U . Sendo assim, pode-se expressar a equação anterior na seguinte forma adimensional (Anexo B):

$$\dot{z}'_0 = \alpha - \theta \quad (2.42)$$

onde

$$\dot{z}'_0 = \frac{\dot{z}_0}{U}$$

Outra consequência importante da linearização sobre as relações cinemáticas, considerando a equação (2.4), refere-se à taxa de variação dos ângulos de Euler em função das velocidades angulares medidas no referencial solidário ao corpo:

$$\dot{\phi} = p$$

$$\dot{\theta} = q$$

$$\dot{\psi} = r$$

Estas serão utilizadas na derivação final das funções de transferência a seguir.

2.5.1. Derivação das Funções de Transferência

A partir dos resultados anteriores, podem-se derivar as funções de transferência, onde a entrada consiste nos ângulos dos profundores ou leme e a saída é a variável de movimento que interessa.

2.5.1.1. Funções de Transferência para o movimento no plano vertical

Rearranjando as equações (2.38) e (2.39) tem-se:

$$(m - Z_{\dot{w}})\dot{w} = Z_w w + (Z_{\dot{q}} + m x_G)\dot{q} + (Z_q + m U)q + Z_{\delta e} \delta e \quad (2.43)$$

$$(I_{yy} - M_{\dot{q}})\dot{q} = (M_{\dot{w}} + m x_G)\dot{w} + M_w w + (M_q - m x_G U)q + M_{\theta} \theta + M_{\delta e} \delta e \quad (2.44)$$

Pode-se representar as equações linearizadas também através da forma adimensional, que possui a vantagem de oferecer a possibilidade de oferecer resultados aplicados não só a um, mas a uma família de veículos geometricamente semelhantes. De acordo com a convenção de SNAME (SNAME, 1950), conforme apresentado no anexo B, tem-se:

$$(m' - Z'_w)\dot{w}' = Z'_w w + (Z'_q + m'x'_G)\dot{q}' + (Z'_q + m')q' + Z'_{\delta_e}\delta_e \quad (2.45)$$

$$(I'_{yy} - M'_{\dot{q}})\dot{q}' = (M'_{\dot{w}} + m'x'_G)\dot{w}' + M'_w w + (M'_q - m'x'_G)q' + M'_\theta \theta + M'_{\delta_e}\delta_e \quad (2.46)$$

Pode-se obter as funções de transferência relacionando as deflexões nas superfícies de controle horizontais com os movimentos de “heave” e “pitch”, aplicando-se a transformada de Laplace ao sistema de equações (2.45) e (2.46) e resolvendo-o através da regra de Cramer:

$$(a_w s - b_w)\alpha(s) + (-c_w s^2 - d_w s)\theta(s) = Z'_{\delta_e}\delta_e(s) \quad (2.47)$$

$$(-c_\theta s - d_\theta)\alpha(s) + (a_\theta s^2 - b_\theta s - e_\theta)\theta(s) = M'_{\delta_e}\delta_e(s) \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} & \frac{w(s)}{\delta_e(s)} \\ &= \frac{(M_{\delta_e} c_\alpha + a_\theta Z'_{\delta_e})s^2 + (M_{\delta_e} d_w - Z'_{\delta_e} b_\theta)s - Z'_{\delta_e} e_\theta}{(a_w a_\theta - c_w c_\theta)s^3 + (b_w a_\theta - a_w b_\theta - c_\theta d_\alpha - c_w d_\theta)s^2 + (-a_w e_\theta + b_w b_\theta - d_w d_\theta)s + b_w e_\theta} \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\theta(s)}{\delta_e(s)} \\ &= \frac{(M_{\delta_e} a_w + Z'_{\delta_e} c_\theta)s + (M_{\delta_e} b_w - Z'_{\delta_e} d_\theta)}{(a_w a_\theta - c_w c_\theta)s^3 + (b_w a_\theta - a_w b_\theta - c_\theta d_w - c_w d_\theta)s^2 + (-a_w e_\theta + b_w b_\theta - d_w d_\theta)s + b_w e_\theta} \end{aligned} \quad (2.50)$$

Os parâmetros das funções de transferência estão representados na tabela 2.4, e compatibilizados com a dimensão da variável de Laplace de acordo com a convenção da SNAME.

Tabela 2. 4: Parâmetros dimensionais utilizados nas equações (2.49) a (2.50).

Termo	Expressão
a_w	$(m' - Z'_w)L/U$
b_w	Z'_w
c_w	$(Z'_q + m'x'_G)(L/U)^2$
d_w	$(Z'_q + m')L/U$
a_θ	$(I'_{yy} - M'_{\dot{q}})(L/U)^2$
b_θ	$(M'_q - m'x'_G)L/U$
c_θ	$(M'_{\dot{a}} + m'x'_G)L/U$
d_θ	M'_w
e_θ	M'_θ

2.5.1.2. Funções de transferência para o movimento no plano horizontal

Da mesma forma que realizado anteriormente para o plano vertical, abaixo seguem as equações lineares do AUV Pirajuba para o plano horizontal:

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} = Y_v v + (Y_{\dot{r}} - m x_G)\dot{r} + (Y_r - mU)r + Y_{\delta}\delta \quad (2.51)$$

$$(I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} = (N_{\dot{v}} - m x_G)\dot{v} + N_v v + (N_r - m x_G U)r + N_{\delta}\delta \quad (2.52)$$

Ou através da forma adimensional como no caso do plano vertical, de acordo com a convenção da SNAME (SNAME, 1950) e (LEWANDOWSK, 2004), pode-se representá-las por:

$$(m' - Y'_{\dot{v}})\dot{v}' = Y'_v v' + (Y'_{\dot{r}} - m' x'_G)\dot{r}' + (Y'_r - m')r' + Y'_{\delta}\delta \quad (2.53)$$

$$(I'_{zz} - N'_{\dot{r}})\dot{r}' = (N'_{\dot{v}} - m' x'_G)\dot{v}' + N'_v v' + (N'_r - m' x'_G)r' + N'_{\delta}\delta \quad (2.54)$$

A partir das equações (2.51) e (2.52), aplicando-se a transformada de Laplace às mesmas e a regra de Cramer ao sistema de equações, pode-se calcular as funções de transferência que relacionam as velocidades em deriva e em guinada com o movimento do leme:

$$\frac{v'}{\delta}(s) = \frac{K'_{v'}(1+T'_{v1}s)}{(1+T'_{v1}s)(1+T'_{v2}s)} = \frac{Y'_{\delta}(N'_{\dot{r}} - m' x'_G) - N'_{\delta}(Y'_{\dot{r}} - m')}{Y'_{\dot{v}}(N'_{\dot{r}} - m' x'_G) - N'_{\dot{v}}(Y'_{\dot{r}} - m')} \quad (2.55)$$

$$\frac{r'}{\delta}(s) = \frac{K'_{r'}(1+T'_{r1}s)}{(1+T'_{r1}s)(1+T'_{r2}s)} = \frac{Y'_{\dot{v}}N'_{\delta} - N'_{\dot{v}}Y'_{\delta}}{Y'_{\dot{v}}(N'_{\dot{r}} - m' x'_G) - N'_{\dot{v}}(Y'_{\dot{r}} - m')} \quad (2.56)$$

onde os coeficientes acima são definidos na tabela 2.5.

É possível também rearranjar as equações anteriores de forma que elas fiquem em função do ganho K_r , desta forma:

$$K' = K'_r = \frac{N'_{\dot{v}}Y'_{\delta} - N'_{\dot{v}}Y'_{\delta}}{Y'_{\dot{v}}(N'_{\dot{r}} - m' x'_G) - N'_{\dot{v}}(Y'_{\dot{r}} - m')} \quad (2.57)$$

A manobra de giro é comumente utilizada para se analisar a manobrabilidade de um veículo, que pode ser representada pela resposta em degrau das funções de transferência

acima. O raio de giro pode ser calculado a partir do ganho d.c. da função de transferência do movimento de guinada, sendo este:

$$R = U/(K\delta_0) \quad (2.58)$$

Portanto, para se obter um menor raio de giro, para um dado valor de ângulo de leme, deve-se maximizar o ganho K. Os coeficientes das funções de transferência (2.55) e (2.56) estão representados na tabela 2.5:

Tabela 2. 5: Definição dos termos das funções de transferência para o movimento no plano horizontal.

Termo	Expressão
$T_1 T_2$	$\frac{(m - Y_{\dot{\psi}})(I_z - N_{\dot{r}}) - (Y_r - m)(N_{\dot{\psi}} - mX_G)}{Y_v(N_r - mX_G) - N_v(Y_r - m)}$
$T_1 + T_2$	$- \frac{(m - Y_{\dot{\psi}})(N_r - mX_G) + (I_z - N_{\dot{r}})Y_v - (Y_{\dot{r}} - mX_G)N_v + (N_{\dot{\psi}} - mX_G)(Y_r - m)}{Y_v(N_r - mX_G) - N_v(Y_r - m)}$

3. Métodos de Identificação Aplicados a Ensaios com Modelos Livres

As técnicas de identificação de sistemas dinâmicos têm sido cada vez mais aplicadas nas estimativas de parâmetros de veículos marítimos, como no caso dos AUVs de Barros et. al (1992), Luque (2012).

Experimentos com modelos livres têm a importante vantagem de prover as informações sobre os estágios do projeto do veículo. Como pode ser visto também, a estabilidade e a eficácia de um controle de navegação podem ser determinadas por meio de testes com modelos livres, podendo-se também obter o modelo matemático do sistema e utilizá-lo como exemplo em um simulador de treinamento, para o projeto do piloto automático do veículo e pode-se também prever a característica de manobrabilidade do mesmo.

Para o aspecto científico, o modelo livre proporciona de forma mais fácil e precisa os resultados das análises desejadas, como exemplo o levantamento dos momentos de inércia e medições da trajetória do modelo.

As técnicas mais comuns dos sistemas de identificação (indicadas no decorrer desse capítulo) não requerem *a priori* o conhecimento da forma ou os coeficientes do modelo matemático do sistema a ser estudado. A estrutura de um sistema linear pode ser estimada testando as funções de transferência com ordens crescentes e as não linearidades podem ser estimadas através das análises de regressão. O valor dos coeficientes de um modelo com a forma conhecida pode ser estimado através dos métodos:

- Erro na equação.
- Erro na saída.
- Máxima verossimilhança.

Após a aplicação dos sinais de identificação, os resultados são analisados e os coeficientes hidrodinâmicos são identificados como um aglomerado de coeficientes da função de transferência: elas estabilizam a resposta em frequência, fornecem as raízes dominantes de estabilidade, representam a eficácia do controle, fornecem uma checagem direta da estabilidade do veículo em escala real. Muitas dessas informações são requeridas no estágio de projeto do modelo em escala real, por isso a importância dos testes com modelos livres.

A identificação de sistemas lida com o problema de construir modelos matemáticos de sistemas dinâmicos com base em dados observados de entrada e saída (GARCIA, 2011).

Já a estimação de parâmetros, faz parte da área de identificação de sistemas e foi definida por Eykhoff (1974), como sendo a determinação experimental de valores de parâmetros que governem a dinâmica e/ou o comportamento não linear, assumindo-se que a estrutura do modelo do processo seja conhecida.

Esta seção tem o objetivo de indicar os métodos de identificação de sistemas mais comuns utilizados para estimar a dinâmica de veículos submarinos. Para isso, é realizado anteriormente o estudo de sinais de caracterização de sistemas dinâmicos, seus tipos e modelos comuns empregados na identificação de sistemas.

3.1. Sistemas Dinâmicos

Citando (GARCIA, 2011), um sistema pode ser definido como um objeto em que variáveis de diferentes tipos interagem e produzem sinais observáveis. Os sinais observáveis de interesse são normalmente chamados de saídas (y). O sistema é também afetado por estímulos externos denominados entradas. Sinais externos que podem ser manipulados pelo observador são chamados de variáveis manipuladas (u). No sistema pode haver outros estímulos externos não manipulados que são chamados de perturbações, as quais podem ser divididas em perturbações medidas (w) e naquelas que apenas são observadas por sua influência na saída (v). A figura 3.1 representa um sistema conforme indicado anteriormente.

Figura 3. 1: Representação de um sistema com saída y , entrada u , perturbação medida w , e perturbação não medida v (GARCIA, 2011).

O sistema dinâmico pode ser descrito como um sistema em que o valor atual da saída depende não só dos estímulos externos atuais, mas também de seus valores anteriores bem como da própria saída, caracterizando a memória do sistema dinâmico. Segundo (LJUNG, 1999), as saídas dos sistemas dinâmicos cujos estímulos externos não sejam observados, são frequentemente chamadas de séries temporais.

3.1.1. Tipos de Modelos para Sistemas Dinâmicos

Há várias formas de modelos para representar a relação entre as saídas e as entradas medidas de um processo, algumas das quais são variáveis manipuladas e outras perturbações medidas. O modelo do processo relaciona as saídas com as entradas medidas. Pode-se também usar um modelo de perturbação para descrever o

comportamento do sistema que não seja abrangido pelo modelo do processo, incluindo o efeito de entradas não medidas, ruídos e erros do modelo (CAMACHO et al., 2004). Com isso, pode-se dividir o modelo em duas partes:

- Modelo do processo.
- Modelo das perturbações.

Dentro da estrutura de modelos acima, esses modelos podem ser separados dentro das seguintes categorias:

- **Modelos Gráficos:** são determinados sistemas onde é mais conveniente a sua representação através de gráficos e/ou tabelas de dados. Como exemplo sistemas lineares podem ser escritos através de sua resposta ao impulso, degrau, ou pela sua resposta em frequência (diagramas de Nyquist e Bode).
- **Modelos Matemáticos ou Analíticos:** são utilizados esses modelos para aplicações mais avançadas onde se faz necessário usar modelos que descrevam as relações entre as variáveis do sistema em termos de expressões matemáticas como equações diferenciais ou de diferenças.
- **Modelos Computacionais:** são modelos utilizados para sistemas com maior nível de complexidade. Esses modelos são codificados como um programa computacional, construído a partir de diversas sub-rotinas interconectadas e de tabelas, onde é infactível descrever o sistema analiticamente (LJUNG, 1999).

3.1.2. Modelos Paramétricos e Não- Paramétricos

Um modelo paramétrico utiliza em sua estrutura um conjunto de parâmetros. Neste caso, deve-se designar primeiro uma família de funções com uma determinada estrutura e determinar a ordem dessas funções e o valor de seus parâmetros. Exemplos típicos de modelos paramétricos são funções de transferência (em tempo contínuo ou discreto) e modelos em espaço de estados (em tempo contínuo representado por equações diferenciais e em tempo discreto representado por equações de diferenças).

Outra forma de representar o comportamento dinâmico de um processo é por modelos de convolução, obtidos através da resposta do processo ao impulso ou ao degrau. Pode-se também obter modelos através da resposta em frequência. Neste caso, os modelos obtidos correspondem a um gráfico ou uma tabela de pontos. Este tipo de modelo é denominado não paramétrico.

3.1.3. Modelos Determinísticos e Estocásticos

Tendo como objetivo a realização de estudos sobre sinais determinísticos, faz-se necessário entender a diferença entre os sistemas determinísticos e estocásticos. Em um modelo determinístico a saída pode ser calculada de forma exata tão logo se conheça o

signal de entrada e as condições iniciais. De outra forma, os modelos estocásticos contêm termos aleatórios que tornam impossível um cálculo exato da saída. Os termos aleatórios do modelo podem ser encarados como uma descrição das perturbações. Normalmente, o modelo determinístico engloba apenas o processo, enquanto o estocástico considera também as perturbações e ruídos.

3.2. Formas mais Comuns de Representar Modelos Matemáticos de Processos

As formas mais comuns de se representar modelos de processos são (CAMACHO et al., 2004):

- **Modelo de convolução discreta:** obtida através da resposta ao impulso ou ao degrau, tratando-se de um modelo não paramétrico.
- **Modelo de entrada/saída:** também denominado modelo externo, sendo representado através da função de transferência, tratando-se de um modelo paramétrico.
- **Modelo em espaço de estados:** também denominado modelo externo, tratando-se de um modelo paramétrico.

3.3. Sinais Determinísticos: Impulso (pulso), Degrau e Senoide

Nesta etapa, são apresentadas as descrições dos sinais determinísticos citados anteriormente, o comportamento do sistema dinâmico após a entrada desse sinal e a utilização desses sinais na identificação de modelos livres.

Em relação aos estudos propostos nesse trabalho, utilizam-se técnicas de identificação de sistemas contínuos determinísticos para que seja possível descrever a dinâmica do veículo por uma função contínua no tempo, tendo em vista que as respostas do AUV Pirajuba são lentas e que sua taxa de aquisição atinge valores máximos de 10 Hz, que conseguem aproximar de forma bem satisfatória a resposta contínua.

3.3.1. Impulso (pulso)

Utilizando como base (GARCIA, 2011), através da resposta ao impulso ou ao pulso, é possível especificar de forma completa a resposta de um sistema linear em tempo contínuo no caso do impulso ou discreto no caso do pulso. Este pulso deve possuir uma amplitude unitária e a duração de um período de amostragem. Pode-se caracterizar como um impulso na entrada de um sistema, um sinal da seguinte forma:

$$u(t) = \begin{cases} \alpha, & t = 0; \\ 0, & t \neq 0; \end{cases} \quad (3.1)$$

Aplicado a:

$$y(t) = G(q) \cdot u(t) + v(t) \quad (3.2)$$

Resulta em:

$$y(t) = \alpha \cdot g(t) + v(t) \quad (3.3)$$

onde q é um operador discreto utilizando a nomenclatura da área de identificação de sistemas, semelhante ao operador z da área de controle.

Sendo $g(t)$ uma função de resposta ao impulso, ao se obter a resposta $g(t)$, é possível prever o comportamento do sistema para qualquer sinal de entrada. A função $g(t)$ é denominada também como função-peso. Se o nível de ruído do sistema for baixo ou nulo, é possível a partir de uma resposta impulsiva, determinar os coeficientes dessa resposta. Assim, é possível estimar os coeficientes conforme indicado pela equação (3.4).

$$g(t) = \frac{y(t)}{\alpha} \quad (3.4)$$

Sendo que o erro é descrito por:

$$\frac{v(t)}{\alpha} \quad (3.5)$$

A seguir é indicado conforme a figura 3.2 a resposta de um sistema a uma onda senoidal, feita a convolução com a resposta impulsiva $g(t)$.

Figura 3. 2: Caracterização de um sistema dinâmico a partir de sua resposta ao impulso (ZUBEN, 2004).

Entretanto, em sistemas físicos reais é impossível gerar uma entrada ao impulso, pelo fato de que esses sistemas não permitem que sejam gerados sinais de entradas com as características de amplitude e duração mencionadas anteriormente, para que o erro $v(t)/\alpha$ seja insignificante comparado aos coeficientes da resposta impulsiva. A resposta ao impulso pode ser expressa como a primeira derivada da resposta ao degrau. Para um sistema digital com segurador de ordem zero, a resposta ao impulso pode ser encontrada tomando-se a primeira diferença para trás da resposta ao degrau.

Contudo, um impulso ideal não pode ser conseguido na prática e um impulso aproximado (pulso) deve ser usado. Assim:

$$u(t) = \begin{cases} 1/\alpha, & 0 \leq t \leq \alpha \\ 0, & \alpha \leq t \end{cases} \quad (3.6)$$

Esta entrada se assemelha ao impulso ideal para valores suficientemente pequenos da duração do impulso α .

Conforme visto em (GARCIA, 2011), o modelo de resposta ao impulso é também conhecido como sequência peso, modelo de convolução ou FIR (Finite Impulse Response). Assim, pode-se assumir que convoluindo a resposta impulsiva $g(t)$ com um sinal de entrada qualquer, obtém-se a resposta do processo a essa entrada.

A relação entre a saída e a entrada é dada pela equação:

$$\hat{y}(t) = \sum_{j=0}^N g(j) \cdot u(t-j) = G(q) \cdot u(t) \quad (\text{supondo } \hat{y}(0) = 0) \quad (3.7)$$

onde g é a saída amostrada quando o processo é excitado por um (im)pulso unitário.

3.3.1.1. Pulso em sistemas contínuos

A utilização do sinal tipo pulso foi aplicada inicialmente na área de dinâmica de veículos submarinos por Booth (1975) e Tinker et al. (1979), onde estes indicam que o teste de resposta ao pulso requer que o modelo a ser testado tenha um estado inicial constante em relação ao curso e a velocidade, para que este estado quando sofra uma deflexão temporária proveniente do controle, após o término desta deflexão retorne ao estado inicial e estabilize.

O sinal do tipo pulso, aplicado em testes de identificação, tem como mérito separar a estabilidade proveniente do controle, desde que a parte da trajetória subsequente ao pulso resulte em que a superfície de controle seja estacionária, então neste caso o movimento é denominado como puro através da estabilidade do sistema. O processo de identificação fornece diretamente as raízes de estabilidade do sistema. De forma ideal o pulso deve ser como um impulso, com amplitude tendendo ao infinito em um tempo tendendo a zero, porém

é óbvia a impossibilidade de gerar este tipo de sinal de modo prático. Para a realização do sinal de pulso deve-se levar em consideração as dimensões do local de provas para evitar possíveis colisões.

Utilizando as equações linearizadas dos movimentos vertical e horizontal, essas equações podem assumir soluções operacionais que estão apresentadas a seguir.

- Movimento horizontal de submersíveis:

$$r(s) = \frac{A_H(s)}{B_H(s)} \delta(s) \quad (3.8)$$

E $A_H(s)$ e $B_H(s)$ são polinômios de s :

$$A_H(s) = [N_\delta Y_v - Y_\delta N_v] + [-N_\delta(m - Y_v)]s \quad (3.9a)$$

$$B_H(s) = [(Y_r - mU)N_v - Y_v N_r] + [(m - Y_v)N_r + (I_z - N_r)Y_v]s + [- (I_z - N_r)(m - Y_v)]s^2 \quad (3.9b)$$

- Movimento vertical de submersíveis:

$$\theta(s) = \frac{A_V(s)}{B_V(s)} \eta(s) \quad (3.10)$$

Sendo $\eta = \delta_e$. Com isso, os polinômios $A_V(s)$ e $B_V(s)$ têm como solução:

$$A_v(s) = [Z_\eta M_\omega - M_\eta Z_\omega] + [M_\eta(m - Z_\omega)]s \quad (3.11a)$$

$$B_v(s) = [M_\theta Z_\omega] + [Z_\omega M_q - M_\omega(mU + Z_q) - (m - Z_\omega)M_\theta]s + [-Z_\omega(I_y - M_q) - M_q(m - Z_\omega)]s^2 + [(m - Z_\omega)(I_y - M_q)]s^3 \quad (3.11b)$$

3.3.1.2. Resposta teórica – Resposta à função $\delta(t)$ (resposta ao impulso)

Suponha que o veículo esteja em um movimento estável e que este sofra uma perturbação no instante $t = 0$, através de uma breve deflexão na superfície de controle. Será considerada a resposta como θ , em relação à deflexão η .

Sendo $\eta = \delta_e$ onde:

$$\int_{-\infty}^t \delta_e(t) dt = \begin{cases} 0 & \rightarrow t < 0 \\ 1 & \rightarrow t \geq 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

Resultando em um θ :

$$k_p(t) = \theta(t) = \sum_i k_i e^{(\lambda_i t)} \Rightarrow t \geq 0 \quad (3.13)$$

onde λ_i são as raízes do polinômio $B(\lambda)=0$ e k_i são as constantes obtidas pela expressão $A(\lambda)/B(\lambda)$ expandida na forma de frações parciais, $\sum_i \left(\frac{k_i}{(\lambda - \lambda_i)} \right)$. Porém, se qualquer raiz λ_i for repetida n vezes, o correspondente k_i torna-se um polinômio em t de potência $n-1$. As raízes λ_i e as constantes k_i podem ser reais ou complexas.

A figura 3.3 compara as respostas obtidas por um modelo livre, a diferentes tipos de entradas a funções pulso e impulso.

Figura 3. 3: a) Resposta ao impulso, b) Pulso finito, c) Pulso finito com retorno diferente de zero, d) Pulso geral, (BOOTH, 1975).

3.3.1.3. Pulso finito

Conforme descrito anteriormente, como em sistemas físicos reais é impossível gerar uma entrada ao impulso, pelo fato de que esses sistemas não permitem que sejam gerados sinais de entrada com as características de amplitude tendendo a infinito com duração do período tendendo a zero segundos, utiliza-se então como alternativa a essa entrada o sinal do tipo pulso, que possui as características muito próximas ao do impulso.

A resposta à uma excitação tipo pulso de amplitude η_0 , de duração τ e encerrando no instante $t=0$ é por superposição de iguais e opostos degraus:

$$\theta(t) = \eta_0 \sum_i \frac{k_i}{\lambda_i} (e^{\lambda_i(t+\tau)} - 1) \quad p / -\tau < t < 0$$

$$\theta(t) = \eta_0 \sum_i \frac{k_i}{\lambda_i} (e^{(\lambda_i \tau)} - 1) e^{(\lambda_i t)} \quad p / t \geq 0 \quad (3.14)$$

3.3.1.4. Pulso finito – Retorno do controle para posição diferente de zero

A resposta é similar à de um pulso finito, porém neste caso o controle não retorna para zero e sim para um valor $\epsilon\eta$ que é determinado pela superposição de degraus opostos de magnitude η_0 em $t = -\tau$, e $\eta_0 - \epsilon\eta$ em $t = 0$. Resultando assim:

$$\theta(t) = \eta_0 \sum_i \frac{k_i}{\lambda_i} (e^{(\lambda_i \tau)} - 1); \quad p/-\tau < t < 0$$

$$\theta(t) = \eta_0 \sum_i \frac{k_i}{\lambda_i} \left(e^{(\lambda_i \tau)} - 1 + \frac{\varepsilon \eta}{\eta_0} \right) e^{(\lambda_i t)} - \varepsilon \eta \sum_i \frac{k_i}{\lambda_1}; \quad \sum_i \frac{k_i}{\lambda_i} (e^{(\lambda_i \tau)} - 1); \quad p/t \geq 0$$
(3.15)

Como t tende ao infinito, a parcela $-\varepsilon \eta \sum_i \frac{k_i}{\lambda_1}$ em geral é zero. Portanto a resposta de $\theta(t)$ torna-se:

$$\theta(t) = \eta_0 \sum_i \frac{k_i}{\lambda_i} \left(e^{(\lambda_i \tau)} - 1 + \frac{\varepsilon \eta}{\eta_0} \right) e^{(\lambda_i t)}; \quad p/t \geq 0 \quad (3.16)$$

3.3.1.5. Distúrbio Geral cessando em t = 0

Tendo em vista o distúrbio $\eta(t)$ ocorrendo em tempos τ , previamente ao $t=0$:

$$\theta(t) = \int_0^\infty \sum_i K_i e^{\lambda_i(\tau+t)} \eta(-\tau) d\tau = \sum [k_i \int_0^\infty e^{\lambda_i(\tau)} \eta(-\tau) d\tau] e^{\lambda_i(t)}; \quad p/t \geq 0$$
(3.17)

Em geral para este caso, $\theta(t)$ não tende a zero para t tendendo a infinito.

Sendo o movimento de controle suave no estado inicial, a integral pode ser calculada até o tempo T, o qual representa o tempo para a resposta ao impulso decair a um valor insignificante. Portanto, a coleta de dados deve iniciar pelo menos no instante de tempo T antes do impulso ser aplicado.

3.3.1.6. Procedimento modificado

A resposta de todos os itens mencionados anteriormente no instante depois de $t=0$ pode ser descrita como:

$$\sum_i k_i^* e^{\lambda_i t} \quad (3.18)$$

onde, λ_i são as raízes do polinômio $B(\lambda)=0$ e k_i^* são as constantes k_i relacionadas anteriormente sendo:

- Pulso finito $\rightarrow \quad k_i^* = k_i \frac{\eta_0}{\lambda_i} (e^{(\lambda_i \tau)} - 1) \quad (3.19a)$

- Pulso finito – retorno do controle para posição diferente de zero $\rightarrow$

$$k_i^* = k_i \frac{\eta_0}{\lambda_i} \left(e^{(\lambda_i \tau)} - 1 + \frac{\varepsilon \eta}{\eta_0} \right) \quad (3.19b)$$

- Geral $\rightarrow$

$$k_i^* = k_i \int_0^\infty e^{\lambda_i \tau} \eta(-\tau) d\tau \quad (3.19c)$$

3.3.1.7. Testes com sinal tipo pulso

Para os testes excitados com sinal do tipo pulso, é essencial que se comece a colher os dados alguns segundos antes do pulso e que se continue gravando os dados até que não se tenha dúvidas que o estado final tenha sido alcançado, porém na prática não é fácil para o operador decidir quando este estado foi alcançado.

Utilizando como base a linearização das equações de movimento horizontal indicadas no capítulo 2, foram obtidos através de experimentos com o modelo livre os valores das derivadas hidrodinâmicas, e assim foram geradas as funções de transferência reais para os casos de baixa, média e altas velocidades. Da mesma forma, foram obtidas pelo método de identificação de sistemas com sinal tipo pulso as funções de transferência estimadas. Estas funções estão indicadas nas tabelas 3.1 e 3.2.

Para os testes realizados com o modelo livre descrito no artigo de Tinker et al. (1979), várias combinações de amplitudes e durações do período do pulso foram aplicadas para o modelo com baixas, médias e altas velocidades correspondendo aos respectivos números de Reynolds de 5×10^6 , 5×10^7 e 1.4×10^7 . A figura 3.4 indica a resposta característica ao pulso em relação ao modelo livre.

Figura 3. 4: Resposta característica a entrada ao pulso para o experimento com modelo livre, (TINKER et al, 1979).

Tabela 3. 1: Funções de transferência em Yaw, identificadas através de pulsos (TINKER et al, 1979).

Dimensão Nominal do Pulso

Exp No	a (Graus)	b (Segundos)	Velocidade	Função de Transf. Identificada $\frac{\hat{r}}{\delta_R}$	Função de Transf. Adimensional $\frac{\hat{r}'}{\delta_R}$
1	10	1.6	Baixa	$\frac{-0.0862}{S + 0.110}$	$\frac{-1.18}{S' + 0.406}$
2	10	2.5	Baixa	$\frac{-0.0758}{S + 0.0913}$	$\frac{-1.04}{S' + 0.337}$
3	10	3.3	Baixa	$\frac{-0.0901}{S + 0.138}$	$\frac{-1.23}{S' + 0.510}$
4	15	2.1	Baixa	$\frac{-0.0907}{S + 0.0989}$	$\frac{-1.24}{S' + 0.366}$
5	15	2.5	Baixa	$\frac{-0.0748}{S + 0.110}$	$\frac{-1.02}{S' + 0.406}$
6	5	2.2	Média	$\frac{-0.440}{S + 0.247}$	$\frac{-1.39}{S' + 0.438}$
7	5	3.3	Média	$\frac{-0.474}{S + 0.241}$	$\frac{-1.50}{S' + 0.428}$
8	10	1.6	Média	$\frac{-0.534}{S + 0.274}$	$\frac{-1.69}{S' + 0.487}$
9	-10	1.5	Média	$\frac{-0.476}{S + 0.204}$	$\frac{-1.50}{S' + 0.362}$
10	-5	2.2	Alta	$\frac{-1.01}{S + 0.354}$	$\frac{-1.54}{S' + 0.439}$
11	-10	1.3	Alta	$\frac{-0.936}{S + 0.314}$	$\frac{-1.44}{S' + 0.389}$

Tabela 3. 2: Funções de transferência do plano horizontal (Tinker et al, 1979).

Adimensional

$$\frac{\hat{r}'}{\delta_R} (s') = \frac{-4.96 - 2.85 s'}{1.25 + 3.88 s' + s'^2} = \frac{-1.25}{s' + 0.353} + \frac{-1.60}{s' + 3.53}$$

Baixa Velocidade

$$\frac{\hat{r}}{\delta_R} (s) = \frac{-0.0984 - 0.209 s}{0.0912 + 1.05 s + s^2} = \frac{-0.0912}{s + 0.0954} + \frac{-0.118}{s + 0.956}$$

Média Velocidade

$$\frac{\hat{r}}{\delta_R} (s) = \frac{-0.866 - 0.903 s}{0.395 + 2.19 s + s^2} = \frac{-0.395}{s + 0.199} + \frac{-0.508}{s + 1.99}$$

Alta Velocidade

$$\frac{\hat{r}}{\delta_R} (s) = \frac{-2.66 - 1.88 s}{0.821 + 3.15 s + s^2} = \frac{-0.821}{s + 0.286} + \frac{-1.06}{s + 2.87}$$

Para validar as funções de transferência obtidas através dos métodos de identificação, foram gerados diagramas de Bode das funções e estes foram comparados com as respostas harmônicas dos testes realizados com o modelo livre. Também foi

comparada a resposta ao impulso das funções de transferência identificadas com a resposta real do sistema ao pulso.

3.4. Degrau – Manobra de Giro e Manobra Padrão de Kempf e os Índices de Qualidade de Manobra K e T

Da mesma forma que o impulso, pode-se identificar um sistema através da entrada ao degrau. Em relação ao sinal tipo degrau, este foi utilizado para validar os resultados experimentais, na forma de manobra de giro, obtidos através da identificação pelo método de Kempf / Nomoto (NOMOTO, 1960), que está descrito no decorrer deste capítulo.

Quando um veículo marinho está se deslocando em avanço com velocidade u constante, uma entrada a degrau de ângulo δ é executada pelos lemes e o veículo contorna uma circunferência de raio R , esta manobra é conhecida como manobra de Giro. O efeito do leme para o esterço do veículo é sentido de forma indireta, isto é, o leme ao movimentar-se produz um momento que gira o veículo em relação ao seu C.G., assumindo assim um novo ângulo de ataque em direção à nova orientação do veículo.

3.4.1.1. Modelos Aproximados de Baixa Ordem Obtidos a partir da Resposta ao Degrau

Com base na resposta do sistema ao degrau, também conhecida como curva de reação do processo, a ideia é buscar adaptar uma função de transferência de baixa ordem, que aproximadamente descreva seu comportamento dinâmico. Pois em alguns casos é interessante ajustar um modelo linear de baixa ordem a uma resposta ao degrau, neste caso obtendo-se modelos aproximados de 1° ou 2° ordem afetados ou não por tempo morto. Uma forma de se estimar um modelo de 1° ordem é utilizando o método dos 35,3% e 85,3% (método de Sundaresan e Krishnaswamy), dado pelas seguintes equações:

Figura 3. 5: Resposta característica a entrada ao degrau.

$$\tau = \frac{(t_2 - t_1)}{\ln(f)} = 0,675 \cdot (t_2 - t_1) \quad (3.20)$$

$$\beta = \frac{(t_2 \ln(f_1) - t_1 \ln(f_2))}{\ln(f)} = 1,294 \cdot t_1 - 0,294 \cdot t_2 \quad (3.21)$$

$$K_\alpha = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (3.22)$$

onde:

- $f = f_1/f_2$; $f_1 = 1 - y_1$; e $f_2 = 1 - y_2$;
- Δy = variação da resposta do sistema ao degrau.
- Δu = variação da entrada do sistema ao degrau.
- t_1 corresponde ao tempo necessário para a resposta alcançar y_1 (35,3% da variação da resposta da resposta ao degrau na saída).
- t_2 corresponde ao tempo necessário para a resposta alcançar y_2 (85,3% de da variação da resposta ao degrau na saída).

Assim, resultando no seguinte modelo de 1° ordem:

$$G(s) = \frac{K_\alpha \cdot e^{-\beta \cdot s}}{(\tau \cdot s + 1)} \quad (3.23)$$

Para estimar um modelo paramétrico de um sistema de segunda ordem, pode-se utilizar o método de Mollenkamp (COELHO, 2006):

$$G(s) = \frac{K_\alpha \cdot e^{-\beta \cdot s}}{(\tau_1 \cdot s + 1)(\tau_2 \cdot s + 1)} \quad (3.24a)$$

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.24b)$$

onde a equação (3.24a) é utilizada para sistemas superamortecidos e a equação (3.24b) para sistemas subamortecidos.

Para estimar os valores da equação anterior é necessário determinar quatro parâmetros: o ganho estático, K_α , as constantes de tempo τ_1 e τ_2 , e o atraso de transporte β . Utilizando o algoritmo de Mollenkamp:

$$x = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} \quad (3.25)$$

$$\zeta = \frac{0,085 - 5,547 \cdot (0,475 - x)^2}{(x - 0,356)} \quad (3.26)$$

$$f_2(\zeta) = 0,708 \cdot (2,811)^\zeta \Rightarrow \zeta \leq 1 \quad (3.27)$$

ou

$$f_2(\zeta) = 2.6\zeta - 0.60 \Rightarrow \zeta > 1 \quad (3.28)$$

$$\omega_n = \frac{f_2(\zeta)}{t_3 - t_1} \quad (3.29)$$

$$f_3(\zeta) = 0.922 \cdot (1.66)^\zeta \quad (3.30)$$

$$\beta = t_2 - \frac{f_3(\zeta)}{\omega_n} \quad (3.31)$$

$$\tau_{1,2} = \frac{\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}}{\omega_n} \quad (3.32)$$

onde:

- t_1 = tempo para a saída alcançar 15% da mudança total final
- t_2 = tempo para a saída alcançar 45% da mudança total final
- t_3 = tempo para a saída alcançar 75% da mudança total final

Na área naval, a resposta ao degrau é tratada de maneira particular, onde baseando-se no trabalho de Nomoto (1960), este mostrou que os movimentos de manobra de um veículo marítimo podem ser descritos de forma prática, através da equação de movimento de primeira ordem apresentada no decorrer da dissertação (equação de Nomoto de primeira ordem).

Por muito tempo, havia um grande problema para se determinar quais medidas permitiriam descrever a manobrabilidade de um veículo marítimo de forma razoável e a maneira de se obter essas medidas. O processo atual de estimação dos parâmetros de manobrabilidade do veículo é baseada na análise de uma sucessão de fases transientes de manobras de giro (manobra em que o veículo possui seu leme vertical em um ângulo fixo, realizando um ou mais giros de 360 graus) com ângulos de leme em estibordo e bombordo de forma randômica (ou na forma de uma manobra de zig-zag). Tendo em vista essas circunstâncias, Nomoto (1960) propôs outro procedimento de manobra nomeado de “*Standard maneuver test*” ou teste de manobra padrão.

O teste de manobra padrão ou teste de manobra de Kempf é empregado em conjunto com a equação de movimento de primeira ordem, desenvolvida por Nomoto (1960), com o objetivo de se obter novas medidas de manobrabilidade de veículos marítimos. Os índices de qualidade de manobra de giro ou curva K e T, juntos constituem tal medida de manobrabilidade. Sendo que K representa a habilidade ou a capacidade do veículo em realizar curvas e o índice T representa a estabilidade em curso e a agilidade de resposta da manobra de giro. Essas habilidades são elementos fundamentais de manobrabilidade.

3.4.2. Equação de movimento de primeira ordem

Relembrando as equações de movimento no plano horizontal conforme visto no capítulo 2:

$$\frac{v'}{\delta}(s) = \frac{K'_v (1 + T'_v s)}{(1 + T'_1 s)(1 + T'_2 s)} \quad (3.33)$$

$$\frac{r'}{\delta}(s) = \frac{K'_r (1 + T'_r s)}{(1 + T'_1 s)(1 + T'_2 s)} \quad (3.34)$$

$$K' = K'_r = \frac{N'_v Y'_\delta - N'_\delta Y'_v}{Y'_v (N'_r - m' x'_G) - N'_v (Y'_r - m')} \quad (3.35)$$

Entretanto, foi percebido na prática que descrever a manobrabilidade de um veículo marítimo através dos seus ângulos de deriva e guinada era uma tarefa com alto grau de dificuldade e imprecisão.

E tendo em vista que as equações de movimento de giro são apresentadas na forma de equações diferenciais relacionando o movimento de deriva, acoplado com o movimento angular de curva do veículo em manobra de giro, o ângulo de deriva é bastante pequeno, relativamente, de modo que o movimento de giro do veículo pode ser descrito substancialmente apenas definindo o ângulo de rumo como uma função do tempo. Assim, eliminando a equação de deriva do movimento e representando a manobrabilidade desses veículos através do ângulo de rumo que é facilmente obtido, foi gerada por Nomoto (1960) uma equação que desacopla os movimentos do veículo da seguinte forma:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \dot{\Psi}}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\dot{\Psi}}{dt} + \dot{\Psi} = K T_3 \frac{d\delta}{dt} + K \delta \quad (3.36)$$

onde:

- $\dot{\Psi}$ representa a velocidade angular de rumo do veículo [°/s ou rad/s].
- δ representa o ângulo de leme do veículo em função do tempo [° ou rad.].
- K sendo a taxa entre a velocidade angular estável de curva e o ângulo do leme, representando a capacidade de curva do veículo [1/s], (Nomoto, 1960).

Sendo que K, T1, T2 e T3 dependem da forma do casco, dimensões relativas do leme e outros fatores do veículo, a equação anterior pode ser ainda aproximada por uma

equação de primeira ordem, utilizando como simplificação o índice $T = T_1 + T_2 - T_3$, desta forma resultando na equação (3.37):

$$T \frac{d\dot{\Psi}}{dt} + \dot{\Psi} = K\delta \quad (3.37a)$$

ou

$$\frac{r}{\delta} = \frac{K}{(1+Ts)} \quad (3.37b)$$

onde:

- T representa a estabilidade em curso e o acúmulo do movimento angular de giro [s] (Nomoto, 1960).

A equação (3.37) representa a equação de primeira ordem de Nomoto, que tem seu modelo bastante difundido em livros, pesquisas e afins. Os parâmetros K e T são conhecidos como índices de qualidade de manobra. Para escrever a função de transferência do ângulo de rumo em relação ao ângulo de leme basta adicionar o integrador $1/s$ na equação (3.37b) ou aplicar a transformada de Laplace na equação (3.37a) como indicado no capítulo 4. Porém, para identificar os índices K e T , é necessário que se realize com o veículo a manobra padrão de Kempf ou manobra de zig-zag, que é uma manobra bastante conhecida e utilizada para a verificação da manobrabilidade de veículos marítimos. Nos itens a seguir estão indicados os procedimentos para realizar as estimativas dos índices de qualidade de manobra.

3.4.2.1. Interpretação dos resultados da manobra padrão de Kempf

A manobra padrão de Kempf segue o seguinte processo:

- a) Ajuste certo ângulo de leme (ex. 15°) em estibordo.
- b) Quando o desvio de curso do veículo for alcançado, reverta a posição do leme mantendo a mesma magnitude a bombordo.
- c) Quando o desvio de curso for alcançado para o mesmo ângulo de bombordo, reverta novamente a posição do leme mantendo o mesmo ângulo em estibordo, e assim por diante.

Figura 3. 6: Exemplo da manobra padrão de Kempf, semelhante à manobra de Zig-Zag (NOMOTO, 1960).

Desta forma, uma aproximação razoável pode ser obtida e examinada com confiança através da equação de movimento de primeira ordem da manobra, para vários tipos de veículos.

3.4.2.2. Representação da manobrabilidade em função dos termos dos índices de qualidade de manobra

Analisando que o movimento de um veículo marítimo pode ser descrito pela equação de primeira ordem de Nomoto, conforme descrita pela equação (3.33), esta equação nos permite entender as características dinâmicas do AUV em suas manobras no plano horizontal como a manobra de giro, onde é possível destacar as seguintes características de manobrabilidade:

- Se a magnitude de K for grande, o diâmetro de giro é pequeno, conforme indicado na equação (2.51);
- Se a magnitude de T for pequena, menor o tempo de resposta do veículo.

Se o ângulo de leme δ_0 for ajustado de forma rápida, a taxa angular de giro do veículo sobe gradativamente e termina quando se aproxima do valor de $K\delta_0$, sendo obtido de maneira simples resolvendo a equação (3.38).

$$\dot{\Psi}(t) = K\delta_0(1 - e^{-t/T}) \quad (3.38)$$

onde:

- $\delta = \delta_0$ para $t \geq 0$;
- $\delta = 0$ para $t < 0$;

O índice K indica uma razão entre uma taxa angular constante de viragem (manobra giro) correspondente ao ângulo de leme e pode ser chamado de índice de habilidade de manobra. Quanto maior o valor do índice K de um veículo marítimo, maior é a taxa angular

de giro do qual ele se aproxima e menor é seu círculo constante, ou seu raio de giro. De outra forma, a agilidade com que a embarcação se aproxima da taxa angular terminal $K\delta_0$, é definida pelo índice T .

Assim sendo, o índice T pode ser chamado de índice de agilidade de resposta de esterço (ou agilidade de resposta de giro). Quanto menor o valor do índice T mais rápido é o decaimento da função $e^{(-\frac{t}{T})}$, e conseqüentemente mais rápido é o acúmulo do movimento angular de giro.

Considerando que a manobra de zig-zag seja executada com sucesso, a resposta rápida da embarcação ao esterço ou ao giro é muito oportuna para que se realize uma manobra rápida. Uma resposta rápida e um círculo de giro pequeno não são acompanhadas necessariamente entre si, mas constituem duas diferentes habilidades claramente distintas. Então ela deve ser enfatizada de forma que a manobrabilidade seja expressa não apenas pelo círculo estável de giro pequeno (valor alto de K), mas também pela agilidade de realizar o giro ou a manobra de giro (valor baixo de T), pois a manobrabilidade depende de uma rápida exibição de uma taxa inerente de esterço ou curva como a grandeza inerente da taxa de curva. Um exemplo das combinações de K e T como mencionadas anteriormente, pode ser visto na figura 3.7.

Figura 3. 7: Exemplo de uma manobra de giro para diferentes magnitudes de K e T (JOURNÉE, 2002).

A agilidade da resposta da manobra de giro pode ser representada também pelos índices "reach" (alcance) ou "turning lag" (pelo atraso no esterço ou curva) do leme, onde estes estão indicados na figura 3.8.

Figura 3. 8: Alcance (reach) e atraso na curva (turning lag) (NOMOTO, 1960).

Sendo possível calcular essas variáveis conforme as seguintes equações:

$$At_{curva} = T + \frac{t_1}{2} \quad (3.39)$$

$$Alcance = U \cdot (At_{curva}) \quad (3.40)$$

onde t_1 é o tempo gasto para definir o ângulo de leme (geralmente este é bem pequeno comparado ao valor de T e pode ser desprezado) e U é a velocidade do veículo.

Relembrando e reescrevendo a equação (2.55) conforme visto no capítulo 2, o raio da curva estável de giro R pode ser expresso em termos de K , com isso:

$$R = U / K \delta_0 \quad (3.41)$$

onde δ_0 é o ângulo de leme usado em radianos. Adicionalmente,

$$Avanço = U \cdot \left(T + \frac{t_1}{2}\right) + U / K \delta_0 = Alcance + R \quad (3.42)$$

Portanto, o reach ou o turning lag de curva representam, respectivamente, a habilidade e a agilidade de resposta, como os índices K e T . Então é possível representar a manobrabilidade através do raio estável de curva R e o reach ou o turning lag no lugar de K e T . Utilizar essas particularidades pode ser conveniente algumas vezes pela sua extensa popularidade. Pode ser adicionado, entretanto, que os presentes índices K e T tenham uma única utilidade em predizer o comportamento da manobrabilidade da embarcação. Se os valores dos índices de uma embarcação forem fornecidos, seus movimentos de manobra para uma forma arbitrária de curva pode ser predita, usando a equação de movimento de Nomoto.

A qualidade de navegação de um AUV relata seu comportamento após ele sofrer uma perturbação ocasionada por uma força externa, o que desvia seu curso. A taxa de desvio da posição da maioria das embarcações marítimas decai mesmo com os lemes a

meia-nau depois de removido o distúrbio, e assim o veículo se ajusta ao curso em linha reta, mas agora referente à nova direção. A embarcação que possui essa característica é chamada de “estável em curso”. Entretanto, algumas vezes um veículo único cuja taxa de desvio de posição não decai depois de removido o distúrbio externo é chamada de “instável em curso”. Experimentos mostram que essas instabilidades e um ângulo muito baixo de estabilidade causam dificuldades consideráveis para o veículo manter o curso.

O grau de estabilidade de curso, pode ser expresso pela agilidade com que decai a taxa de desvio de posição depois de removido o distúrbio. Quanto mais rápido o decaimento, maior é a estabilidade do navio.

3.4.2.3. Interpretação física dos índices de qualidade de manobra

A análise da forma da equação de movimento de primeira ordem de Nomoto, permite compreender a constituição física do movimento de esterço ou giro dos veículos marinhos, e podem ser descritas conforme visto a seguir:

- 1) Um veículo marinho possui inércia para resistir a uma aceleração angular de curva.
- 2) Forças hidrodinâmicas atuam acima do casco e os lemes induzem um momento de amortecimento para resistir à velocidade angular de curva, proporcional à velocidade angular.
- 3) Quando o leme mover-se a um determinado grau ou ângulo, um momento gerado por esse ângulo produz um movimento de curva proporcional ao ângulo do leme.

Deve ser notado, entretanto que o movimento angular de giro de um veículo marítimo deve estar necessariamente acoplado com o movimento de deriva lateral. Da mesma forma, o momento de amortecimento que atua em cima do casco e do leme, é composto de um momento hidrodinâmico causado por um movimento angular de giro e também causado por um movimento de deriva acompanhado de um movimento angular. Outras circunstâncias similares são indicadas também pelo momento de curva produzido pelo movimento de esterço.

O momento de amortecimento pelo movimento angular e o momento de curva pelo leme não são os dados principais de um movimento rotacional puro, mas sim um equivalente principal considerado entre um movimento angular e um, movimento de deriva. Embora a ideia de equivalente pareça ambígua em uma análise rigorosa, é claro, entretanto, que o movimento de giro da embarcação pode ser aparentemente considerado como um movimento rotacional puro usando sua inércia equivalente, o momento de amortecimento e

o momento de curva, pois o movimento da embarcação em manobra de giro pode ser essencialmente descrito pela equação de movimento de primeira ordem de Nomoto.

3.4.2.4. Determinação dos índices de qualidade de manobra usando o teste de manobra padrão de Kempf ou manobra de zig-zag

O princípio da análise é encontrar o valor dos índices K e T, com que a equação de movimento de primeira ordem pode descrever um movimento observado de uma embarcação. Sendo assim, o procedimento é indicado a seguir:

Figura 3. 9: Notações utilizadas para a análise da manobra padrão de Kempf, (NOMOTO, 1960).

Como a equação de movimento requer o veículo em trajetória natural em linha reta com o leme em meia nau, é necessário realizar uma correção do ângulo de leme observada acima antes de utilizá-lo na equação de Nomoto, então assume-se que:

$$\delta(t) = \delta_m(t) + \delta_r \quad (3.43)$$

onde $\delta_m(t)$ é o ângulo observado do leme e δ_r é o ângulo residual do leme, sendo esta a diferença entre $\delta(t)$ e $\delta_m(t)$. Este ângulo residual pode ser considerado como uma constante desconhecida no início da análise.

Substituindo-se a equação (3.38) na equação (3.33) obtém-se:

$$T \frac{d\Psi}{dt} + \Psi = K\delta_r + K\delta_m(t) \quad (3.44)$$

Integrando ambos os lados de $t = 0$ até $t = t$:

$$T \int_0^t \frac{d\Psi}{dt} dt + \int_0^t \Psi dt = K\delta_r \int_0^t dt + K \int_0^t \delta_m(t) dt \quad (3.45)$$

Configurando o tempo de origem no início do teste, medindo $\Psi(t)$ a partir da base, e sabendo que a embarcação estava navegando em linha reta antes do início dos testes, as condições iniciais são consideradas como:

$$\Psi = 0 \text{ e } \dot{\Psi} = 0 \quad \text{em } t = 0$$

Com isso obtém-se,

$$T \cdot \dot{\Psi} + \Psi = K \cdot \delta_r t + K \int_0^t \delta_m(t) dt \quad (3.46)$$

Sendo esta a equação fundamental para o presente procedimento. Então, aplicando-se a equação anterior para $t = t_e'$ e t_e'' obtém-se:

$$K \cdot \delta_r t_e' + K \int_0^{t_e'} \delta_m(t) dt = \Psi_e' \quad (3.47a)$$

$$K \cdot \delta_r t_e'' + K \int_0^{t_e''} \delta_m(t) dt = \Psi_e'' \quad (3.47b)$$

Desde que $\dot{\Psi} = 0$ nestes instantes.

$\int_0^{t_e', t_e''} \delta_m(t) dt$ pode ser obtido através de um simples cálculo indicado na sequência.

Desta forma, os parâmetros desconhecidos simultaneamente nestas equações são os valores de K e δ_r . Esses parâmetros podem ser determinados resolvendo as equações anteriores simultaneamente. O K calculado nesta etapa equivalente à segunda metade do período do teste é chamado de $K_{6, 8}$.

Assim, aplicando o tempo $t = t_e$ na equação (3.47), obtém-se:

$$K = \frac{\Psi_e}{\delta_r t_e + \int_0^{t_e} \delta_m(t) dt} \quad (3.48)$$

Sendo que este K é referente à primeira metade do período do teste, chamado então de K_4 . Os valores de K_4 e $K_{6, 8}$ são levemente distintas entre si, por consequência da redução de velocidade no teste e dos efeitos não lineares para os índices de qualidade de manobra de giro. Usualmente pode ser considerada a média entre os valores de K_4 e $K_{6, 8}$ como o valor a ser utilizado para o índice K . Depois de encontrado o valor de K , é aplicado na equação (3.46) para os $t = t_0$, $t = t_0'$ e $t = t_0''$, obtendo-se então:

$$T = \frac{K}{\dot{\Psi}(t_0)} \left(\int_0^{t_0} \delta_m(t) dt + \delta_r t_0 \right) \quad (3.49a)$$

$$T = \frac{K}{\dot{\Psi}(t_0')} \left(\int_0^{t_0'} \delta_m(t) dt + \delta_r t_0' \right) \quad (3.49b)$$

$$T = \frac{K}{\dot{\Psi}(t_0'')} \left(\int_0^{t_0''} \delta_m(t) dt + \delta_r t_0'' \right) \quad (3.49c)$$

Desde que $\psi = 0$ nesses instantes. Ao serem realizados os cálculos, é razoável utilizar K_4 para a primeira equação e usar $K_{6, 8}$ para as outras duas (equação (3.49)). Os valores para $\dot{\Psi}(t_0)$, $\dot{\Psi}(t_0')$ e $\dot{\Psi}(t_0'')$ podem ser determinados através do gráfico de $\psi(t)$.

A integral $\int_0^{t_0, t_0', t_0''} \delta_m(t) dt$ pode ser calculada facilmente, e o procedimento para realizar este cálculo é indicado a seguir. O valor de T obtido para a equação (3.35a), que representa a primeira metade da análise do período é chamado de T_4 e os T calculados para a segunda metade da análise do período são chamados de $T_{6, 8}$, sendo a média entre essas constantes o valor final de T.

3.4.2.5. Tabela de cálculos para realizar as análises

Uma aproximação trapezoidal é bastante adequada para $\delta(t)$ gerado por mecanismos de direção habituais. O erro $\delta_r(t)$ não excede outros erros inevitáveis do processo ou da construção mecânica dos equipamentos. Sendo assim, é possível utilizar as equações abaixo para calcular a integral $\int_0^t \delta m(t) dt$:

Tabela 3. 3: Equações utilizadas para calcular as integrais de δm (NOMOTO, 1960).

No. do período
$(1) \Rightarrow \int_0^t \delta m(t) dt = \delta_1 \frac{t^2}{2t_1}$
$(2) \Rightarrow \int_0^t \delta m(t) dt = \delta_1 \left(t - \frac{t_1}{2} \right)$
$(3) \Rightarrow \int_0^t \delta m(t) dt = \delta_1 \left(t - \frac{t_1}{2} \right) + \frac{\delta_2 - \delta_1}{2(t_3 - t_2)} (t - t_2)^2$
$(4) \Rightarrow \int_0^t \delta m(t) dt = \delta_1 \left\{ -\frac{t_1}{2} + \frac{1}{2}(t_2 + t_3) \right\} + \delta_2 \left\{ -\frac{1}{2}(t_2 + t_3) + t \right\}$
$(5) \Rightarrow \int_0^t \delta m(t) dt = \delta_1 \left\{ -\frac{t_1}{2} + \frac{1}{2}(t_2 + t_3) \right\} + \delta_2 \left\{ -\frac{1}{2}(t_2 + t_3) + t \right\} + \frac{\delta_3 - \delta_2}{2(t_5 - t_4)} (t - t_4)^2$
$(6) \Rightarrow \int_0^t \delta m(t) dt = \delta_1 \left\{ -\frac{t_1}{2} + \frac{1}{2}(t_2 + t_3) \right\} + \delta_2 \left\{ -\frac{1}{2}(t_2 + t_3) + \frac{1}{2}(t_4 + t_5) \right\} + \delta_3 \left\{ -\frac{1}{2}(t_4 + t_5) + t \right\}$
$(7) \Rightarrow \int_0^t \delta m(t) dt = \delta_1 \left\{ -\frac{t_1}{2} + \frac{1}{2}(t_2 + t_3) \right\} + \delta_2 \left\{ -\frac{1}{2}(t_2 + t_3) + \frac{1}{2}(t_4 + t_5) \right\} + \delta_3 \left\{ -\frac{1}{2}(t_4 + t_5) + t \right\} + \frac{\delta_4 - \delta_3}{2(t_7 - t_6)} (t - t_6)^2$
$(8) \Rightarrow \int_0^t \delta m(t) dt = \delta_1 \left\{ -\frac{t_1}{2} + \frac{1}{2}(t_2 + t_3) \right\} + \delta_2 \left\{ -\frac{1}{2}(t_2 + t_3) + \frac{1}{2}(t_4 + t_5) \right\} + \delta_3 \left\{ -\frac{1}{2}(t_4 + t_5) + \frac{1}{2}(t_6 + t_7) \right\} + \delta_4 \left\{ -\frac{1}{2}(t_6 + t_7) + t \right\}$

Quando realizada a análise seguindo os procedimentos descritos durante essa dissertação, é conveniente que se utilize a tabela 3.3.

3.4.2.6. Formulação sistemática dos índices de qualidade de manobra em função do casco e das particularidades dos lemes

Pode ser de interesse, tanto prático quanto teórico, a formulação dos índices de qualidade de manobra de giro em função do casco e das particularidades do leme (como exemplo dimensões relativas do leme, fatores de esbeltez do casco, etc) e assim fornecendo uma aproximação da predição da manobrabilidade do veículo, conforme fornecidas essas particularidades. O equacionamento produz uma estimativa aproximada dos índices K e T e de uma breve predição da habilidade de giro ou curva, agilidade da resposta e estabilidade de curso para veículos marinhos.

3.4.2.7. Expressão não dimensional dos índices K e T

Nesta etapa será realizada a adimensionalização dos coeficientes de qualidade de manobra, com o objetivo de indicar que a origem desses índices é proveniente da inércia e das derivadas hidrodinâmicas do veículo, e a vantagem da adimensionalização é a facilidade em projetar e gerar controladores para o AUV, caso necessário.

Os índices K e T podem ser descritos também através das derivadas hidrodinâmicas do movimento horizontal, conforme indicado a seguir.

$$K = \frac{Y_{\delta}}{Y_r} \quad (3.50a)$$

$$T = \frac{I_e}{Y_r} \quad (3.50b)$$

onde:

- I_e representa a inércia do veículo marítimo;
- Y_r é o coeficiente de momento de amortecimento pelo movimento de curva;
- Y_{δ} é o coeficiente de momento de giro causado pelo esterço do veículo.

Portanto, substituindo-se a equação (3.50) em (3.47), resulta:

$$I_e \frac{d\dot{\psi}}{dt} + Y_r \dot{\psi} = Y_{\delta} \delta \quad (3.51)$$

Uma representação não dimensional do momento de amortecimento $Y_r \dot{\psi}$ pode ser descrita como:

$$\frac{Y_r \dot{\psi}}{\frac{\rho}{2} L^2 d U^2} = Y'_r \left(\frac{L}{R} \right) \quad (3.52)$$

Sendo:

- L o comprimento do veículo;
- d é o calado médio do navio (no caso do submarino o diâmetro do casco);
- U a velocidade do veículo;
- Y'_r o coeficiente de momento de amortecimento adimensional;
- R o raio de curva instantâneo;
- (L/R) a velocidade angular de curva adimensional.

Considerando que $U = R\dot{\psi}$, pode-se simplificar a equação anterior, resultando em:

$$Y_r = \frac{\rho}{2} L^3 d U Y'_r \quad (3.53)$$

Similarmente, adimensionalizando o momento de giro ou curva causado pelo esterço, obtém-se:

$$\frac{Y_\delta \delta}{\frac{\rho}{2} L^2 d U^2} = Y'_\delta \delta \quad (3.54)$$

onde Y'_δ é o coeficiente de momento de giro adimensional. Simplificando conforme visto anteriormente:

$$Y_\delta = \frac{\rho}{2} L^2 d U^2 Y'_\delta \quad (3.55)$$

Desta forma, é possível representar o índice K da seguinte forma:

$$K = \frac{Y_\delta}{Y_r} = \left(\frac{U}{L} \right) \frac{Y'_\delta}{Y'_r} \quad (3.56)$$

Denotando Y'_δ/Y'_r por K' :

$$K' = \left(\frac{L}{U} \right) K \quad (3.57)$$

Pode-se também adimensionalizar a inércia I_e dividindo $\frac{\rho}{2} L^4 d$, considerando que I_e tenha a dimensão do momento de inércia, obtendo-se:

$$I_e = \frac{\rho}{2} L^4 d I'_e \quad (3.58)$$

onde I'_e é o coeficiente adimensional de inércia do veículo. Desta forma, obtém-se T adimensional, como indicado a seguir:

$$T = \frac{I_e}{Y_r} = \left(\frac{L}{U}\right) \frac{I'_e}{Y'_r} \quad (3.59)$$

Denotando-se I'_e/Y'_r por T' :

$$T' = \left(\frac{U}{L}\right) T \quad (3.60)$$

Levantando a constituição física dos índices K e T , encontra-se de forma imediata que esses dois índices possuem um denominador comum e, portanto têm uma relação proporcional, sendo ela:

$$K' = \frac{Y'_\delta}{Y'_r} \text{ e } T' = \frac{I'_e}{Y'_r}$$

Logo:

$$K' = \frac{Y'_\delta}{I'_e} * T' \quad (3.61)$$

3.4.2.8. Estimação dos índices K e T através da manobra de Giro

Outra forma de estimar os índices de qualidade de manobra K e T é através da própria manobra de Giro. Para isso, utiliza-se o conceito descrito em Journée (2002) como indicado na figura 3.10.

Figura 3. 10: Ângulo de rumo e sua velocidade angular durante uma manobra de giro.

Para estimar corretamente os índices K e T através das curvas de giro devem ser consideradas duas regiões:

1. Intervalo de tempo $0 \leq t \leq t_1$, dependente do ângulo do leme $\delta_r = \delta_a \cdot t / t_1$,

desta forma a equação de primeira ordem de Nomoto torna-se:

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} = \frac{K\delta_a}{t_1} \cdot t \quad \text{para: } 0 \leq t \leq t_1 \quad (3.62)$$

Uma solução para a equação anterior pode ser dada por:

$$\dot{\psi} = \frac{KT\delta_a}{t_1} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T}} - 1 + \frac{t}{T} \right) \quad (3.63)$$

Para um intervalo de tempo $t \geq t_1$ com o leme constante em $\delta = \delta_a$, modificando novamente a equação de primeira ordem de Nomoto e resultando:

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} = K\delta_a \quad \text{para: } t \geq t_1 \quad (3.64)$$

Sendo uma solução para a equação anterior:

$$\dot{\psi} = C_e \cdot e^{-\frac{t}{T}} + K\delta_a \quad (3.65)$$

Para o caso em que $t = t_1$ ambas as equações podem ser usadas e devem gerar o mesmo resultado, desta forma:

$$\dot{\psi} = \frac{KT\delta_a}{t_1} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T}} - 1 + \frac{t}{T} \right) = C_e \cdot e^{-\frac{t}{T}} + K\delta_a \quad (3.66)$$

Onde C_e é uma constante desconhecida, que pode ser estimada através da equação a seguir:

$$C_e = \frac{KT\delta_a}{t_1} \cdot \left(e^{-\frac{t_1}{T}} - 1 \right) \quad (3.67)$$

Substituindo-se a equação 3.67 na equação 3.66:

$$\dot{\psi}(t) = \frac{KT\delta_a}{t_1} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T}} - \frac{e^{-\frac{t_1}{T}}}{e^{\frac{t}{T}}} + \frac{t_1}{T} \right) \quad \text{para: } t \geq t_1 \quad (3.68)$$

Para um período de $t \rightarrow \infty$:

$$\dot{\psi} = K\delta_a \quad (3.69)$$

Desta forma é possível estimar o índice K de Nomoto como indicado na figura 3.10, para $t \rightarrow \infty$:

$$\boxed{K = \frac{\dot{\psi}(t \rightarrow \infty)}{\delta_a}} \quad (3.70)$$

2. Para estimar o valor do índice T basta integrar $\dot{\psi}(t)$ em função do tempo, como indicado a seguir:

$$\psi(t) = \int_0^t \dot{\psi}(t^*) dt^* = \int_0^{t_1} \dot{\psi}(t^*) dt^* + \int_{t_1}^t \dot{\psi}(t^*) dt^* \quad (3.71)$$

Rearranjando a equação (3.71):

$$\psi(t) = \frac{KT\delta_a}{t_1} \cdot \left\{ \int_0^{t_1} \left(e^{-\frac{t^*}{T}} - 1 + \frac{t^*}{T} \right) dt^* + \int_{t_1}^t \left(e^{-\frac{t^*}{T}} - \frac{e^{-\frac{t_1}{T}}}{e^{-\frac{t_1}{T}}} + \frac{t_1}{T} \right) dt^* \right\} \quad (3.72)$$

Utilizando alguns processos algébricos e simplificações, a integral anterior resulta para um tempo $t \geq t_1$:

$$\dot{\psi} = K\delta_a \cdot \left\{ t - \left(T + \frac{t_1}{2} \right) + \frac{T^2}{t_1} \left(e^{-\frac{t_1}{T}} - 1 \right) e^{-\frac{t}{T}} \right\} \quad (3.73)$$

Em uma manobra de giro para um ângulo de leme de $\delta(t)$, com rumo e taxa de rumo ψ e $\dot{\psi}$ respectivamente, pode-se reescrever a equação (3.73) como:

$$\dot{\psi}(t) = a + bt + ce^{-\frac{t}{T}} \quad (3.74)$$

sendo:

$$a = -KT\delta_a \cdot \left(1 + \frac{t_1}{2T} \right)$$

$$b = K\delta_a$$

$$c = \frac{KT^2\delta_a}{t_1} \cdot \left(e^{\frac{t_1}{T}} - 1\right)$$

Da mesma forma utilizada para o K, para um período de $t \rightarrow \infty$, a equação anterior é reduzida para sua forma assintótica, resultando:

$$\psi(t) = a + bt \quad (3.75)$$

Como a função assintótica anterior intercepta $\psi(t)=0$ no tempo t_T , pode-se assumir que:

$$t_T = \frac{-a}{b} = \frac{KT\delta_a \cdot \left(1 + \frac{t_1}{2T}\right)}{K\delta_a} = T + \frac{t_1}{2} \quad (3.76)$$

Logo como indicada na figura 3.10, o índice T de Nomoto pode ser estimado através da equação (3.77):

$$\boxed{T = t_T - \frac{t_1}{2}} \quad (3.77)$$

Portanto, é possível estimar os índices K e T através das equações 3.70 e 3.77, utilizando as respostas da manobra de Giro, como indicado na figura 3.10.

3.4.3. Análise em Frequência: Senoide

Conforme descrito por (LJUNG, 1999), no domínio da frequência, emprega-se a excitação senoidal. Neste caso, pode-se obter um diagrama de Bode do sistema, mas o problema é que na prática, a maioria dos processos industriais não permite entradas senoidais em operação normal. Além disso, o experimento deve ser repetido para diversas frequências, o que pode consumir muito tempo, pois para cada frequência usada o sistema deve atingir o estado estacionário antes das medições serem feitas. Para baixas frequências de ω o experimento será demorado.

Para uma análise no domínio da frequência é conveniente usar o modelo na forma contínua do tempo, como indicado a seguir:

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) \quad (3.78)$$

Sendo o sinal de entrada:

$$u(t) = a \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (3.79)$$

Como o sistema é assumido como assintoticamente estável, então em regime estacionário, a saída será:

$$y(t) = b \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \phi) \quad (3.80)$$

onde:

$$b = a|G(j\omega)| \text{ e } \phi = \arg[G(j\omega)]$$

Medindo-se as amplitudes a e b , bem como a defasagem ϕ (normalmente negativa), a variável complexa $G(j\omega)$ pode ser encontrada a partir da equação (3.78). Se tal procedimento é repetido para diversas frequências, então se pode obter uma representação gráfica de $G(j\omega)$ como uma função de ω . Tais gráficos (de Bode ou Nyquist) são apresentados como ferramentas para o projeto clássico de sistemas de controle.

Porém, o sistema citado acima é muito sensível a perturbações. Na prática, ele raramente pode ser usado de forma tão simples, pois suponha que (SÖDERSTRÖM e STOICA, 1989):

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) + V(s) \quad (3.81)$$

onde $V(s)$ é a transformada de Laplace de alguma perturbação $v(t)$. Com isso:

$$y(t) = b \cdot \sin(\omega t + \phi) + v(t) \quad (3.82)$$

E devido à presença do ruído é difícil obter uma estimativa precisa da amplitude b e da defasagem ϕ .

3.4.3.1. Testes com sinal harmônico senoidal

Da mesma forma como realizado para o teste com sinal tipo pulso, foi utilizada a referência de Tinker et al. (1979) para verificar a eficiência da estimação da função de transferência do sistema utilizando um sinal harmônico senoidal. A qualidade da resposta à excitação senoidal fornece uma forma de checar diretamente a linearidade do sistema, sendo que o teste pode ser realizado concentrando a onda senoidal nas frequências de interesse. A resposta harmônica do sistema fornece uma curva muito próxima à curva de ajuste do processo (fitting curve) que é utilizada pelos métodos de identificação para gerar a função de transferência do sistema.

O mérito deste teste é a capacidade de obter-se a resposta a altas frequências de forma bem confiável, sendo este um método bastante simples de se obter resultados satisfatórios para sistemas em altas frequências. Porém, esta técnica é limitada em relação a baixas frequências devido ao tempo de simulação necessária para estabilizar as respostas dos estados do sistema para grandes velocidades do modelo. Outras limitações encontradas nesta etapa podem se resumir na deriva do sistema em relação às entradas e o grande número de testes a serem realizados para todas as faixas de frequência. Os problemas de deriva foram contornados introduzindo a onda senoidal via piloto automático.

Tinker et al. (1979) verificaram também que os testes em alta frequência geraram resultados de acordo com as predições obtidas usando as derivadas de movimento lento e em relação à resposta medida no modelo livre. Este modelo foi testado de forma a eliminar os efeitos do número de Froude e a consistência dos resultados obtidos em três velocidades de forma a não serem afetados pelo número de Reynolds.

3.4.4. Sequência Binária Pseudo-aleatória – PRBS

A Sequência Binária Pseudo-aleatória ou pseudorrandômica (PRBS), é um sinal periódico que comuta sempre entre dois níveis (SÖDERSTRÖM; STOICA, 1989). A forma mais comum de se gerar um PRBS é através de um registrador de deslocamentos, que por sua vez gera uma sequência de zeros e uns, onde a cada período de amostragem um novo número deve ser gerado. O PRBS é um sinal puramente determinístico, pois dados os estados iniciais do registrador seus futuros estados podem ser computados exatamente. Pelo fato da função correlação deste sinal se assemelhar a função correlação do ruído branco esse tipo de sequência é chamado de “pseudo-aleatório”. A sequência é dita binária por conter apenas dois estados possíveis de comutação. O sinal do tipo PRBS é um sinal bastante utilizado na área de identificação de sistemas por atender a muitos requisitos necessários ao estimar a dinâmica de um sistema, por ter a característica de um sinal persistentemente excitante em todas as faixas de frequência através da estimulação contínua do sistema por longos períodos. Duas características interessantes desse sinal para o uso em identificação são o fato que sua média tende assintoticamente a zero e a sua covariância se aproxima do ruído branco na medida em que sua duração tende ao infinito.

O PRBS assume em sua entrada $u(t)$ os valores 0 e 1, desta forma para gerar um sinal que comute entre os valores a e b , utiliza-se a equação abaixo:

$$y(t) = a + (b - a) \cdot u(t) \quad (3.83)$$

No caso de $b = -a$ (para simetria) e $b = 1$ (para simplificar), logo:

$$y(t) = -1 + 2 \cdot u(t) \quad (3.84)$$

Para um registrador de deslocamentos de n estados, são possíveis atingir no máximo 2^n diferentes vetores de estado compostos de uns e zeros. O registrador de deslocamentos em sua forma construtiva é montado através da ligação entre n Flip-Flops Master-slave (mestre – escravo), aonde a cada pulso do “clock”, os bits vão se deslocando da esquerda pra direita, conforme ilustrado na figura 3.10.

Figura 3. 11: Exemplo do funcionamento de um registrador de deslocamentos com Flip-Flop do tipo J-K e D.

Entretanto, 2^n é um limite superior que não pode ser atingido, em razão da ocorrência de um estado só com zeros, que deve ser evitado, pois se os estados atingissem essa condição o registrador permaneceria sempre em zero nos estados futuros. Assim, o período máximo possível seria:

$$M = 2^n - 1 \quad (3.85)$$

Onde n é a ordem ou número de estágios do registrador de deslocamento e M é chamado de PRBS de máximo comprimento. A seguir, estão listadas as propriedades do PRBS de máximo comprimento (SÖDERSTRÖM; STOICA, 1989):

- Sua função correlação se assemelha à de um ruído branco;
- O sinal PRBS é persistentemente excitante (p.e.) de ordem que não possa exceder o seu período, onde por ser p.e. é uma condição vital para a identificabilidade, quanto maior o período mais flexível será sua utilização;
- Se $u(t)$ é um PRBS de máximo comprimento de período M , então dentro deste período ele contém $(M + 1) / 2 = 2^{n-1}$ números um e $(M - 1) / 2 = 2^{n-1} - 1$ zeros;
- Durante um período, o vetor de estados assume todos os valores possíveis exceto o vetor nulo.

Para usar o PRBS de forma correta, deve-se selecionar os dois níveis e o tempo mínimo de permanência em cada nível t_b (período do clock) dado como múltiplo do período de amostragem, como indicado abaixo (AGUIRRE, 2007).

$$\frac{\tau_{min}}{10} \leq t_b \leq \frac{\tau_{min}}{3} \quad (3.86)$$

onde τ_{min} é a menor constante de tempo de interesse do sistema

ou

$$3 \cdot T_s \leq t_b \leq 5 \cdot T_s \quad (3.87)$$

onde T_s é o tempo de amostragem do sistema.

3.5. Filtros lineares – ARX, ARMAX, ARIMAX, Box- Jenkins

Este método de identificação é baseado no enfoque empírico, onde são utilizados os dados obtidos pelos experimentos realizados com o sistema a ser estudado, e no caso do AUV, não foram empregados o auxílio de qualquer modelagem prévia da dinâmica do veículo. Sinais de entrada e saída do sistema são registrados e submetidos à análise de dados para inferir um modelo, que prediga a resposta dinâmica do AUV em torno de sua condição nominal de operação.

3.5.1. Segurador de ordem Zero - ZOH

O método de discretização utilizado nos processos de identificação por regressores ou filtros lineares é o segurador de ordem zero (ZOH), devido a sua facilidade de implementação em sistemas controlados por computadores.

Considere a sequência de números $\{f(jT_{emp})\}$, $j = 0, 1, 2, \dots$, correspondente ao sinal $f(t)$ amostrado a cada T_{emp} segundos. Deseja-se reconstruir $f(t)$, $t \geq 0$, a partir das amostras disponíveis até o instante t . Ou seja, o sinal $f(t)$ entre duas amostras consecutivas nos instantes jT_{emp} e $(j+1)T_{emp}$ deve ser estimado usando-se $f(jT_{emp})$, $f((j-1)T_{emp})$, $\dots$, $f(0)$. Supondo que $f(t)$ possui derivadas até ordem n , pode-se estimar $f(t)$ no intervalo $jT_{emp} \leq t < (j+1)T_{emp}$ através da série de Taylor:

$$f_j(t) = f(jT_{emp}) + f'(jT_{emp})(t - jT_{emp}) + \dots + \frac{f^n(jT_{emp})}{n!}(t - jT_{emp})^n \quad (3.88)$$

onde:

$$f^n(jT_{emp}) = \left. \frac{d^n}{dt^n} f(t) \right|_{t=jT_{emp}} \quad (3.89)$$

Um valor aproximado para a primeira derivada de $f(t)$ é dado por:

$$f'(jT_{emp}) = \frac{1}{T_{emp}} \{f(jT_{emp}) - f[(j-1)T_{emp}]\} \quad (3.90)$$

Analisando-se somente o primeiro termo da série de Taylor, conclui-se que o polinômio que extrapola o valor de $f(t)$ no intervalo $jT_{emp} \leq t < (j+1)T_{emp}$ é de ordem zero. O dispositivo que mantém o sinal constante no intervalo de duração T_{emp} , ou seja:

$$f_j(t) = f(jT_{emp}), \quad jT_{emp} \leq t < (j+1)T_{emp} \quad (3.91)$$

É chamado de segurador de ordem zero. A relação (3.91) define a resposta ao impulso do segurador de ordem zero, que é mostrada na Fig. 3.12.

Figura 3.12: Resposta ao impulso de um ZOH.

A Fig. 3.13 mostra sinais típicos de entrada e saída do segurador de ordem zero.

Figura 3.13: Resposta ao impulso de um ZOH.

3.5.2. Estrutura de modelo

Utilizando (GARCIA, 2011), as estruturas de modelos são derivadas de conhecimento anterior do processo e das perturbações. Como em muitos casos existem poucos conhecimentos prévios sobre o processo, é natural usar representações genéricas de sistemas lineares, conhecidas como modelos “caixa preta”. Um exemplo de equações de diferenças pode ser visto abaixo.

$$A(q) \cdot y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} \cdot u(t) + \frac{C(q)}{D(q)} \cdot e(t) \quad E[e^2(t)] = \sigma^2$$

onde q é um operador de atraso, $u(t)$ é a entrada, $y(t)$ é a saída e $e(t)$ é a perturbação do tipo ruído branco.

A escolha da estrutura do modelo consiste em selecionar os graus dos polinômios $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$, $D(q)$ e $F(q)$, isto é, n_a, n_b, n_c, n_d e n_f . A ordem e os parâmetros dos modelos são considerados desconhecidos. Um modo de se encontrar as equações que melhor descrevam o comportamento do sistema, é utilizar os filtros lineares que serão indicados no decorrer deste capítulo.

3.5.2.1. Critério de ajuste

Ao realizar a escolha do modelo de identificação do processo, faz-se necessário ajustar a aderência desse modelo aos dados de entrada e saída, para que a equação prediga com boa qualidade o comportamento do veículo.

O critério que é frequentemente utilizado para fornecer uma medida de quão bem um modelo em tempo discreto se ajusta aos dados experimentais, onde pode ser expresso por:

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N g[\varepsilon(k)] \quad (3.92)$$

Onde ε é o erro de entrada, de saída ou generalizado (como o erro de predição). A função g é frequentemente escolhida como quadrática, onde é possível utilizar o método de mínimos quadrados, como nos filtros lineares ou o critério de verossimilhança.

3.5.2.2. Modelo erro da equação – estrutura ARX

O nome AR (autorregressivo), refere-se ao fato do componente do erro ser descrito em função de valores “regredidos” dele mesmo, tomados em instantes passados e X representa a entrada extra $u(t)$ (chamada de variável exógena) (LJUNG, 1999).

$$y(t) = \frac{\hat{B}(q)}{\hat{A}(q)} u(t) + \frac{1}{\hat{A}(q)} \varepsilon(t) \quad (3.93)$$

Onde:

$$-\hat{A}(q) = 1 + \hat{a}_1 q^{-1} + \hat{a}_2 q^{-2} + \dots + \hat{a}_{na} q^{-na}$$

$$- \hat{B}(q) = \hat{b}_1 q^{-1} + \hat{b}_2 q^{-2} + \dots + \hat{b}_{nb} q^{-nb}$$

- na e nb representam a ordem do polinômio $\hat{A}(q)$ e $\hat{B}(q)$, respectivamente.

Este modelo é o mais simples em comparação aos outros que são apresentados na sequência, e é um dos mais utilizados na área de identificação de sistemas.

3.5.2.3. Modelo erro da equação – estrutura ARMAX

A componente média móvel (MA) é proveniente do componente de erro como o modelo AR, sendo que este corresponde a uma média de uma quantidade de números medidos dos últimos valores da entrada. A principal vantagem do método ARMAX em relação ao ARX é que este possui maior liberdade para descrever o modelo de perturbação do sistema, pois este é descrito como uma média móvel (LJUNG, 1999).

$$y(t) = \frac{\hat{B}(q)}{\hat{A}(q)} u(t) + \frac{\hat{C}(q)}{\hat{A}(q)} \varepsilon(t) \quad (3.94)$$

Onde:

$$- \hat{C}(q) = 1 + \hat{c}_1 q^{-1} + \hat{c}_2 q^{-2} + \dots + \hat{c}_{nc} q^{-nc}$$

- nc é a ordem do polinômio $\hat{C}(q)$.

Uma variação deste filtro foi empregada no processo de identificação da dinâmica do AUV Pirajuba, sendo este chamado de ARIMAX, apresentado no item a seguir.

3.5.2.4. Modelo erro da equação – estrutura ARIMAX

O modelo ARIMAX é uma variação do modelo ARMAX onde este possui uma integração imposta na descrição do sistema, que é útil para descrever os sistemas com perturbações lentas ou até mesmo processos com perturbações não estacionárias (GARCIA, 2011).

$$y(t) = \frac{\hat{B}(q)}{\hat{A}(q)} u(t) + \frac{\hat{C}(q)}{(1-q^{-1})\hat{A}'(q)} \varepsilon(t) \quad (3.95)$$

A presença de um polo em $q = 1$ equivale a um integrador, portanto a entrada do erro $\varepsilon(t)$ afeta a saída $y(t)$ por meio do integrador. Uma vantagem desse método é atenuar o efeito do *Random walk* no sistema.

3.5.2.5. Modelo erro da equação – estrutura Box-Jenkins (BJ)

A estrutura BJ é uma evolução natural da estrutura erro na saída (OE). A estrutura OE é calculada pela diferença entre a saída $y(t)$ e a saída do modelo livre de ruído $[\hat{B}(q)/\hat{F}(q)] \cdot u(t)$. A modelagem da estrutura BJ é a forma mais natural de se parametrizar um sistema de dimensão finita, onde as funções de transferência da planta e do modelo de perturbação são estimadas de forma independentes entre si, como funções racionais (LJUNG, 1999).

$$y(t) = \frac{\hat{B}(q)}{\hat{F}(q)} u(t) + \frac{\hat{C}(q)}{\hat{D}(q)} \varepsilon(t) \quad (3.96)$$

onde:

$$- \hat{F}(q) = 1 + \hat{F}_1 q^{-1} + \hat{F}_2 q^{-2} + \dots + \hat{F}_{nf} q^{-nf}$$

$$- \hat{D}(q) = 1 + \hat{D}_1 q^{-1} + \hat{D}_2 q^{-2} + \dots + \hat{D}_{nd} q^{-nd}$$

- nd e nf são as ordens dos polinômios $\hat{D}(q)$ e $\hat{F}(q)$.

A estrutura BJ se assemelha ao preditor ARMAX, pois os dois preditores são regressores pseudo-lineares também influenciados de forma não-linear.

3.5.2.6. Modelo erro da equação – estrutura Box-Jenkins com integração de ruído (BJ-Noise)

Da mesma forma que indicado no filtro ARIMAX, pode-se colocar um integrador no componente de erro $\varepsilon(t)$ do filtro BJ, que por este estar associado ao distúrbio ou ruído recebe o nome de BJ-Noise.

$$y(t) = \frac{\hat{B}(q)}{\hat{F}(q)} u(t - nk) + \frac{\hat{C}(q)}{(1 - q^{-1})\hat{D}(q)} \varepsilon(t) \quad (3.97)$$

Existe também outro parâmetro descrito por nk , que deve entrar nas equações anteriores, representando a ordem de atraso do sistema ao responder ao estímulo de entrada.

Tendo em vista os métodos de identificação descritos neste trabalho, pode-se afirmar que:

- O método de identificação através de sinais harmônicos é indicado para as análises em altas frequências, entretanto faz-se necessário a realização de inúmeros testes em diversas frequências de ondas e que não haja restrições físicas no campo de provas.

- A utilização do sinal tipo pulso, ao substituir o impulso que não pode ser gerado em sistemas reais, identifica as funções de transferência do sistema de forma bastante satisfatória, sendo que este é um sinal simples de ser aplicado na prática e que não necessita de tanques de provas com grandes dimensões. Entretanto, deve-se ficar atento, respeitando-se o período de aquisição de dados anterior à aplicação do pulso.

- E por fim, a utilização das manobras de zig-zag e giro, descritas por uma entrada ao degrau nos lemes do AUV, conseguem estimar os índices de qualidade de manobra K e T, que em conjunto com a equação de primeira ordem de Nomoto, descrevem o movimento do veículo em relação ao seu ângulo de rumo, que é uma forma mais prática de analisar o movimento do veículo em comparação à utilização das equações de movimento linearizadas no plano horizontal indicadas no capítulo 2, que utilizam os ângulos de deriva e guinada para descrever a manobrabilidade do veículo.

As manobras de zig-zag e giro e os sinais de pulso e PRBS são os métodos mais utilizados para identificar a dinâmica de veículos submarinos devido à facilidade de implementação e execução dessas manobras em ambiente marinho. Desta forma, esses métodos foram aplicados na estimação de funções de transferência que descrevam a dinâmica do AUV nos planos horizontal e vertical, como indicados nos capítulos a seguir.

4. Caracterização da Manobrabilidade do AUV Pirajuba

O AUV Pirajuba, durante os últimos anos, tem sido utilizado como bancada de testes para a aplicação de métodos de caracterização da manobrabilidade de veículos aquáticos em águas calmas. Esta é a primeira etapa para a modelagem da dinâmica e desenvolvimento do piloto automático do AUV.

Como primeiro passo, neste tipo de investigação, foram realizadas diversas manobras de zig-zag, com o intuito de se estimar os índices de qualidade de manobra de Nomoto K e T do AUV Pirajuba. Assim, através das expressões matemáticas apresentadas no capítulo 3, foi possível caracterizar de forma simples e qualitativa a manobrabilidade do veículo no plano horizontal. Também foram realizadas manobras no plano vertical, utilizando os sinais de Pulso e PRBS, onde através dos filtros lineares de identificação, foram estimadas equações que predizem o comportamento do veículo neste plano.

O AUV Pirajuba, durante os últimos anos, sofreu alteração em seus elementos internos, tais como estrutura de suporte de equipamentos, hardware eletrônico e mecânico, bem como elementos de lastro e flutuação. Desta forma, suas propriedades de distribuição de massa têm sido alteradas, o que influencia as características de manobrabilidade do veículo. Para o registro dessas propriedades, ao longo do desenvolvimento do AUV, foram estimados os parâmetros de distribuição de massa (massa do veículo, coordenadas do centro de massa, momentos e produtos de inércia) através de procedimentos determinísticos específicos, descritos no apêndice A. Assim, embora a aplicação dos métodos descritos no capítulo 3 produzam implicitamente estimativas para a distribuição de massa e para as derivadas hidrodinâmicas, é por lidar com a incerteza nesta última classe de parâmetros que motiva o uso da identificação de sistemas.

Ao longo da investigação da manobrabilidade do AUV, testes em várias condições foram realizados no mar. As próximas seções descrevem os testes e apresentam os resultados obtidos com os procedimentos de identificação.

4.1. Realização de manobras de zig-zag e Giro com o AUV Pirajuba no plano horizontal – Método Determinístico

Tendo em vista a necessidade de estimar os índices K e T para descrever a manobrabilidade do AUV, foram realizadas manobras de zig-zag e giro em dois ambientes distintos:

- Ambiente restrito: Piscina;
- Ambiente aberto: Mar – Baía de Angra dos Reis.

Os testes de identificação preliminares foram realizados no ambiente controlado da piscina, com o objetivo de que todos os ajustes em relação ao AUV fossem realizados antes deste ir para o ambiente marinho. Para validar os valores obtidos para os índices K e T, foi desenvolvido um simulador em ambiente Matlab/Simulink (Figura 4.1), onde este compara os dados reais obtidos nas manobras de giro do AUV com as calculadas utilizando os valores de K e T, como exemplo o tempo de duração de uma volta de 360° (giro completo) e a magnitude e o comportamento da velocidade angular durante a manobra.

Para complementar a validação, foram verificados os ângulos de rolagem do veículo, onde não seriam aceitos valores superiores a +5° e inferiores a -5°, por estes influenciarem na manobrabilidade do AUV, devido à forma como os lemes e hidroplanos estão dispostos no casco.

Figura 4. 1: Diagrama de blocos em Simulink para a simulação de manobras.

4.1.1. Manobra em ambiente Marinho: Baía de Angra dos Reis

Conforme concluído os estudos e as análises em ambiente restrito, houve a necessidade de descrever a manobrabilidade do veículo em ambiente marinho. Desta forma, foram realizados testes de manobras com o AUV Pirajuba em ambiente marinho na baía do Colégio Naval, localizado na cidade de Angra dos Reis – RJ.

Entretanto, o AUV Pirajuba no início de Janeiro de 2013 sofreu algumas atualizações em seu hardware e software embarcados, onde foi incluída uma nova unidade inercial (IMU – marca KVH), funcionando em paralelo com a unidade antiga (AHRS – marca SBG), onde foram realizadas também análises comparativas da qualidade de medição de cada uma. Também foram realizadas as substituições dos lemes horizontais e verticais, onde estes

possuem como característica uma maior robustez de construção, proporcionando uma maior durabilidade e eficiência em comparação ao modelo utilizado anteriormente.

Com isso, os mesmos procedimentos de identificação dos índices de qualidade de manobra indicados no capítulo 3, foram aplicados nesta etapa para que se obtivesse os valores de K e T em ambiente marinho, sem restrições dimensionais em relação ao ambiente de testes. Os limites de operação do leme mantiveram-se de -20 a 20 graus a uma velocidade média constante de 1 metro por segundo.

Visando garantir a confiabilidade do sistema atualizado do AUV Pirajuba, uma maior quantidade de manobras de zig-zag para estimar os índices de qualidade de manobra K e T foram realizadas em comparação aos utilizados na piscina (9 gráficos para o mar e 2 para a piscina), desta forma, segue abaixo os gráficos das manobras de zig-zag utilizados para os cálculos.

Figura 4. 2: 1ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 5 graus.

Figura 4. 3: 1ª Manobra de Zig-Zag de 5° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.

Figura 4. 4: 2ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 5 graus.

Figura 4. 5: 2ª Manobra de Zig-Zag de 5° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.

Figura 4. 6: 3ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 5 graus.

Figura 4. 7: 3ª Manobra de Zig-Zag de 5° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.

Figura 4. 8: 4ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 5 graus.

Figura 4. 9: 4ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de rolagem.

Figura 4. 10: 1ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 10 graus.

Figura 4. 11: 1ª Manobra de Zig-Zag de 10° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.

Figura 4. 12: 2ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 10 graus.

Figura 4. 13: 2ª Manobra de Zig-Zag de 10° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.

Figura 4. 14: 1ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 15 graus.

Figura 4. 15: 1ª Manobra de Zig-Zag de 15° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.

Figura 4. 16: 1ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 20 graus.

Figura 4. 17: 1ª Manobra de Zig-Zag de 20° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.

Figura 4. 18: 2ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 20 graus.

Figura 4. 19: 2ª Manobra de Zig-Zag de 20° do AUV Pirajuba em ambiente marinho, gráfico de roll e pitch.

Nesta etapa, deve-se destacar que conforme indicado nos gráficos de roll e pitch acima (figuras 4.2 até 4.19) e as apresentadas no apêndice C (C.21 a C.24), devido a valores muito pequenos desses ângulos e de suas velocidades p e q (C.272 até C.284), estes contendo valores próximos a zero durante a execução da manobra pelo AUV, pode-se confirmar a hipótese simplificadora, em que foi desconsiderada a equação de Roll, por não gerar grandes influências na manobrabilidade do veículo. Foi percebido também que durante a execução das manobras no plano horizontal, não houve quedas sensíveis na velocidade de avanço desempenhada pelo veículo, garantindo desta forma, que essa alteração é desprezível e não afetou os outros graus de liberdade. Da mesma forma, para o plano vertical, foi visto que as manobras realizadas não geraram grandes aumentos e nem quedas na velocidade de avanço do veículo, o que garante que este não afetou os outros graus de liberdade durante a execução das manobras. Os gráficos de velocidade em relação às manobras podem ser vistos no Apêndice C (de C.261 a C.271). Ao serem analisados os gráficos obtidos com a realização das manobras do AUV para os dois planos, percebeu-se que para valores de leme entre 15 e 20 graus houve uma diminuição de 20% na velocidade U na direção x , conforme indicado pelo DVL. Entretanto, as considerações feitas para linearizar o modelo dinâmico assumidas no capítulo 2, foram atendidas devido ao fato do AUV possuir velocidade U constante durante o período de manobra, alinhada com o eixo x , que pode ser visto nos gráficos de velocidade apresentados no apêndice C (C.261 até C.264), mantendo o equilíbrio dinâmico e não afetando significativamente os outros graus de liberdade.

Analisando-se os gráficos de zig-zag, foram estimados através de um script em Matlab os valores dos índices K , T e δr , utilizando quatro diferentes ângulos de entrada, para que fosse possível descrever de forma mais satisfatória o comportamento do veículo nas proximidades desses pontos de linearização, conforme indicado nas tabelas abaixo.

Tabela 4. 1: Resultados estimados para os índices K e T em ambiente marinho com entrada de leme a 5 graus e para o ângulo residual do leme.

Índices /Leme	5 Graus				Média
K [1/s]	1,040	0,992	0,970	0,979	0,995
T [s]	0,447	0,497	0,413	0,375	0,433
δr [°]	0,120	0,137	0,078	0,140	0,119

Tabela 4. 2: entrada de leme a 10 graus e para o ângulo residual do leme.

Índices/Leme	10 Graus		Média
K [1/s]	0,952	0,969	0,961
T [s]	0,532	0,624	0,578
δr [°]	0,712	0,08	0,396

Tabela 4. 3: Resultados estimados para os índices K e T em ambiente marinho com entrada de leme a 15 graus e para o ângulo residual do leme.

Índices/Leme	15 Graus
K [1/s]	0,841
T [s]	0,777
δr [°]	0,777

Tabela 4. 4: Resultados estimados para os índices K e T em ambiente marinho com entrada de leme a 20 graus e para o ângulo residual do leme.

Índices/Leme	20 Graus		Média
K [1/s]	0,684	0,747	0,716
T [s]	0,777	0,858	0,858
δr [°]	0,918	0,866	0,866

É possível verificar, através dos resultados obtidos para os índices de qualidade de manobra K e T conforme indicados nas tabelas anteriores, que os resultados obtidos através das manobras de zig-zag retornaram valores próximos em relação ao mesmo ângulo de entrada de leme, e conforme esses ângulos de entrada foram aumentando, houve uma pequena diminuição de K e um pequeno aumento em T.

4.1.1.1. Ensaio de campo – Manobra de Giro em ambiente marinho

Da mesma forma como descrito anteriormente para os testes na piscina, foram realizados testes de comparação entre as curvas reais e simuladas, para validar os valores encontrados para os índices K e T. Seguem abaixo as tabelas comparativas montadas através dos gráficos resultantes da simulação e os gerados pela manobra de giro do AUV

Pirajuba para 5, 10, 15 e 20 graus constantes de leme, à velocidade de 1 metro por segundo, utilizando os valores da média de K e T indicados anteriormente. Os gráficos utilizados para gerar a tabela estão apresentados no apêndice C item C.1.

Tabela 4. 5: Tempo estimado para o veículo completar uma volta de 360 graus em comparação aos dados experimentais, para K e T estimados com zig-zag de 5 graus.

Leme	Simulação para K e T experimento 1	Simulação para K e T experimento 2	Simulação para K e T experimento 3	Simulação para K e T experimento 4	Simulação para K e T médio	Experimental [s]
5°	78,10	74,70	79,60	78,95	77,75	84,90
10°	41,80	40,10	42,50	42,10	41,50	45,28
15°	29,70	28,50	30,10	29,90	29,50	34,60
20°	23,60	22,75	23,90	23,70	23,50	28,12

Tabela 4. 6: Tempo estimado para o veículo completar uma volta de 360 graus em comparação aos dados experimentais, para K e T estimados com zig-zag de 10 graus.

Leme	Simulação para K e T experimento 1	Simulação para K e T experimento 2	Simulação para K e T médio	Experimental [s]
5°	81,10	80,00	80,50	84,90
10°	43,30	42,80	43,00	45,28
15°	30,70	30,40	30,55	34,60
20°	24,43	24,20	24,35	28,12

Tabela 4. 7: Tempo estimado para o veículo completar uma volta em comparação aos dados experimentais para K e T estimados com zig-zag de 15 graus.

Leme	Simulação para K e T	Experimental [s]
5°	91,40	84,90
10°	48,50	45,28
15°	34,30	34,60
20°	27,10	28,12

Tabela 4. 8: Tempo estimado para o veículo completar uma volta em comparação aos dados experimentais para K e T estimados com zig-zag de 20 graus.

Leme	Simulação para K e T experimento 1	Simulação para K e T experimento 2	Simulação para K e T médio	Experimental [s]
5°	98,30	102,50	101,00	84,90
10°	52,00	54,30	53,45	45,28
15°	36,50	38,30	38,10	34,60
20°	28,80	30,00	29,00	28,12

Tabela 4. 9: Comparação entre as curvas das velocidades angulares.

Leme	Simulação para K e T estim. a 5°	Simulação para K e T estim. a 10°	Simulação para K e T estim. a 15°	Simulação para K e T estim. a 20°	Simulação para K e T médio	Experimental [°/s]
5°	4,8452	4,846	4,204	3,422	4,33	4,3
10°	9,704	9,691	8,408	6,844	8,67	7,8
15°	14,56	14,54	12,61	10,27	13,1	9,8
20°	19,41	19,38	16,82	13,69	17,2	11,15

Tabela 4. 10: Comparação entre a porcentagem de erro em relação aos tempos de manobra, para K e T estimados com zig-zag de 5 graus.

Leme	Simulação para K e T experimento 1	Simulação para K e T experimento 2	Simulação para K e T experimento 3	Simulação para K e T experimento 4	Simulação para K e T médio
5°	8,01	12,01	6,24	7,01	8,42
10°	7,69	11,44	6,14	7,02	8,35
15°	14,16	17,63	13,01	13,58	14,74
20°	16,07	19,1	15,01	15,72	16,43

Tabela 4. 11: Comparação entre a porcentagem de erro em relação aos tempos de manobra, para K e T estimados com zig-zag de 10 graus.

Leme	Simulação para K e T experimento 1	Simulação para K e T experimento 2	Simulação para K e T médio
5°	4,48	5,77	5,18
10°	4,37	5,48	5,04
15°	11,27	12,14	11,71
20°	13,12	13,94	13,41

Tabela 4. 12: Comparação entre a porcentagem de erro em relação aos tempos de manobra, para K e T estimados com zig-zag de 15 graus.

Leme [°]	Erro [%]
5°	1,77
10°	3,9
15°	15,3
20°	21,4

Tabela 4. 13: Comparação entre a porcentagem de erro em relação aos tempos de manobra, para K e T estimados com zig-zag de 20 graus.

Leme	Simulação para K e T experimento 1	Simulação para K e T experimento 2	Simulação para K e T médio
5°	15,78	20,73	18,96
10°	14,84	19,92	18,04
15°	5,49	10,69	10,12
20°	2,42	6,69	3,13

Tabela 4. 14: Comparação entre a porcentagem de erro em relação às velocidades angulares.

Leme	Simulação para K e T estim. a 5°	Simulação para K e T estim. a 10°	Simulação para K e T estim. a 15°	Simulação para K e T estim. a 20°	Simulação para K e T médio
5°	12,68	12,7	2,2	20,42	0,7
10°	24,41	24,24	9,1	12,26	11,15
15°	48,57	48,37	22,3	4,8	33,67
20°	74,08	73,81	33,7	22,78	54,26

Figura 4. 15: Comparação entre os raios de giro R simulado e real.

Leme	Simulação para K e T estim. a 5°	Simulação para K e T estim. a 10°	Simulação para K e T estim. a 15°	Simulação para K e T estim. a 20°	Simulação para K e T médio	Experimental [m]
5°	11,83	11,81	13,64	16,75	13,23	13,32
10°	5,90	5,91	6,81	8,38	6,61	7,35
15°	3,94	3,94	4,54	5,58	4,37	5,85
20°	2,95	2,96	3,41	4,19	3,33	5,14

Figura 4. 16: Comparação entre a porcentagem dos erros dos raios de giro R simulado e real.

Leme	Simulação para K e T estim. a 5°	Simulação para K e T estim. a 10°	Simulação para K e T estim. a 15°	Simulação para K e T estim. a 20°	Simulação para K e T médio
5°	11,25	11,34	2,38	25,73	0,69
10°	19,68	19,50	7,25	14,04	10,03
15°	32,61	32,60	22,28	4,58	25,19
20°	42,59	42,47	33,71	18,55	35,17

Da mesma forma como visto nos resultados do experimento na piscina, verificou-se que os valores usados de K e T superestimam o comportamento do AUV em ambiente marinho, como é possível verificar nos gráficos de velocidade angular e nas tabelas de raio de giro. Entretanto, ainda assim a equação de primeira ordem de Nomoto consegue fornecer resultados relativamente próximos dos valores experimentais, aumentando o erro conforme os ângulos de leme aumentam o que, espera-se, acentua os efeitos de não linearidades nos esforços hidrodinâmicos.

Os valores de rolagem obtidos para os três gráficos possuem uma média de $-1,5 \leq \text{roll} \leq -3,5$ um pouco superiores em comparação aos obtidos nos testes de piscina. Os valores de K e T que melhor descrevem o comportamento real do veículo foram os valores obtidos para a entrada de leme a 15 graus, com isso substituindo os valores dos índices na equação 4.1:

$$\frac{\Psi(s)}{\Delta(s)} = \frac{K/T}{s^2 + s/T} = \frac{0.841/0.777}{s^2 + s/0.777} = \frac{1.0824}{s^2 + 1.287s} \quad (4.1)$$

4.1.2. Estimação dos índices K e T através da manobra Giro em ambiente marinho para velocidade de 2 metros por segundo.

Utilizando o método de estimação dos índices de qualidade de manobra através das manobras de giro apresentadas no capítulo 3, foram obtidos os valores de K e T através dos gráficos a seguir para o veículo navegando a uma velocidade de 2 m/s.

Figura 4. 20: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme a 2 m/s.

Figura 4. 21: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme a 2 m/s.

Figura 4. 22: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme a 2 m/s.

Figura 4. 23: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme a 2 m/s.

Analisando-se os gráficos de giro, foram estimados através de um script em Matlab os valores dos índices K e T, como indicado na tabela 4.17.

Tabela 4. 17: Resultados estimados para os índices K, T em ambiente marinho, com o AUV a 2 m/s.

Índices de Qualidade	Gráfico 1 (5°)	Gráfico 2 (10°)	Gráfico 3 (15°)	Gráfico 4 (20°)	Média
K [1/s]	0,6853	1,0169	1,0921	1,0338	0,957
T [s]	0,85	0,55	0,45	0,3511	0,5503

Ao comparar os resultados obtidos para K e T com velocidade de avanço a 1 e 2 m/s, percebeu-se que estas estimativas retornaram valores distintos entre si, que podem ser explicados devido a uma maior aceleração em “yaw” sofrido pelo veículo no momento em que este realiza a manobra de giro. Consequentemente, uma maior velocidade de rotação $\dot{\psi}$ é sentida pelo AUV, influenciando nos valores de K e T, como indicado anteriormente na figura 3.10.

Nesta etapa para validar os valores obtidos para K e T através da manobra de giro, foram utilizados outros testes de giro e os resultados foram comparados com as respostas provenientes do simulador. Segue abaixo as tabelas montadas com os dados dos gráficos gerados pela simulação e pela manobra de giro do AUV Pirajuba para 5, 10, 15, e 20 graus constantes de leme, a velocidade de 2 metros por segundo utilizando todos os valores de K e T indicados na tabela 4.17. Os gráficos utilizados para gerar as tabelas estão indicados no apêndice C item C.2.

Tabela 4. 18: Tempo estimado para o veículo completar uma volta de 360 graus, em comparação aos dados experimentais.

Leme	Simulação para K e T estim. a 5°	Simulação para K e T estim. a 10°	Simulação para K e T estim. a 15°	Simulação para K e T estim. a 20°	Simulação para K e T médio	Experimental [s]
5°	98,7	71,35	66,38	70	75,79	100,55
10°	53,38	35,95	33,41	35,18	38,17	32,85
15°	35,87	24,15	22,43	23,57	25,63	20,75
20°	27,12	18,25	16,93	17,76	19,36	16,65

Tabela 4. 19: Comparação entre as curvas das velocidades angulares em relação à manobra de Giro.

Leme	Simulação para K e T estim. a 5°	Simulação para K e T estim. a 10°	Simulação para K e T estim. a 15°	Simulação para K e T estim. a 20°	Simulação para K e T médio	Experimental [°/s]
5°	3,463	5,084	5,46	5,169	4,785	3,687
10°	6,853	10,17	10,92	10,34	9,57	10,618
15°	10,28	15,25	16,38	15,51	14,35	16,500
20°	13,71	20,34	21,84	20,68	19,14	20,649

Tabela 4. 20: Comparação entre a porcentagem de erro em relação aos tempos de manobra.

Leme	Simulação para K e T estim. a 5°	Simulação para K e T estim. a 10°	Simulação para K e T estim. a 15°	Simulação para K e T estim. a 20°	Simulação para K e T médio
5°	1,87	40,93	51,48	43,64	32,67
10°	38,46	8,62	1,68	6,62	13,94
15°	42,15	14,08	7,49	11,96	19,04
20°	38,61	8,77	1,65	6,25	19,14

Tabela 4. 21: Comparação entre a porcentagem de erro em relação às velocidades angulares.

Leme	Simulação para K e T estim. a 5°	Simulação para K e T estim. a 10°	Simulação para K e T estim. a 15°	Simulação para K e T estim. a 20°	Simulação para K e T médio
5°	6,49	27,47	32,47	28,66	22,94
10°	54,93	4,40	2,77	2,68	10,95
15°	60,51	8,20	0,73	6,38	14,98
20°	50,61	1,52	5,46	0,15	7,88

Tabela 4. 22: Comparação entre os raios de giro real e estimados.

Leme	Simulação para K e T estim. a 5°	Simulação para K e T estim. a 10°	Simulação para K e T estim. a 15°	Simulação para K e T estim. a 20°	Simulação para K e T médio	Experimental [m]
5°	33,12	22,56	20,99	22,16	23,92	31,05
10°	16,73	11,27	10,49	11,08	11,97	10,79
15°	11,15	7,51	7,00	7,39	7,99	6,94
20°	8,36	5,63	5,25	5,54	5,99	5,55

Tabela 4. 23: Comparação entre a porcentagem de erro entre os raios de giro real e estimados.

Leme	Simulação para K e T estim. a 5°	Simulação para K e T estim. a 10°	Simulação para K e T estim. a 15°	Simulação para K e T estim. a 20°	Simulação para K e T médio
5°	6,65	27,36	32,42	28,63	22,96
10°	55,04	4,42	2,75	2,71	10,97
15°	60,51	8,20	0,73	6,38	14,98
20°	50,61	1,52	5,45	0,10	7,88

Através da análise dos resultados, verificou-se que os valores usados de K e T gerados a partir da manobra de giro diferentemente dos resultados estimados através da manobra de zig-zag, somente conseguiram prever o comportamento do veículo para as situações onde o ângulo utilizado para estimar K e T é o mesmo utilizado na manobra, o que corresponde aos valores na diagonal da tabela. Esse método de identificação através das manobras de giro, foi utilizado apenas para estimar os valores do coeficiente de manobra

para 2 m/s, devido à qualidade dos resultados dos testes de zig-zag a essa velocidade não terem retornado dados satisfatórios para a análise e para geração de resultados. Dessa forma, o método de estimação dos índices K e T através da manobra de giro foram empregados neste caso como uma alternativa à identificação realizada pelo método padrão de Nomoto (1960).

Da mesma forma que para os testes anteriores, os valores de rolagem obtidos utilizando os gráficos anteriores possuem uma média de $-1,5 \leq \text{roll} \leq -3,5$.

Da mesma forma como citado anteriormente para as manobras a 1 m/s, deve-se destacar que, conforme indicado nos gráficos de roll e pitch apresentados no apêndice C (C.69 a C.72), devido a valores muito pequenos desses ângulos e de suas velocidades p e q representados pela manobra de giro a 20 graus (figura 4.24), estes contendo valores próximos a zero durante a execução da manobra pelo AUV, pode-se confirmar a hipótese simplificadora onde foi desconsiderada a equação de Roll, por não gerar grandes influências na manobrabilidade do veículo. Foi percebido também que durante a execução das manobras no plano horizontal não houve quedas sensíveis na velocidade de avanço desempenhada pelo veículo, garantindo desta forma que essa alteração é desprezível e não afetou os outros graus de liberdade.

Figura 4. 24: Gráfico para a análise da velocidade p e q a velocidade de 2 m/s em uma manobra de giro de 20 graus.

4.2. Aprimoramento da identificação no plano horizontal – filtros lineares – Métodos Estocásticos

Na tentativa de aprimorar a predição do movimento do AUV Pirajuba no plano horizontal em relação às estimativas provenientes da equação de Nomoto, foram aplicadas técnicas de identificação do tipo “caixa cinza”, onde foram utilizadas algumas classes resultantes de processos estocásticos estacionários gerados pela excitação de filtros ou regressores lineares como o ARX (autorregressivo), classes resultantes de processos não estacionários como o ARIMAX (autorregressivo de média móvel com integração I da variável externa ou excitação do sistema), onde X representa a entrada extra $u(t)$ (chamada de variável exógena), e modelos de estrutura do tipo BJ (Box-Jenkins) e BJN (Box-Jenkins com

integração de ruído - Noise) que modelam as funções de transferência sem um fator comum no denominador e também modelam os erros de saída do processo.

As estruturas de modelos citadas anteriormente foram escolhidas através da qualidade de ajuste entre as curvas de estimação (manobras zig-zag) e as curvas de validação (manobras de zig-zag em movimento transiente e manobras de Giro em regime permanente), sendo estes modelos de segunda ordem. Para essa etapa da pesquisa, foi considerada como base a principal configuração de operação do AUV, onde este foi trimado (lastreado de forma a ficar com flutuabilidade neutra e com os ângulos $\phi, \theta, \psi = 0$) para operar em ambiente marinho a uma velocidade de avanço de 1 m/s. Tendo em vista que a aquisição dos dados realizados pelos sensores é feita de forma discreta com período de amostragem de 0,1s, foi realizada uma transformação da função de transferência de discreto para contínuo utilizando um segurador de ordem zero. Abaixo estão indicados os métodos de estimação utilizados, as funções de transferência geradas em relação à velocidade angular de yaw pela entrada de leme, em forma de tabelas comparativas, facilitando desta forma a validação do sistema. Os gráficos que geraram os dados dessas tabelas são apresentados no apêndice C no item C.3.

Tabela 4. 24: Comparação entre os períodos simulados e reais para o AUV completar um Giro de 360 graus.

Leme	ARX - ZZ- 5-5	ARX - ZZ- 15-15	ARIMAX	BJ	BJ Noise	Simulação K e T	Experimental
5°	87,60	99,50	94,20	120,50	101,80	85,10	84,90
10°	44,00	50,10	47,40	60,10	51,10	42,10	45,30
15°	29,50	33,60	31,80	40,00	34,40	28,10	34,60
20°	22,20	25,30	24,00	29,90	25,90	21,10	28,12

Tabela 4. 25: Comparação entre as velocidades angulares simuladas e reais para o AUV completar um Giro de 360 graus.

Leme	ARX - ZZ- 5-5	ARX - ZZ- 15-15	ARIMAX	BJ	BJ Noise	Simulação K e T	Experimental
5°	4,13	3,64	3,85	2,99	3,56	4,20	4,28
10°	8,26	7,27	7,69	5,99	7,11	8,58	7,37
15°	12,39	10,91	11,53	8,98	10,67	12,61	10,29
20°	16,52	14,55	15,38	12,03	14,23	16,82	12,55

Tabela 4. 26: Porcentagem de erro em relação à estimativa do período de manobra.

Leme [°]	ARX - ZZ-5-5	ARX - ZZ-15-15	ARIMAX	BJ	BJ Noise	Simulação K e T
5°	3,18	17,26	11,01	41,93	19,91	0,24
10°	2,83	10,64	4,73	32,73	12,85	7,06
15°	14,74	2,89	8,09	15,61	0,58	18,79
20°	21,05	10,03	14,65	6,33	7,89	24,96

Tabela 4. 27: Porcentagem de erro em relação à estimativa das velocidades angulares.

Leme [°]	ARX - ZZ-5-5	ARX - ZZ-15-15	ARIMAX	BJ	BJ Noise	Simulação K e T
5°	3,53	15,05	10,16	30,16	16,92	1,78
10°	11,98	1,38	4,26	18,83	3,55	16,32
15°	20,42	6,04	12,06	12,69	3,71	22,56
20°	31,66	15,96	22,57	4,13	13,41	34,05

Tabela 4. 28: Funções de transferência estimadas pelos regressores lineares.

Função de Transferência $(\Psi(s)/\Delta(s))$	ARX - ZZ-5-5	ARX - ZZ-15-15	ARIMAX	BJ	BJ Noise	K e T Médio
Numerador	1,244 s + 7,993	1,646 s + 8,897	-0,1589s ² - 1,303 s + 89,62	1,453 s + 0,9584	-0,1804s ² - 0,6415 s + 84,98	1,7391
Denominador	s ² + 5,428 s + 9,68	s ² + 9,403 s + 12,23	s ² + 68,85 s + 116,5	s ² + 1,941 s + 1,608	s ² + 68,29s + 119,5	s + 1,8172

Tabela 4. 29: Comparação entre os raios de giro R estimado e experimental.

Leme	ARX - ZZ-5-5	ARX - ZZ-15-15	ARIMAX	BJ	BJ Noise	Experimental [m]
5°	13,87	15,74	14,88	19,16	16,09	13,39
10°	6,94	7,88	7,45	9,57	8,06	7,77
15°	4,62	5,25	4,97	6,38	5,37	5,57
20°	3,47	3,94	3,73	4,76	4,03	4,57

Tabela 4. 30: Comparação entre as porcentagens de erro dos raios de giro R estimado e real.

Leme	ARX - ZZ-5-5	ARX - ZZ-15-15	ARIMAX	BJ	BJ Noise
5°	3,63	17,58	11,17	43,14	20,22
10°	10,78	1,38	4,16	23,04	3,66
15°	16,95	5,68	10,75	14,59	3,56
20°	24,03	13,74	18,40	4,32	11,81

Além da validação realizada pela manobra de Giro foi comparada também a velocidade angular de yaw na manobra de zig-zag, onde é predominante o regime transitório ao invés do regime permanente no caso do Giro. Abaixo está indicado na figura 4.43 o comportamento das equações preditas e experimental durante a manobra de zig-zag.

Figura 4. 25: Comparação entre os resultados experimentais e estimados pelos filtros regressores, (DANTAS et. al., 2013a).

De modo geral, o modelo ARX estimado pelo Zig-Zag 15-15 e o modelo BJ com integração do ruído de medição conseguem atingir um desempenho médio de predição superior (ajuste de curva médio 80,4% e 87,1% respectivamente) em relação aos outros modelos estimados, ajuste de curva médio 70,2%, 73,8%, 78,6% para método determinístico, ARIMAX E ARX estimado por Zig-Zag 05-05 respectivamente. Dessa forma conseguem descrever o movimento do AUV com boa qualidade e baixo erro em regime permanente, quando comparados com os dados de validação provenientes das manobras de Giro. Entretanto, percebe-se que nenhum modelo consegue predizer o movimento do veículo com boa qualidade em todas as faixas de operação, como indicado nos gráficos e tabelas anteriormente. Ao comparar as respostas geradas pelo modelo de primeira ordem com as dos modelos de segunda ordem percebeu-se que as predições dos modelos de ordem superior são moderadamente melhores que as do modelo de Nomoto, já que estes modelos conseguem incluir na modelagem da função de transferência a influência dos sobressinais das velocidades angulares, que são mais evidentes nos gráficos dos ângulos de leme 15 e 20 graus. Devido também à forma como os modelos de regressão lineares estimam as funções de transferência através da minimização do quadrado do erro, estas levam em consideração além das influências dos sobressinais, os efeitos das quedas de velocidade U , que de forma qualitativa resulta em um desempenho de predição superior, por adicionar mais dados ao estudo em relação ao modelo de primeira ordem de Nomoto, que utiliza o comportamento médio do veículo para descrever a sua dinâmica.

4.3. Aprimoramento da identificação no plano horizontal – filtros lineares com Processamento em Paralelo

Segundo (ABKOWITZ, 1980), o processamento paralelo de dados foi desenvolvido de forma que os dados adquiridos através de duas manobras distintas ou da mesma manobra coletados em fases diferentes, são processadas de forma simultânea pelos algoritmos de identificação, para que se possam estimar os coeficientes desejados de forma mais precisa em relação ao processamento simples. Como exemplo, pode-se juntar uma manobra de zig-zag e uma de giro, onde a primeira manobra fornece resultados muito significantes em relação aos coeficientes hidrodinâmicos de aceleração enquanto os componentes de velocidade contribuem para a análise de forças provenientes do movimento de giro.

Figura 4. 26: Ilustração de um processamento em paralelo.

A figura 4.26 ilustra a forma como são tratados os dados através do processamento paralelo, sendo U os dados da variável manipulada, X os dados da variável controlada, n a quantidade de dados a serem fundidos. As variáveis de entrada U_n e X_n são comparadas entre si, em relação ao mesmo pacote de dados do sistema a ser estudado e posteriormente em relação a todos os outros pacotes a serem fundidos, com o objetivo de verificar a sincronia dos mesmos, isto é, os comparadores verificam se os dados possuem o mesmo tempo ou frequência de amostragem, para não haver problemas de o algoritmo considerar fases diferentes ou dados de trabalho corrompidos o que geraria divergência, junção de

regiões distintas e perda de eficiência no tratamento dos parâmetros, o que resultaria em grandes erros quando este for utilizado nos algoritmos de identificação.

Com o objetivo de aprimorar ainda mais as previsões de comportamento e o processo de identificação da dinâmica do AUV foram utilizadas combinações das manobras de zig-zag de 5, 10, 15 e 20 graus para estimar as funções de transferência do sistema, descrevendo a velocidade angular de yaw pela entrada do leme e validando as equações através de manobras de Giro, onde esse processo é chamado de estimação com processamento de manobras em paralelo. O processamento em paralelo de dados foi realizado por uma ferramenta disponível no ToolBox de Identificação do Matlab, onde podem ser adicionados os dados de inúmeras manobras, sendo que estas obrigatoriamente devem possuir o mesmo tempo de aquisição, o mesmo domínio (tempo ou frequência) e o mesmo número de entradas e saídas em relação ao sistema a ser combinado, desta forma os dados são agrupados de forma a retornar um comportamento médio entre as respostas. Através desse método, durante o processo de combinação de dados, este exclui os valores contaminados ou corrompidos e mescla esses segmentos com dados bons provenientes das outras manobras.

Os dados utilizados no processo de identificação foram combinados, de forma que cinco manobras de zig-zag provenientes de cada ângulo de leme fossem combinadas entre si e posteriormente todas as manobras foram agregadas em uma só. Abaixo são apresentadas as tabelas contendo a respostas que retornaram o melhor desempenho de previsões. Os gráficos que geraram os dados dessas tabelas são apresentados no apêndice C no item C.4.

Tabela 4. 31: Comparação entre os períodos simulados e reais para o AUV completar um Giro de 360 graus para a identificação em paralelo.

Leme	ARIX - grau 2	ARX - IV- grau 4	ARIMAX grau 2	ARIMAX grau 4	BJ - grau 2	BJ - grau 4	BJ Noise - grau 2	BJ Noise - grau 4	Experimental
5°	127,90	89,41	88,20	94,40	117,90	102,90	91,40	102,46	84,90
10°	64,25	44,90	44,37	47,40	58,90	51,50	46,30	51,22	45,30
15°	43,00	30,10	29,80	31,60	39,15	34,26	30,80	34,10	34,60
20°	32,30	22,63	22,50	23,75	29,40	25,65	23,30	25,60	28,12

Tabela 4. 32: Comparação entre as curvas das velocidades angulares em relação à manobra de Giro para a identificação em paralelo.

Leme	ARIX - grau 2	ARX - IV- grau 4	ARIMAX grau 2	ARIMAX grau 4	BJ - grau 2	BJ - grau 4	BJ Noise - grau 2	BJ Noise - grau 4	Experimental
5°	2,820	4,036	4,116	3,816	3,042	3,502	3,964	3,513	4,280
10°	5,640	8,072	8,231	7,632	6,084	7,004	7,928	7,027	7,370
15°	8,459	12,110	12,350	11,450	9,126	10,510	11,890	10,540	10,290
20°	11,280	16,140	16,460	15,260	12,170	14,010	15,860	14,050	12,550

Tabela 4. 33: Comparação entre a porcentagem de erro em relação aos tempos de manobra.

Leme	ARIX - grau 2	ARX - IV- grau 4	ARIMAX grau 2	ARIMAX grau 4	BJ - grau 2	BJ - grau 4	BJ Noise - grau 2	BJ Noise - grau 4
5°	50,648	5,312	3,887	11,190	38,869	21,201	7,656	20,683
10°	41,832	0,883	2,053	4,636	30,022	13,687	2,208	13,068
15°	24,277	13,006	13,873	8,671	13,150	0,983	10,983	1,445
20°	14,865	19,523	19,986	15,541	4,552	8,784	17,141	8,962

Tabela 4. 34: Comparação entre a porcentagem de erro em relação às velocidades angulares.

Leme	ARIX - grau 2	ARX - IV- grau 4	ARIMAX grau 2	ARIMAX grau 4	BJ - grau 2	BJ - grau 4	BJ Noise - grau 2	BJ Noise - grau 4
5°	34,112	5,701	3,832	10,841	28,925	18,178	7,383	17,921
10°	23,474	9,525	11,682	3,555	17,449	4,966	7,571	4,654
15°	17,794	17,687	20,019	11,273	11,312	2,138	15,549	2,430
20°	10,120	28,606	31,155	21,594	3,028	11,633	26,375	11,952

Tabela 4. 35: Funções de transferência para a identificação em paralelo.

Função de Transferência ($\Psi(s)/\Delta(s)$)	ARIX - grau 2	ARX - IV- grau 4	ARIMAX grau 2	ARIMAX grau 4
Numerador	$-0,0897s^2 - 0,896s + 53,79$	$-0,0011s^4 - 9,599s^3 + 192,9s^2 - 3875s + 7,69e^4$	$-0,1139s^2 - 0,8036s + 29,48$	$1,692s^3 + 33,58s^2 + 548,6s + 1547$
Denominador	$s^2 + 47,6s + 95,39$	$s^4 + 88,19s^3 + 2239s^2 + 3,53e^4s + 9,54e^4$	$s^2 + 27,51s + 35,82$	$s^4 + 10,05s^3 + 476,7s^2 + 1247s + 2027$

Tabela 4. 36: Continuação das funções de transferência para a identificação em paralelo.

Função de Transferência ($\Psi(s)/\Delta(s)$)	BJ - grau 2	BJ - grau 4	BJ Noise - grau 2	BJ Noise - grau 4
Numerador	$1,389s + 0,9569$	$1,773s^3 + 26,52s^2 + 517,1s + 731,8$	$-0,1708s^2 - 0,2918s + 62,47$	$1,809s^3 + 26,01s^2 + 512,8s + 727$
Denominador	$s^2 + 1,908s + 1,573$	$s^4 + 8,49s^3 + 442,2s^2 + 837,2s + 1045$	$s^2 + 55,61s + 78,79$	$s^4 + 8,41s^3 + 434,8s^2 + 825,5s + 1035$

Analisando os modelos identificados através do processamento paralelo, os modelos BJ Noise de segundo grau, BJ e BJ Noise de quarto grau são os modelos que melhor predizem a dinâmica de movimento do AUV com menor erro médio. Entretanto os modelos estimados através de uma manobra simples não paralela resultaram em equações identificadas com o desempenho ligeiramente superior aos modelos com processamento paralelo para o caso da identificação no plano horizontal, podendo ser explicado devido à qualidade dos dados de alguma manobra, em específico que ao serem fundidos com outras influenciaram de forma negativa e assim obtendo um desempenho inferior à resposta de uma manobra simples.

4.4. Realização de manobras de PRBS e Pulso com o AUV Pirajuba no plano vertical – Identificação por Métodos Estocásticos

Da mesma forma que realizado para o plano horizontal, foram geradas manobras no plano vertical para identificar a dinâmica do AUV Pirajuba e estimar uma função de transferência, para que esta possa prever o movimento do veículo nesse plano com alta confiabilidade e qualidade.

Visando utilizar os filtros lineares, descritos no capítulo 3, para identificar a dinâmica do veículo, e devido à baixa profundidade do campo de testes da baía de Angra dos Reis, profundidade máxima de 6 metros, foram propostos dois tipos de sinais de entrada como referência às manobras de estimação, sendo eles:

- Entrada do tipo pulso aplicada diretamente nos profundores do AUV;
- Entrada do tipo PRBS aplicada como sinal de referência do controle de profundidade, sendo que a resposta utilizada na estimação dos parâmetros foi a própria saída do controlador.

Como a aplicação do sinal PRBS requer uma maior atenção ao se realizarem as manobras, apenas quatro manobras desse tipo foram adquiridas e os procedimentos de aplicação deste sinal estão descritos no item 3.3.4. A seguir, estão especificadas as características e os resultados obtidos por cada teste.

4.4.1. Manobra Pulso vertical – Identificação ângulo de Pitch

Tendo em vista a impossibilidade de gerar uma excitação do tipo impulso unitário ao sistema a ser identificado, uma solução encontrada para estimar a função de transferência foi aplicar o sinal tipo pulso diretamente na referência dos profundores do AUV. Para garantir que a aplicação do pulso seguisse o procedimento correto com base em (TINKER et al, 1979), conforme indicado anteriormente na figura 3.4 e na tabela 3.1, antes de iniciar a

manobra o veículo mergulhou a uma profundidade de 2,5 metros onde foi aguardado até que este estabilizasse para que posteriormente fosse aplicado o sinal de pulso, sendo que os dados foram coletados pelo período de 10 segundos antes da aplicação do sinal e posteriormente até que o AUV retornasse à condição de regime permanente. Abaixo está indicado na tabela 4.37 os parâmetros a e b de referência do pulso, e a quantidade de manobras realizadas para esses ajustes.

Tabela 4. 37: Parâmetros de ajuste do Pulso referente à quantidade de manobras executadas.

a [graus]	b [s]	Quantidade de manobras feitas
5,0	3,2	4,0
	2,4	2,0
	2,2	2,0
	1,8	2,0
	1,2	4,0
	0,7	2,0
10,0	3,2	2,0
	2,4	2,0
	2,2	2,0
	1,8	2,0
	1,2	2,0
	0,7	2,0
Quantidade final	-----	28,0

Após a realização das manobras, foi utilizado o pacote de identificação do software Matlab para que este facilitasse na análise dos dados, e auxiliasse no processo de identificação. A dinâmica do sistema foi estimada utilizando os 28 pulsos com suas respectivas características, conforme indicado na tabela 3.1 e foram validadas tanto pelos sinais de pulso, quanto pelas manobras PRBS que estão apresentadas com mais detalhes no item 3.3. Para validar as funções de transferência estimadas pelos filtros lineares, foram consideradas as equações que retornaram os maiores valores médios gerais de ajuste de curva (*Mean Fit*) e ao mesmo tempo aquelas que obtiveram o melhor ajuste (*Best Fit*) em relação a uma manobra, tanto em comparação aos sinais de pulso quanto aos sinais PRBS, sendo que essas medidas são fornecidas em porcentagem de assentamento do ajuste. Em todos os casos foram feitos testes com equações de segunda e de quarta ordem, pois estes mantiveram a melhor relação entre predição de movimento e ordem do sistema de equações, sendo que a única exceção foi para o método ARX, que resultou em uma equação de terceiro grau ao invés da equação de segundo grau.

No item a seguir, referente ao processamento paralelo, são apresentadas as tabelas comparativas entre ambos os métodos de identificação contendo os filtros que obtiveram um melhor desempenho ao predizer o comportamento do veículo no plano vertical. Os gráficos utilizados como base a essas tabelas se encontram no apêndice C no item C.5 e C.6.

4.4.1.1. Junção de manobras – Identificação utilizando manobra de Pulso com processamento em paralelo

Na tentativa de aprimorar as predições geradas pelas equações estimadas pelo método simples, foi realizada a junção ou a combinação das manobras de pulso que retornaram os melhores ajustes de curva, para que ao serem processados esses dados o método utilizado para gerar as equações do sistema tenham mais informações qualitativas relevantes. Como a análise de cada um dos dados é feita de forma independente entre si, esse método é chamado de identificação com processamento paralelo. As combinações das manobras foram pensadas de forma a juntar em arquivos de dados as manobras que tiveram um desempenho no ajuste de curva superior às outras manobras, desta forma foram alocadas as cinco primeiras manobras em um pacote de dados, em outro pacote foram alocadas mais seis manobras, posteriormente foi gerado um pacote único contendo as onze manobras anteriores, e por último foi alocado um pacote com todas as manobras juntas.

De forma a facilitar as comparações entre os desempenhos dos métodos (de Barros et al., 1992), segue abaixo as tabelas 4.38 e 4.39 com os dados da média do ajuste e do melhor ajuste obtido nas predições. Também estão indicadas nas tabelas 4.40 e 4.41 as funções de transferência obtidas pelos regressores lineares.

Tabela 4. 38: Comparação dos melhores resultados de ajuste, identificados por manobras excitadas por Pulso.

Melhor ajuste de curva [%]		ARX 222	ARX-IV	ARX 444	ARMAX	ARIMAX	ARIMAX	BJ	BJ	BJ-Noise	BJ-Noise
Validação PRBS	Simples	64,39	-----	64,60	-----	80,68	89,90	77,40	91,05	90,71	90,90
	Paralelo	63,24	65,45	64,90	64,58	-----	88,85	73,66	90,79	90,30	90,83
Validação Pulso	Simples	63,01	-----	64,60	-----	82,68	85,76	78,89	84,97	85,90	85,71
	Paralelo	72,64	68,80	68,79	67,92	-----	88,15	73,66	86,72	85,65	85,65

Tabela 4. 39: Comparação da média dos resultados de ajuste, identificados por manobras excitadas por Pulso.

Média do ajuste de curva [%]		ARX	ARX-IV	ARX	ARMAX	ARIMAX	ARIMAX	BJ	BJ	BJ-Noise	BJ-Noise
Validação PRBS	Simples	51,66	-----	53,05	-----	57,55	57,62	54,71	66,17	73,04	80,32
	Paralelo	61,51	63,74	63,29	63,18	-----	85,90	63,26	87,64	87,10	87,87
Validação Pulso	Simples	46,79	-----	47,60	-----	63,50	68,08	65,32	70,39	68,28	69,32
	Paralelo	56,15	51,19	51,26	48,60	-----	68,89	56,49	71,14	68,25	69,06

Tabela 4. 40: Funções de transferência identificadas por manobras excitadas por Pulso.

Função de Transferência ($\theta(s)/\Delta_s(s)$)		ARX	ARX-IV	ARX	ARMAX	ARIMAX
Simples	Numerador	$(-0,008653s^3 - 0,4432s^2 + 9,67s + 53,11)e^{(-0.1s)}$	*****	$(-0,03323s^4 - 0,2503s^3 - 11,29s^2 + 340,6s + 1017)e^{(-0.1s)}$	*****	$(0,3056s + 2,401)e^{(-0.1s)}$
	Denominador	$s^3 + 46,53s^2 + 51,87s + 22,48$	*****	$s^4 + 73,98s^3 + 1008s^2 + 1065s + 432,5$	*****	$s^2 + 2,594s + 0,8521$
Paralelo	Numerador	$(0,1105s + 2,368)e^{(-0.1s)}$	$(0,1404s + 1,644)e^{(-0.1s)}$	$(-0,02196s^4 - 0,4661s^3 + 2,434s^2 + 227,2s + 1724)e^{(-0.1s)}$	$(0,1479s + 1,738)e^{(-0.1s)}$	*****
	Denominador	$s^2 + 2,445s + 0,8009$	$s^2 + 1,732s + 0,6538$	$s^4 + 69,5s^3 + 1122s^2 + 1836s + 710$	$s^2 + 1,711s + 0,7294$	*****

Tabela 4. 41: Funções de transferência identificadas por manobras excitadas por Pulso.

Função de Transferência ($\theta(s)/\Delta_s(s)$)		ARIMAX	BJ	BJ	BJ-Noise	BJ-Noise
Simples	Numerador	$(-0,08783s^3 - 24,72s^2 + 62,12s + 3212)e^{(-0.1s)}$	$(0,3346s + 2,417)e^{(-0.1s)}$	$(-0,01425s^4 - 0,8653s^3 - 12,43s^2 + 142s + 1389)e^{(-0.1s)}$	$(0,05099s + 3,849)e^{(-0.1s)}$	$(-0,4852s^3 - 4,305s^2 + 74,49s + 750,2)e^{(-0.1s)}$
	Denominador	$s^4 + 20,04s^3 + 695,4s^2 + 3381s + 789,7$	$s^2 + 2,568s + 0,7375$	$s^4 + 69,72s^3 + 646,2s^2 + 1458s + 358,3$	$s^2 + 4,0s + 1,008$	$s^4 + 6,075s^3 + 297,1s^2 + 786,9s + 218,3$
Paralelo	Numerador	$(0,2986s^3 + 2,395s^2 + 13,02s + 50,01)e^{(-0.1s)}$	$(0,1739s + 2,091)e^{(-0.1s)}$	$(-0,03365s^4 - 1,702s^3 + 32,81s^2 + 175s + 2376)e^{(-0.1s)}$	$(0,06925s + 2,612)e^{(-0.1s)}$	$(0,1474s^3 + 4,744s^2 + 71,62s + 1403)e^{(-0.1s)}$
	Denominador	$s^4 + 7,68s^3 + 24,63s^2 + 58,49s + 3,05e^{-11}$	$s^2 + 2,209s + 0,7583$	$s^4 + 164s^3 + 873,4s^2 + 2552s + 561,9$	$s^2 + 2,752s + 0,7326$	$s^4 + 2,92s^3 + 468,7s^2 + 1317s + 315,3$

Através das tabelas de ajuste indicadas anteriormente, foram selecionadas as equações estimadas que obtiveram o melhor desempenho em prever o movimento do AUV no plano vertical. Sendo assim, as equações obtidas pelo método BJ-Noise por processamento paralelo de ordem 2 e de ordem 4 são as que melhor descrevem a dinâmica do veículo utilizando o sinal de pulso como entrada do sistema.

4.4.2. Manobra PRBS plano vertical – Identificação do Ângulo de Pitch

Ao empregar o sinal PRBS na tentativa de identificar o comportamento do AUV devem-se tomar algumas precauções, pois por ser um sinal pseudo-aleatório o veículo pode responder de forma instável, levando-o a atingir grandes profundidades ou a submergir até a superfície resultando na perda do experimento ou em situações mais críticas causar um acidente. Visando então manter a segurança durante o experimento, o sinal de entrada foi aplicado como referência do controlador de profundidade ao invés de aplicá-lo diretamente nos hidroplanos. Ao iniciar o experimento, esperou-se o veículo atingir a profundidade de referência de 1,5 m e entrar em regime, onde foi aplicado o sinal PRBS, fornecendo as novas referências de profundidade contendo os valores de 2,5 e 0,5 m. Segue abaixo a figura 4.26 indicando a resposta do sistema à excitação do sinal de referência.

Figura 4. 27: Manobras PRBS realizadas pelo AUV Pirajuba na baía de Angra dos Reis.

Da mesma forma que realizado para as manobras com excitação de Pulso, no item 4.4.3 estão indicadas as tabelas comparativas contendo o desempenho de predição que os filtros lineares que obtiveram ao prever o comportamento do veículo no plano vertical em relação ao resultado atingido pelos processamentos simples e paralelo. Os gráficos que geraram os dados apresentados na tabela estão indicados nos apêndices C.7 e C.8.

4.4.3. Junção de manobras – Identificação utilizando manobra de PRBS com processamento em paralelo

Tendo em vista a tentativa de aprimorar as predições geradas pelas equações estimadas pelo método simples (estimado apenas com os dados de uma manobra), da mesma forma realizada para a manobra de Pulso, foi realizada a junção das quatro manobras de PRBS para que quando processados os dados das manobras estas retornassem melhores valores de ajuste. Diferentemente do Pulso, as manobras com PRBS foram combinadas em duplas de forma a serem processados os dados das 16 combinações possíveis e mais a junção de todas as manobras em uma. Nos itens abaixo estão apresentadas as funções de transferência que obtiveram melhor desempenho nas predições de movimento vertical.

Para facilitar a visualização dos dados e, compará-los de forma efetiva, como feito para a manobra de Pulso e em (de Barros et al., 1992), as tabelas 4.42 e 4.43 apresentam os dados da média do ajuste e do melhor ajuste obtidos para os casos de identificação simples, paralelo e paralelo total, que inclui todas as manobras em um único arquivo. Também são apresentadas abaixo as tabelas 4.44 e 4.45, que contêm as funções de transferência identificadas para os três casos descritos anteriormente.

Tabela 4. 42: Comparação dos melhores resultados de ajuste, identificados pelo sinal de PRBS.

Melhor ajuste de curva [%]		ARX	ARIX	ARMAX	ARIMAX	ARIMAX	BJ	BJ	BJ	BJ-Noise	BJ-Noise
Validação PRBS	Simples	65,04	-----	65,31	64,88	89,31	75,86	90,35	90,95	90,29	91,56
	Paralelo	66,09	67,01	65,65	66,22	91,58	74,44	91,94	91,42	90,82	91,70
	Paralelo - total	64,83	65,64	64,46	-----	88,08	65,93	91,34	-----	88,58	91,40
Validação Pulso	Simples	62,65	-----	66,95	74,20	85,83	79,67	86,10	85,70	84,45	84,75
	Paralelo	78,06	69,20	62,82	73,89	84,94	79,84	85,13	84,52	85,37	85,12
	Paralelo - total	71,31	68,21	71,47	-----	85,59	75,21	-----	84,62	83,62	84,59

Tabela 4. 43: Comparação da média dos resultados de ajuste, identificados pelo sinal de PRBS.

Média do ajuste de curva [%]		ARX	ARIX	ARMAX	ARIMAX	ARIMAX	BJ	BJ	BJ	BJ-Noise	BJ-Noise
Validação PRBS	Simples	64,61	-----	63,80	64,41	86,07	75,76	87,99	87,60	87,25	88,46
	Paralelo	64,26	65,97	64,34	64,84	88,27	73,12	88,37	88,39	87,64	88,36
	Paralelo - total	62,95	63,90	62,73	-----	85,13	64,17	88,33	-----	85,87	88,37
Validação Pulso	Simples	46,94	-----	60,77	65,01	65,01	64,51	69,78	69,26	67,09	68,24
	Paralelo	56,15	53,54	46,03	60,93	68,20	67,67	68,24	68,37	67,76	68,97
	Paralelo - total	51,14	50,88	52,50	-----	66,83	56,91	-----	68,46	66,38	68,38

Tabela 4. 44: Funções de transferência identificadas por PRBS.

Função de Transferência ($\theta(s)/\Delta_s(s)$)		ARX	ARIX	ARMAX	ARIMAX	ARIMAX
Simples	Numerador	(0,04939s+ 1,177)	*****	(0,06542s+ 1,341)	(-0,3501s +9,429)e^(- 0.1s)	(-0,3151s^3 + 9,552s^2 +19,25s +1617)
	Denominador	s^2+ 1,188s +0,5305	*****	s^2+ 1,521s +0,5284	s^2+ 14,68s +2,58	s^4+30,2 s^3 +700,1s^2+ 1779s +479,8
Paralelo	Numerador	(0,1384s+ 1,888)e^(- 0.1s)	(0,17811s^3 + 0,7473s^2 +79,55s +881,7)e^(- 0.1s)	(0,06524s+ 1,095)	(-0,1157s +6,152)e^(- 0.1s)	(0,3419s^3 + 6,46s^2 +64,68s +298,7)e^(-0.1s)
	Denominador	s^2+ 2,011s +0,6406	s^4+5,492s^3 +522,2s^2+ 1034s +452,3	s^2+ 1,187s +0,5411	s^2+ 9,545s +1,865	s^4+24,01s^3 +157,3s^2+ 316,1s +84,72

Tabela 4. 45: Continuação das funções de transferências identificadas por PRBS.

Função de Transferência ($\theta(s)/\Delta_s(s)$)		BJ	BJ	BJ	BJ-Noise	BJ-Noise
Simples	Numerador	(0,2285s+ 2,16)e^(- 0.1s)	*****	(-0,2731s^3 + 5,223s^2 +135,6s +1624)e^(-0.1s)	(0,076s+ 1,766)	(-0,0196s^3 + 7,196s^2 +45,61s +1483)
	Denominador	s^2+ 2,272s +0,6487	*****	s^4+3,192 s^3 +634s^2+ 1680s +453,6	s^2+ 1,824s +0,5801	s^4+10,36 s^3 +706,4s^2+ 1531s +404,9
Paralelo	Numerador	(0,1536s+ 2,33)e^(- 0.1s)	(0,3018s^3 + 5,85s^2 +126,2s +1541)e^(-0.1s)	(0,2175s^3 + 4,74s^2 +117,7s +1700)e^(-0.1s)	(0,1558s +2,33) e^(-0.1s)	(-0,04132s^4 - 0,7256s^3 +3,739s^2 +4464)e^(-0.1s)
	Denominador	s^2+ 2,403s +0,7204	s^4+5,895s^3 +640,4s^2+ 1561s +413,7	s^4+3,348s^3 +636s^2+ 1725s +455,7	s^2+ 2,405s +0,698	s^4+105,2 s^3 +1882s^2+ 4604s +1212

De forma semelhante ao Pulso foram selecionados os modelos estimados que produziram o melhor desempenho em prever o movimento do AUV no plano vertical. Sendo assim, as equações obtidas pelo método BJ-Noise, com processamento paralelo de ordem 2 e de ordem 4, são as que melhor descrevem a dinâmica do veículo utilizando o sinal PRBS como entrada do sistema.

4.4.4. Manobra Pulso plano vertical – Identificação da Taxa de Profundidade

Outra variável possível de identificar através das manobras realizadas no plano vertical é a taxa de profundidade do veículo, sendo esta a variação em relação à profundidade em um instante anterior e divide-se o resultado pelo tempo. Como sensor de medidas foi utilizado um profundímetro, para que este realizasse as medições de profundidade instantânea a uma taxa de aquisição de 0,1 segundos, que por sua vez realimentava o controlador de profundidade e este agindo na atuação dos hidroplanos do AUV.

Entretanto, os dados de profundidade adquiridos do veículo possuíam um nível médio de ruídos embutidos nas medidas devido à frequente atuação do controlador na tentativa de se manter estável na profundidade de referência. Com isso, foi utilizado o pacote de identificação do software Matlab, da mesma forma que utilizado nos itens anteriores, porém passando os dados por um filtro para atenuar os efeitos de “*chattering*” para que este facilitasse na análise dos dados, e auxiliasse no processo de identificação.

Da mesma forma como feito para a identificação do ângulo de pitch, no item a seguir estão apresentadas as tabelas comparativas indicando os filtros regressores que obtiveram melhor desempenho ao prever o comportamento do veículo no plano vertical. Os gráficos que contem os dados dispostos nas tabelas são apresentados nos apêndices C.9 e C.10.

4.4.4.1. Integração dos testes – Identificação utilizando manobra de Pulso com processamento em paralelo para taxa de profundidade

Na tentativa de aprimorar as previsões geradas pelas equações estimadas pelo processamento simples, foi realizada a combinação das manobras de pulso que produziram os melhores ajustes de curva de variação de profundidade. Nas tabelas 4.50 e 4.51 são apresentadas as funções de transferência que produziram o melhor desempenho nas previsões de movimento vertical. Para facilitar a visualização dos dados e compará-los de forma efetiva (de Barros et al., 1992), as tabelas 4.46 e 4.47 apresentam os dados da média do ajuste e do melhor ajuste obtidos para os casos de identificação simples, paralelo e

paralelo total, que inclui todas as manobras em um único arquivo. Também são apresentadas abaixo as tabelas 4.48 e 4.49 com as funções de transferência identificadas para o método simples, que utiliza somente o dado de uma manobra por vez durante a estimativa e paralelo sendo a junção das manobras realizadas como descrita anteriormente no capítulo 3.

Tabela 4. 46: Comparação dos melhores resultados de ajuste, identificados pelo sinal tipo Pulso.

Melhor ajuste de curva [%]		ARX -IV	ARX - ARIX -IV	ARMAX - ARIMAX	ARMAX - ARIMAX	BJ	BJ	BJ-Noise	BJ-Noise
Validação PRBS	Simples	1,55	8,41	15,19	15,60	15,40	9,11	18,10	5,96
	Paralelo	13,15	6,5	15,58	17,65	13,23	7,33	16,14	20,16
Validação Pulso	Simples	1,59	4,69	10,66	12,06	10,73	11,86	11,23	11,98
	Paralelo	10,08	11,54	10,53	13,64	12,01	13,82	12,73	15,17

Tabela 4. 47: Comparação da média dos resultados de ajuste, identificados pelo sinal tipo Pulso.

Média do ajuste de curva [%]		ARX -IV	ARX - ARIX -IV	ARMAX - ARIMAX	ARMAX - ARIMAX	BJ	BJ	BJ-Noise	BJ-Noise
Validação PRBS	Simples	0,68	2,52	11,89	6,51	10,29	3,72	15,05	3,40
	Paralelo	11,84	5,38	13,41	14,8	11,88	4,57	14,08	13,09
Validação Pulso	Simples	0,51	1,42	3,11	2,74	2,84	3,7	3,21	3,91
	Paralelo	3,02	3,29	3,12	3,58	3,37	4,01	3,08	4,45

Tabela 4. 48: Funções de transferência identificadas por Pulso para taxa de profundidade.

Função de Transferência $(\dot{d}(s)/\Delta_s(s))$		ARX -IV	ARX -ARIX -IV	ARMAX - ARIMAX	ARMAX - ARIMAX
Simples	Numerador	(0,06165s - 3,059)	(0,0301s ⁴ -0,7107s ³ -63,72s ² +1555s -4735)e [^] (-0.2s)	(-0,1157s ² +2,472s - 3,148)e [^] (-0.1s)	(0,878s ⁴ -181,6s ³ -5754s ² +3,83e04s +1,99e06)e [^] (-0.2s)
	Denominador	s ² + 3,963s +143,1	s ⁴ +148,3s ³ +3521s ² + 9,86e04s +2,23e05	s ² + 187,7s +99,65	s ⁴ +4306s ³ +1,85e05s ² + 1,67e06s +1,99e06
Paralelo	Numerador	(-0,1614s ² +3,854s - 12,52)e [^] (-0.2s)	(-0,279s ⁴ + 13,62s ³ - 374,7s ² +4729s - 9045)e [^] (-0.2s)	(-0,0154s ² + 0,3322s -0,4661)	(-0,480s ⁴ + 47,35s ³ - 982,1s ² +5609s - 2,12e04)e [^] (-0.2s)
	Denominador	s ² + 677,6s +203	s ⁴ +533,8s ³ +2277s ² + 4,61e05s +1,427e05	s ² + 24,8s +9,098	s ⁴ +2904s ³ +9,92e04s ² + 1,09e06s +3,26e05

Tabela 4. 49: Continuação das funções de transferência identificadas por Pulso para taxa de profundidade.

Função de Transferência ($\dot{d}(s)/\Delta_s(s)$)		BJ	BJ	BJ-Noise	BJ-Noise
Simples	Numerador	$(-0,1157s^2 + 2,472s - 3,148)$	$(0,878s^4 - 0,296s^3 - 4,207s^2 + 41,72s - 112,5)$	$(-0,0006s - 0,0576)$	$(0,878s^4 - 0,296s^3 - 4,207s^2 + 41,72s - 112,5)$
	Denominador	$s^2 + 187,7s + 99,65$	$s^4 + 449,65s^3 + 254,3s^2 + 7347s + 1652$	$s^2 + 3,692s + 0,6342$	$s^4 + 449,65s^3 + 254,3s^2 + 7347s + 1652$
Paralelo	Numerador	$(0,06243s - 0,1684)$	$(0,112s^4 + 8,974s^3 - 905,8s^2 + 1,53e04s - 3,28e04)e^{(-0.1s)}$	$(0,06243s - 0,1684)$	$(-0,79s^4 + 14,22s^3 - 442,1s^2 + 1,13e04s - 3,76e04)e^{(-0.2s)}$
	Denominador	$s^2 + 7,664s + 2,683$	$s^4 + 4205s^3 + 9400s^2 + 1,57e06s + 4,77e05$	$s^2 + 7,664s + 2,683$	$s^4 + 4181s^3 + 4095s^2 + 1,99e06s + 5,35e05$

De forma semelhante às tabelas montadas para os ângulos de pitch, foram selecionadas as equações estimadas que obtiveram o melhor desempenho em prever o movimento do AUV no plano vertical, sendo assim, as equações obtidas pelo método BJ-Noise com processamento simples de ordem 2 e paralelo de ordem 4 foram as equações estimadas que retornaram os melhores valores ajuste e ajuste médio em relação aos outros filtros, consequentemente esse método são os que melhor descrevem a dinâmica do veículo utilizando o sinal de Pulso como entrada do sistema.

Como há uma grande incidência de ruídos nos dados utilizados para estimar os parâmetros das equações de regressão linear, os valores de ajuste atingiram um patamar bem inferior aos obtidos para os outros tipos de identificação, tanto na vertical como na horizontal, sendo justificado pelo fato da curva estimada não oscilar tanto quanto a curva real, o que retorna valores baixos de ajuste. Entretanto, considerando o comportamento das curvas real e estimada percebe-se que há uma tendência da função de transferência identificada em seguir o padrão da média dos dados da curva real, podendo assim considera-la como uma boa aproximação da realidade, e até mesmo utilizá-la como base a

um piloto automático de controle adaptativo por modelo de referência ou um controle do tipo “*sliding mode*”, onde este prevê uma robustez maior em relação ao “*chattering*” dos hidroplanos.

4.4.5. Manobra PRBS plano vertical – Identificação da Taxa de Profundidade

Com o objetivo de descrever o movimento realizado pelo AUV ao ser fornecida a referência de profundidade no controlador, foi empregada a manobra de PRBS para identificar as equações de movimento do veículo, sempre tomando as devidas precauções na aplicação do sinal, conforme descrito nos itens anteriores. Desta forma, são apresentadas no item 4.4.5.1 as tabelas comparativas contendo a qualidade de ajuste em relação aos dados estimados e as funções de transferência obtidas para este caso que obtiveram melhor desempenho ao predizer o comportamento do veículo no plano vertical. Os gráficos que contêm os dados que complementam as tabelas são apresentados nos apêndice C nos itens C.11 e C.12.

4.4.5.1. Integração dos testes – Identificação utilizando manobra de PRBS com processamento em paralelo – Taxa de Profundidade

Conforme realizado para os casos anteriores, foi realizada a junção das quatro manobras de PRBS para que quando processados os dados das manobras, estas retornassem melhores valores de ajuste.

Para facilitar a visualização dos dados e compará-los de forma efetiva, como feito para a manobra de Pulso e em (de Barros et al., 1992), as tabelas 4.50 e 4.51 apresentam os dados da média do ajuste e do melhor ajuste obtidos para os casos de identificação simples, paralelo e paralelo total, que inclui todas as manobras em um único arquivo. São apresentadas na sequência também as tabelas 4.52 e 4.53 contendo as funções de transferência do sistema identificado.

Tabela 4. 50: Comparação dos melhores resultados de ajuste, identificados por manobras excitadas por PRBS.

Melhor ajuste de curva [%]		ARX -IV	ARX - ARIX -IV	ARMAX - ARIMAX	ARMAX - ARIMAX	BJ	BJ	BJ- Noise	BJ- Noise
Validação PRBS	Simples	16,31	16,36	18,44	19,28	15,36	18,66	2,16	19,99
	Paralelo	7,66	19,40	18,62	19,38	14,80	21,87	1,66	20,16
	Paralelo - total	2,94	10,14	14,47	19,21	14,56	14,81	1,29	19,25
Validação Pulso	Simples	7,31	8,67	9,68	10,19	9,384	12,63	2,035	10,94
	Paralelo	5,50	10,50	11,63	12,01	10,96	14,00	1,60	12,36

Tabela 4. 51: Comparação da média dos resultados de ajuste, identificados por manobras excitadas por PRBS.

Média do ajuste de curva [%]		ARX -IV	ARX - ARIX -IV	ARMAX - ARIMAX	ARMAX - ARIMAX	BJ	BJ	BJ- Noise	BJ- Noise
Validação PRBS	Simples	15,25	14,67	16,21	13,27	14,07	16,91	1,41	16,75
	Paralelo	6,78	16,56	16,05	16,47	13,50	18,51	1,26	18,84
	Paralelo - total	2,58	9,05	13,05	16,53	13,24	13,51	1,13	16,86
Validação Pulso	Simples	2,11	2,6	2,87	3,15	2,95	3,57	0,76	3,48
	Paralelo	0,7	2,96	3,17	3,47	3,12	3,8	0,65	4,03

Tabela 4. 52: Funções de transferência estimadas para profundidade utilizando PRBS.

Função de Transferência $(\hat{d}(s)/\Delta_s(s))$		ARX -IV	ARX - ARIX -IV	ARMAX - ARIMAX	ARMAX - ARIMAX
Simples	Numerador	$(0,03778s - 0,07725)e^{(-0.1s)}$	$(0,0424s^4 + 7,923s^3 - 67,94s^2 + 1577s - 8464)e^{(-0.2s)}$	$(0,00566s^2 + 2,072s - 19,61)e^{(-0.2s)}$	$(-0,3295s^4 + 2,059s^3 - 230,1s^2 + 857,6s - 7889)e^{(-0.2s)}$
	Denominador	$s^2 + 5,506s + 2,163$	$s^5 + 20,67s^4 + 1588s^3 + 1,16e04s^2 + 5.07e05s + 2,03e05$	$s^3 + 21,83s^2 + 1109s + 301,2$	$s^5 + 29,88s^4 + 1608s^3 + 2,62e04s^2 + 4,5e05s + 1,32e05$
Paralelo	Numerador	$(-0,0113s^2 + 0,7672s - 11,9)e^{(-0.1s)}$	$(0,2268s^4 + 10,17s^3 + 55,48s^2 + 64,71s - 1,007e04)e^{(-0.2s)}$	$(0,03467s^2 + 4,937s - 19,55)e^{(-0.1s)}$	$(-0,5318s^4 + 3,075s^3 - 388s^2 + 933,8s - 8041)e^{(-0.2s)}$
	Denominador	$s^3 + 2,351s^2 + 988,5s + 162,8$	$s^5 + 36,88s^4 + 1935s^3 + 2,33e04s^2 + 6,77e05s + 1,5e05$	$s^3 + 22,51s^2 + 1116s + 285,3$	$s^5 + 29,07s^4 + 1644s^3 + 2,41e04s^2 + 4,53e05s + 1,21e05$

Tabela 4. 53: Continuação das funções de transferência estimadas para profundidade utilizando PRBS.

Função de Transferência ($\dot{d}(s)/\Delta_s(s)$)		BJ	BJ	BJ-Noise	BJ-Noise
Simples	Numerador	(0,0043s - 0,0473)	(-0,125s ³ - 0,2696s ² - 1,646s - 0,4822)e [^] (-0.2s)	(0,07055s - 2,585)e [^] (-0.2s)	(0,1428s ³ - 3,322s ² + 3,162s - 66,24)e [^] (-0.2s)
	Denominador	s ² + 2,863s + 0,8055	s ⁴ + 11,07s ³ + 93,51s ² + 56,69s + 10,72	s ² + 2,316s + 534,6	s ⁴ + 10,35s ³ + 549,1s ² + 3560s + 980
Paralelo	Numerador	(0,0043s - 0,04557)	(-0,1225s ⁴ + 3,54s ³ - 121,2s ² + 2404s - 8138)	(0,03514s - 1,601)e [^] (-0.2s)	(-0,00212s ⁴ + 0,243s ³ - 17,12s ² + 306,1s - 883,5)
	Denominador	s ² + 2,685s + 0,7416	s ⁵ + 6,897s ⁴ + 1486s ³ + 4793s ² + 4,79e05s + 1,13e05	s ² + 1,958s + 515,2	s ⁴ - 5,78s ³ + 1753s ² + 4,60e04s + 1,26e04

De forma semelhante aos procedimentos anteriores foram selecionadas as equações estimadas que obtiveram o melhor desempenho em prever o movimento do AUV no plano vertical, sendo assim, as equações obtidas pelos métodos ARMAX e BJ Noise com processamento paralelo de ordem 2 e de ordem 4, respectivamente, são as que melhor descrevem a dinâmica do veículo utilizando o sinal PRBS como entrada do sistema.

Constatou-se também que o valor de $my_G \sin \theta$ não influenciou significativamente no movimento de yaw, como pode ser visto nos gráficos do apêndice C (C.259 e C.260), atingindo o valor máximo 0,0021 kg.m. Mesmo após as perturbações nos profundores causados pelas entradas tipo Pulso e PRBS, o ângulo e a taxa de Yaw não variam significativamente, mantendo uma média próxima de zero, variando entre mais ou menos 1°.

5. Conclusões

Este trabalho propôs a aplicação de métodos de identificação de sistemas dinâmicos para a estimativa de modelos lineares de manobra, determinísticos e estocásticos. A representação por funções de transferência para cada grau de liberdade considerada foi adotada e seus coeficientes foram estimados através das técnicas de identificação apresentadas.

O equacionamento dinâmico de veículos navais é um procedimento bem difundido na literatura e proporciona com clareza o entendimento das forças e momentos atuantes no corpo do veículo. Através do processo de derivação das equações dinâmicas, apresentado no capítulo 2, é possível compreender a natureza física dos esforços envolvidos e desta forma realizar o processo de simplificação para o AUV estudado, que possui peculiaridades geométricas, e derivar modelos lineares e as suas respectivas funções de transferência.

Com os estudos sobre os sinais determinísticos usados na identificação de sistemas dinâmicos, apresentados no capítulo 3, concluiu-se que, em relação ao plano vertical, é necessário tomar cuidado ao aplicar os sinais harmônicos ou degrau, pois o veículo pode atingir profundidades críticas como o fundo do tanque de provas, ou até mesmo atingir a superfície, afetando a aquisição de dados e colocando em risco a integridade física do veículo. Desta forma, o sinal de pulso é o mais indicado para realizar a estimação de parâmetros de movimento no plano vertical, pois conforme visto na figura 3.3, após aplicado o pulso, o veículo tende a retornar ao seu estado inicial. Uma possível alternativa para reduzir os riscos ao se realizarem as manobras no plano vertical, é que ao invés de se injetar diretamente os sinais nos hidroplanos, estes sejam utilizados como sinais de referência para o controlador de profundidade, sendo que este procedimento pode ser aplicado para os sinais harmônicos, degrau e até mesmo ao PRBS, este utilizado também como o Pulso para identificar a dinâmica do AUV.

O método de identificação utilizado para estimar a manobrabilidade do AUV no plano horizontal combinou resultados obtidos em manobras de zig-zag e giro (onde o primeiro é uma sucessão de degraus de mesma magnitude e sinais invertidos e o último é um degrau constante, ambos aplicados no leme do veículo).

Os resultados experimentais, analisados no capítulo 4, confirmaram a maior parte das hipóteses adotadas para as simplificações e linearizações admitidas. Pode-se tratar os movimentos independentemente em 2 planos (horizontal e vertical), a dinâmica do movimento de balanço é passível de ser negligenciada e perturbações de segunda ordem ou superiores nas velocidades de deriva, arfagem, caturro, banda e guinada são desprezíveis.

A velocidade do veículo confirmou sua direção no eixo longitudinal do AUV e apresentou o valor constante da velocidade de cruzeiro na maior parte das manobras executadas. Exceções foram verificadas em manobras relativas a deflexões no leme maiores ou iguais a 15 graus. Para estes casos, testes com a presença do sensor de velocidades DVL indicaram a redução significativa da velocidade, sem, contudo, mostrar alteração em sua direção relativa ao sistema solidário ao AUV. Atribui-se este efeito ao aumento do arrasto causado pelos hidroplanos quando defletidos a maiores ângulos.

Além do efeito na direção de avanço, pode-se verificar um impacto na dinâmica do movimento de guinada, com a redução do valor da velocidade angular em regime permanente durante a manobra de giro. Além do efeito da queda da pressão dinâmica na eficiência dos lemes, pode-se acrescentar como outra causa o efeito da estolagem, que já fora verificado para ângulos de ataque maiores do que 10 graus durante testes em tanques de prova (Dantas et al., 2013). Este efeito pode indicar a conveniência de se estimar modelos distintos relativos a intervalos diferentes para os valores de deflexão do leme. No entanto, a adoção de uma mesma função de transferência ainda mostrou desempenho razoável, e pode-se concluir que a hipótese de separação da dinâmica de avanço das dinâmicas dos demais movimentos manteve-se aceitável.

Para o caso dos testes realizados em ambiente aberto marinho, os valores obtidos para os índices K e T, do modelo Nomoto, superestimaram as previsões de velocidade angular de rumo e os raios de giro do veículo para todos os casos estudados, possuindo maiores erros de previsão para manobras com maiores deflexões das superfícies de controle (equação 4.3). Atribui-se os erros para manobras com maiores deflexões das superfícies devido às maiores limitações deste modelo de primeira ordem em lidar com os efeitos não lineares presentes nestas manobras. Ainda em relação ao modelo Nomoto, a análise das funções de transferência de primeira ordem obtida para velocidades de 2 metros por segundo sugere a conveniência de se adotar pelo menos dois modelos para se estimar o movimento em pequenos e grandes ângulos de leme, devido, principalmente, ao método alternativo utilizado para estimar os valores de K e T. Para as funções de transferência estimadas para a velocidade de avanço a 1 metro por segundo, percebeu-se que é possível utilizar apenas uma equação sendo esta de segunda ou quarta ordem estimada pelos filtros de regressão linear, como podem ser visualizados através dos gráficos de validação apresentados no decorrer da dissertação.

Na tentativa de aprimorar as previsões do comportamento do AUV foram utilizados alguns filtros lineares ou regressores lineares de segunda e quarta ordem que obtiveram um desempenho consideravelmente melhor em alguns casos em comparação com a equação de primeira ordem de Nomoto, sendo que de modo geral o método de estimação ARX estimado a 15 graus e o Box-Jenkins com integração de ruído (ARX_ZZ_15 e BJ-Noise respectivamente) resultaram em menores erros de ajuste de curva em relação ao regime

transitório e permanente, e melhores desempenhos de predição (figura 4.43). Abaixo são apresentadas as funções de transferência obtidas para o plano horizontal pelo método de regressão linear ARX e BJ-noise:

$$\frac{\Psi(s)}{\Delta(s)} = \frac{1.646s + 8.897}{s^2 + 9.403s + 12.23}$$

$$\frac{\Psi(s)}{\Delta(s)} = \frac{-0.1804s^2 - 0.6415s + 84.98}{s^2 + 68.29s + 119.5}$$

Com relação ao movimento no plano vertical, os modelos de segunda e quarta ordem conseguem descrever o movimento do AUV para todas as entradas de lemes consideradas. Foram realizadas manobras distintas das propostas para o plano horizontal, sendo aplicados sinais de Pulso e PRBS que são característicos da área da identificação de sistemas. Estes métodos foram executados baseando-se nos trabalhos de (BOOTH, 1975) e (TINKER et. al., 1979). A manobra utilizando o sinal de Pulso foi realizada de forma bem simples, sempre atentando em relação aos tempos de aquisição e de duração do experimento, o que por sua vez retornou valores estimados do ângulo Θ muito satisfatórios em relação às predições comportamentais do AUV no plano vertical, que foram comprovadas pelas figuras de ajuste de curva (Figuras C.125 até C.140). No caso do PRBS, houve a necessidade de se atentar à profundidade do local, para que se reduzissem os riscos de acidentes durante a execução das manobras, que por esse motivo gerou menos dados a serem trabalhados na identificação, sendo apenas 4 manobras (figura 4.45) aproveitadas para o estudo. A resposta do sistema estimado por PRBS atingiu um desempenho semelhante ao da resposta ao Pulso, onde foi possível prever com ótima qualidade o movimento do veículo, como indicado nas figuras de PRBS no apêndice C (C.159 até C.194). Foi concluído também que para ambos os métodos de identificação, as equações de segundo e quarto grau estimadas pelos filtros Box-Jenkins com integração do ruído – BJ-Noise utilizando o processamento em paralelo estimado pela manobra de PRBS são as equações que melhor descrevem o comportamento do ângulo de Pitch pela entrada do hidropiano.

Também foram estimadas funções de transferência para a taxa de profundidade do AUV. Entretanto, ao se verificar os dados adquiridos pelo sensor de profundidade, foi percebido um alto nível de ruído proveniente da oscilação dos hidroplanos devido à atuação constante do controlador de profundidade. Desta forma, os dados utilizados no algoritmo de estimação sofreram influência desses ruídos, o que resultou em uma análise de ajuste de curva (“Best fit [%]”), que indica em porcentagem o quão próximo do desempenho da curva

real a curva estimada consegue atingir, eles retornaram valores de ajuste inferiores aos obtidos em relação à identificação do ângulo de pitch e para descrever a manobrabilidade do veículo no plano horizontal. Após estimadas as funções de transferência da taxa de profundidade, foi visto que as equações de segundo e quarto graus obtidas pelos métodos de identificação ARMAX e BJ-Noise com processamento paralelo, respectivamente, geradas pelos experimentos de PRBS, foram as que obtiveram melhor desempenho ao predizer a taxa de profundidade do veículo. Abaixo estão apresentados as funções de transferência que descrevem a dinâmica do plano vertical do AUV.

$$\frac{\theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.06524s + 1.095}{s^2 + 1.187s + 0.5477}$$

$$\frac{\theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{(0.3018s^3 + 5.85s^2 + 126.2s + 1541)}{s^4 + 5.895s^3 + 640.4s^2 + 1561s + 413.7} e^{-0.1s}$$

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{(0.03467s^2 + 4.937 - 19.55)}{s^2 + 1.187s + 0.5477} e^{-0.1s}$$

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{(-0.00212s^4 + 0.243s^3 - 17.12s^2 + 306.1s - 883.5)}{s^4 - 5.78s^3 + 1753s^2 + 4.60 \cdot 10^4s + 1.26 \cdot 10^4}$$

Nessa etapa deve-se observar que como visto em (LJUNG, 1999), os coeficientes das funções de transferência obtidos pelos métodos de regressão linear não necessariamente possuem significado físico e somente matemático, o que os diferenciaria nos resultados dos coeficientes obtidos para cada plano.

Outro ponto a ser ressaltado durante a realização dos testes foi o fato de terem sido tomados os devidos cuidados com o AUV, pois, como as superfícies de controle do veículo são constituídas de um material resinado e o seu corpo tem como base fibra de vidro, este com o passar do tempo ou devido a pequenos impactos nessas superfícies, podem surgir pequenas trincas e imperfeições no corpo, resultando em diferenças no escoamento hidrodinâmico ao redor do AUV, o que por sua vez afetaria na resposta do sistema ao realizar manobras.

6. Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos pelos métodos de identificação de sistemas dinâmicos demonstrados nesse trabalho retornaram resultados bastante satisfatórios e promissores. Entretanto, pode-se considerar como uma alternativa as predições da manobrabilidade do veículo referente ao plano horizontal, provenientes de equações identificadas pelo método caixa cinza e pela equação de primeira ordem de Nomoto, à utilização de um método caixa branca através da equação de segunda ordem de Nomoto, onde os métodos de identificação seriam utilizados para estimar apenas os coeficientes dessa equação.

Sabendo também que a dinâmica do AUV Pirajuba é não linear, deve ser considerado também como alternativa aos métodos lineares aplicados no decorrer dessa dissertação a utilização de métodos de identificação não lineares. Através da realização de manobras semelhantes às executadas pelo veículo nos dois planos, a estimação de equações não lineares podem retornar valores de predição a dinâmica do veículo com ajustes de curva superiores aos modelos linearizados.

7. Referências bibliográficas

A'Hearn, K., Coppolino, R., **A system identification method for simplifying dynamics equations of motion for remotely operated vehicles and towed systems**. Proceeding of the 2000 International Symposium on Underwater Technology, Japan, pp. 525–530, 2000.

ABKOWITZ, M. A. **Stability and Motion Control of Ocean Vehicles**. 2ª edição, USA, 1972.

ABKOWITZ, M. A. **Measurement of Hydrodynamic Characteristics from Ship Maneuvering Trials By System Identification**. SNAME transactions, Vol. 88, pp. 283 – 318, USA, 1980.

AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas - técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais**. 3. ed., Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007.

ALCOCER, A.; OLIVEIRA, P.; PASCOAL, A. **Underwater Acoustic Positioning Systems Based on Buoys with GPS**. Proceedings of 8o European Conference on Underwater Acoustics, Carvoeiro, Portugal, Jun. 2006.

ALLMENDINGER, E.E. **Submersible Vehicle Systems Design**. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1990.

ARENTZEN, E. S., MANDEL, P., “**Naval Architectural Aspects of Submarine Design**“, Journal of Ship Research, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 68, 1960.

ASTROM, K. J.; WITTENMARK, B. **Computer-controlled systems – theory and design**. 3. ed. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1997.

AVILLA, J.P. J.; **Modelagem e identificação de parâmetros hidrodinâmicos de um veículo robótico submarino**. Tese para obtenção de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BOOTH, T. B., “**Identifying the Marine Vehicle from the Pulse Response**“. Proc. 4th Ship Control Systems Symposium, Vol. 4, pp 137-150, The Hague, 1975.

BROWN, R. G.; HWANG, P.Y.C. **Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering**: with MATLAB Exercises and Solutions. 3th Ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1997.

CAETANO, W. S. ; BARROS, E. A. **Identificação da manobrabilidade de AUV s utilizando a equação de primeira ordem de Nomoto**. In: NAVCOMP 2013 Simpósio em Computação e Automação para Indústria Naval, Offshore, Rio Grande, 2013.

CAMACHO, E. F.; BORDONS, C. **Model predictive control in the process industry**. 2. ed. London, Springer, 2004.

CAMPOS, J. Falcão de. **On the Calculation of Ducted Propeller Performance in Axisymmetric Flows**. Tese (Doutorado) _ Delft University, 1983.

CHAI, P. Y. **Moment of Inertia measurement for Propulsion system**. [...], 2007.

COELHO, A. A. R. **Identificação e Controle Adaptativo**. Apostila de Aula da Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil, 2006.

COSTELLO, D.; KAMINER, I.; CARDER, K.; HOWARD, R. **The use of unmanned vehicle systems for coastal ocean surveys: Scenarios for joint underwater and air vehicle missions**. In: Proceedings of the Workshop on Undersea Robotics and Intelligent Control. Lisboa, Portugal: [s.n.], 1995.

CROSSBOW. VG700AA Users Manual. Set. 2002 (Document 7430-0074-01).

DANTAS, J. L. D.; BARROS, E. A. de; BOAS, F. V.; MUTSCHELER, F. A.; UMEDA, C. H. **Experimental research on AUV maneuverability**. In: COBEM 2011 - 21st International Congress of Mechanical Engineering. Natal-RN, Brasil: ABCM, 2011.

DANTAS, J. L. D., **“Software de Simulação Hardware-in-the-Loop para a Simulação do Sistema de Navegação e Controle de Veículos Autônomos Submarinos”**, Monografia de Conclusão de Curso, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2008.

DANTAS, J. L. D., **”Modelagem e Otimização do Sistema Planta Controlador Aplicado ao Projeto de Veículos Autônomos Submarinos”** Tese de qualificação de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2012.

DANTAS, J. L. D., CAETANO, W. S., VALE, R. T. S., BARROS, E. A., **“Analysis of Identification Methods Applied to Free Model Tests of the Pirajuba AUV”**. In: CAMS 2013 - The 9th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems. Osaka, Japan, 2013a.

DANTAS, J. L. D., CAETANO, W. S., VALE, R. T. S., BARROS, E. A., OLIVEIRA, L. M., PINHEIRO, A. R. M., CARDENAS, P. V. BARROS, E. A., **“Experimental Research on Underwater Vehicle Manoeuvrability Using the AUV Pirajuba”**. In: COBEM 2013 – The 22nd International Congress of Mechanical Engineering. Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, 2013b.

DANTAS, J.; BARROS, E. de. **Numerical analysis of control surface effects on AUV manoeuvrability**. Applied Ocean Research, v. 42, p. 168 _ 181, 2013c. ISSN 0141-1187. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014111871300045X>>.

de BARROS, E., A ; MAEDA, H.; MIYAJIMA, S. **A System Identification Experiment For An Underwater Vehicle**, 11th Ocean Engineering Symposium July 1992.

de BARROS, E., A ; DANTAS, J.; PASCOAL, A.; SA, E. de. **Investigation of normal force and moment coefficients for an AUV at nonlinear angle of attack and sideslip range.** *Oceanic Engineering*, IEEE Journal of, v. 33, n. 4, p. 538_549, out. 2008a. ISSN 0364-9059.

de BARROS, E., A ; DANTAS, J.; FREIRE, L. O.; OLIVEIRA, L. M. de; VALE, R. T. S. **New aspects in the Pirajuba AUV project.** In: ABCM (Ed.). COBEM 2011 - 21st International Congress of Mechanical Engineering. Natal, RN, Brazil: [s.n.], 2011.

de BARROS, E. A.; FREIRE, L. O.; DANTAS, J. L. D. **Development of the Pirajuba AUV.** In: Proceedings of CAMS 2010 - Control Applications in Marine Systems. [S.l.: s.n.], 2010.

de BARROS, E. A.; PASCOAL, A. M.; Sá, E. de. **Progress towards a method for predicting AUV maneuvers.** In: MCMC2006 - 7th IFAC Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft. Lisbon, Portugal: [s.n.], 2006.

de BARROS, E. A.; PASCOAL, A., de Sá, E. **“Investigation of a method for predicting AUV derivatives”**, Elsevier, Ocean Engineering, pp. 1627-1636. 2008b.

de BARROS, E. A.; PASCOAL, A. de Sa, E., **“AUV dynamics: modeling and parameter estimation using analytical, semi-empirical, and CFD methods”**, Proc. of CAM's 2004, Itália, 2004.

DESSET, S.; DAMUS, R.; MORASH, J. **Use of GIB for Underwater Archaeology: Time-Saving System Substitutes for LBL Navigation System; Enables Communication with Undersea Vehicles.** Sea Technology, Dez. 2003.

EYKHOFF, P. **System identification: parameter and state estimation.** London, John Wiley, 1974.

FOSSSEN, T. I, **Guidance and Control of Ocean Vehicles**, 1ª edição, Inglaterra, 1994.

FOSSSEN, T. I, **Marine Control Systems- Guidance, Navigaton, and Control of ships, Rigs and Underwater Vehicles**, 1ª edição, Inglaterra, 2002.

GARCIA, C. **Apostila da disciplina PTC-5719: identificação de sistemas.** São Paulo, Brasil, 2011.

GARCIA, C. **Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos.** 2. ed. São Paulo, Edusp, 2005.

GREWAL, M, S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global Position System, Inertial Navigation and Integration.** New York, USA: John Wiley & Sons, 2001.

GRIFFITHS, G. **Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles.** Taylor and Francis. 2003.

GUIZILINI, V. C. **Localização e Mapeamento Simultâneos com Auxílio Visual Omnidirecional**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

HEWITT, G., WATERMAN, E. **Phoenix Model Measurement and Bifilar Swinging**. Institute for Ocean Technology – Canada, 2005.

HOEKSTRA, M. **A rans-based analysis tool for ducted propeller systems in open water condition**. International Shipbuilding Progress, v. 53, n. 3, p. 205_227, jan. 2006. Disponível em:
<<http://iospress.metapress.com/content/73VE7EPXN8JDBK5W>>.

HOERNER, S. **Fluid Dynamics Drag**. P.O. Box 65283, Vancouver, WA 98665, published by Author 's estate, 1965. ISBN 9993623938.

HOERNER, S. **Fluid Dynamics Lift**. 2nd edition. P.O. Box 65283, Vancouver, WA 98665, published by Author 's estate, 1992. ISBN 9998831636.

HOFF, J. C.; COOK, M. V. **Aircraft Parameter Identification Using an Estimation Before modeling Technique**. The Aeronautical Journal of The Royal Aeronautical Society, 1996.

HOLTROP, J. A Statistical re-analysis of resistance and propulsion data. Internacional ship-building progress, p.253, 1984.

JACKSON, H. A. **Fundamental of submarine concept design**. SNAME Transactions, v. 100, p. 419_448, jan. 1992.

JAKUBA, M.V. et al. **Long-Baseline Acoustic Navigation for Under-Ice AUV Operations**. Journal of Field Robotics, Wiley Periodicals, v. 25, Nov. 2008, p.861–879.

JOURNÉE, J.M.J., **A Simple Method for Determining Manoeuvring Indices K and T from Zigzag Trial Data**, Ship Hydromechanics Laboratory, Delft University of Technology, Netherlands, 2001.

JOURNÉE, J.M.J., **Introduction in Ship Hydromechanics**. Ship Hydromechanics Laboratory, Delft University of Technology, Netherlands, 2002.

JUNQUEIRA, F. C. **Desenvolvimento de um Giroscópio Sintonizado Dinamicamente: DTG**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2003.

KAILATH, T., **Linear Systems**, Prentice Hall, 1980.[4] W.M. Wonham, **Linear Multivariable Control: A geometric approach**. New York: Springer-Verlag, 1979.

KATZ, J., Plotkin, A., **Low-Speed Aerodynamics, Second Ed.**, Cambridge University Press, ISBN-10 0-521-66219-2, 2005.

KIMBALL, P.; ROCK, S. **Sonar-based iceberg-relative AUV navigation**. Autonomous Underwater Vehicles, AUV 2008. IEEE/OES, Oct. 2008, p.1-6.

KINSEY, J. C.; WHITCOMB L. L., **In Situ Alignment Calibration of Attitude and Doppler Sensor for Precision Underwater Vehicle Navigation: Theory and Experiment**. IEEE Journal of Oceanic Engineering, v. 32, no. 2, April 2007, p. 286-299.

KIRK, D. E., **Optimal Control Theory : an Introduction**. 2nd Edition, Prentice – Hall, Inc. 1998.

KLEIN, V. E.A. Morelli., **Aircraft System Identification**. Theory and Practice. AIAA. 2006.

KOJIMA, J.; KATO, Y.; ASAKAWA, K.; KATO, N. Experimental **results of autonomous underwater vehicle 'AQUA EXPLORER 2' for inspection of underwater cables**. In: OCEANS '98 Conference Proceedings. [S.l.: s.n.], 1998.v.1 ,.

LAPOINTE, C. E. G. **Virtual Long Baseline (VLBL) Autonomous Underwater Vehicle Navigation Using a Single Transponder**. Dissertação (Mestrado), Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, 2006.

LARSEN, M. B., **The Autonomous Redundant Navigation System of an AUV for Mine Counter Measures**. Proceedings of Undersea Defense Technology, UDT2006, 2006.

LAWRENCE, A. **Modern Inertial Technology**. 2nd Edition, Springer Verlag. 1998.

LEWANDOWSKI, E. M. **The Dynamics of Marine Craft - Maneuvering and Seakeeping**. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004.

LEWIS, E. V., **“Principles of Naval Architecture”**. The Society of Naval and Marine Engineers, Jersey City, USA, 1990.

LJUNG, L. **System Identification: theory for the user. 2. ed**. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1999.

LUQUE, R. C.C., **Identificação e Controle de um Veículo Submersível Autônomo Sub-Atuado** . Tese para obtenção de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MILNE, P. H. **Underwater Acoustic Positioning Systems**. Houston, USA: Gulf Publishing Company, 1983.

MORGADO, M. P.; SILVESTRE, O. C. **Posterior Cramér-Rao bounds analysis for INS/USBL navigation systems**. Proceedings of MCMC2009 - 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, Guarujá, Brasil, 2009.

MORISHITA, H. M. ; CANHETTI, A. C. M. . **Modelo Livre de Submarinos**. In: 17º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore, 1998, Rio de Janeiro. 17º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore, 1998.

MYRING, D. F. **A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow**. Aeronautical Quarterly, v. 27, n. 3, p. 186_194, August 1976.

NEWMAN, J. N. **Panel methods in marine hydrodynamics**. In: 11th Australasian Fluid Mechanics Conference. Hobart, Australia: [s.n.], 1992.

NEWMAN, J. N. Book. **Marine hydrodynamics**. [S.I.]: MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1977. xiii, 402 p. : p. ISBN 0262140268 0262140268.

NOMOTO, K., **Analysis of Kempf's Standard Manoeuvre Test and Proposed Steering Quality Indices**, First Symposium on Ship Manoeuvrability, October 1960.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4nd. Ed. Prentice Hall. 2003.

OLIVEIRA, J.N.S.P. **Desenvolvimento de um Sistema de Posicionamento Acústico USBL e Validação com Testes de Mar**. Dissertação para obtenção de mestrado, Instituto superior tecnico-universidade tecnica de lisboa, lisboa, 2009.

PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. **Probability, Random Variables and Stochastic Processes**. 4th Ed. New York, USA: Mc Graw Hill, 2001.

PASCOAL, A. The AUV MARIUS: **Mission scenarios, vehicle design, construction and testing**. In: Proceedings of the 2nd Workshop on Mobile Robots for Subsea Environments. Monterey Bay Aquarium, Monterey, California, USA: [s.n.], 1994.

PASCOAL, A.; OLIVEIRA, P.; SILVESTRE, C.; BJERRUM, A.; ISHOY, A.; PIGNON, J.-P.; AYELA, G.; PETZELT, C. MARIUS: **an autonomous underwater vehicle for coastal oceanography**. Robotics Automation Magazine, IEEE, v. 4, n. 4, p. 46 _ 59, dez. 1997. ISSN 1070-9932

PINTO, M. A. M. **Sonar de Varrimento Lateral Para Navegação Relativa**. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2009.

PRESTERO, T. **Verification of a Six-Degree freedom simulation model for Remus autonomous underwater vehicle**. 128 p. Dissertação (master's thesis) – MIT Massachusetts Institute of Technology and Wood Hole Oceanographic institution, 2001.

RUIZ, I.T.; PETILLOT, Y.; D. M. LANE. **Improved AUV Navigation using Side-scan Sonar**. In Proceedings MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS, 2003, p.1261-1268, 3 v.

SNAME. **Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid**. [S.I.], 1950.

SODERSTROM, T.; STOICA, P. **System identification**. Hemel Hempstead, U.K., Prentice Hall International, 1989.

STEWART, R., **The gyroscope**, Journal of the Franklin Institute, volume 65, Issue 2, Pages 122 –125, February 1858.

STOVALL, S. H. **Basic Inertial Navigation**. California, USA: Naval Air Warfare Center Weapons Division, Set. 1997.

TAO, G., JIN, Z., **Modeling and Identification of Autonomous Underwater Vehicle for Advanced Control**. Proceedings of 2012 International Conference on Modelling, Identification and Control, Wuhan, China, June 24-26, 2012.

TINKER, S. J., BOWMAN, A. R., BOOTH, T. B., “**Identifying Submersible Dynamics from Free Model Experiments**”. The Royal Institution of Naval Architects, 1979.

TITTERTON, D. H.; WESTON, J. L. **Strapdown Inertial Navigation Technology. 2nd Ed.** London: Institution of Engineering and Technology, 2004.

TRIANTAFYLLOU, M.S., HOVER, F.S. **Maneuvering and Control of Marine Vehicles**. Cambridge, Massachusetts, USA: The MIT Press, 2003.

WHITCOMB, L. L.; YOERGER, D. R.; SINGH, H. **Combine Doppler/LBL Based Navigation of Underwater Vehicles**. 11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, Durham, New Hampshire, USA, 1999.

ZANONI, F. D., **Modelagem e Implementação do Sistema de Navegação para um AUV**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo São Paulo, Brasil, 2012.

ZANONI, F. D., **Desenvolvimento de Filtro de Kalman on-line com requisitos de tempo real para a navegação de vants**. Monografia (Conclusão de Curso), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2007.

ZHAO, L.; GAO, W. **The experimental study on GPS/INS/DVL integration for AUV**. Position Location and Navigation Symposium, PLANS 2004, April 2004, p. 337-340.

ZUBEN, F. J. V.; **Analysis of Linear Systems**. Apostila de Graduação, da disciplina EA-616, Unicamp, Campinas, 2004. Pode ser acessado em:
< <http://www.dca.fee.unicamp.br/~vonzuben/> >

Apêndice A

A. Estimativa Teórica e Experimental de Parâmetros de Distribuição de Massa

Para que fosse possível realizar os estudos sobre a manobrabilidade e a estabilidade do AUV Pirajuba, fez-se necessário saber a posição do seu centro de massa (ou centro de gravidade CG) e os valores dos momentos de inércia em relação ao eixo y e ao eixo z, sendo representado pelos índices I_y e I_z respectivamente. Porém, como o AUV possui parte de sua geometria irregular e este é equipado com muitos itens distribuídos no interior de seus vasos principal e de manobra, o que torna difícil estimar de forma geométrica a posição do CG e dos índices I_y e I_z .

Desta forma foi utilizado dois métodos para estimar esses índices:

- Execução do experimento de um pêndulo bifilar;
- Modelagem do veículo em CAD 3D (Ambiente Solidworks);

A.1. Experimento: Pêndulo Bifilar

O pêndulo bifilar é constituído por um corpo de massa m homogêneo, suspenso na horizontal por dois fios inextensíveis de igual comprimento L . Os fios sustentam a barra em dois pontos equidistantes do ponto médio da barra como indicado na figura A.1.

Figura 1. 1: Ilustração da montagem de um pêndulo bifilar.

O pêndulo bifilar é usado como uma forma experimentalmente prática de se obter parâmetros como o momento de inércia e o raio de giração de objetos geralmente em formatos cilíndricos, onde esses parâmetros são obtidos através do período de oscilação desse pêndulo.

A.1.1 Raio de Giração

O raio de giração K_{gr} corresponde à distância do eixo na qual devemos concentrar toda a massa de um corpo, para obtermos o mesmo momento de inércia desse corpo com sua massa distribuída. Segue abaixo na figura A.2 a representação do raio de giração de um corpo com massa M .

Figura A. 1: Representação do raio de giração K_{gr} de um corpo, (CHAY, 2007).

Portanto, é possível dizer que o momento de inércia do corpo pode ser calculado pela equação $J = m \times K_{gr}^2$, onde J é o momento de inércia, e M é a massa do corpo.

A.1.2 Modelagem das Equações do Experimento

Sabendo que os filamentos devem possuir sempre a mesma distância em relação ao C.G para que o veículo se mantenha alinhado horizontalmente, o momento de inércia pode ser calculado conforme a modelagem a seguir:

Figura A. 2: Montagem do pêndulo bifilar com o veículo AUV para a realização do experimento, (CHAY, 2007).

Figura A. 3: Oscilação bifilar do veículo.

Sendo:

- β , o ângulo do filamento em relação a vertical [rad].
- α , o ângulo formado em relação a horizontal [rad].
- D , a distância entre os filamentos [m].
- L , o comprimento dos filamentos [m].
- r , a distância entre o filamento e o C.G ($r = D/2$) [m].
- m , a massa do sistema [kg].
- g , a constante gravitacional [$9,806 \text{ m/s}^2$].

Sabendo que cada fio nesta configuração suporta metade do peso do AUV, isto é $P=mg/2$, é possível calcular a componente horizontal da força:

Figura A. 4: Cálculo da magnitude da tração no cabo.

Assumindo que os ângulos α e β são dependentes, é possível dizer que:

$$\alpha \cdot r = \beta \cdot L \Rightarrow \frac{mg}{2} \cdot \sin \frac{\alpha \cdot r}{L} \quad (\text{A.1})$$

Adotando o ângulo α como pequeno (valor máximo igual a 10°), pode-se substituir o valor de seno α pelo próprio valor de α . Ambas componentes horizontais formam um par de forças cujo momento é descrito por:

$$\frac{m \cdot g}{2} \cdot \frac{\alpha \cdot r}{L} * 2 \cdot r = \frac{m \cdot g \cdot \alpha \cdot r^2}{L} = a \cdot \alpha \quad (\text{A.2})$$

Onde, a é o ângulo de giração. Nestas condições o momento é diretamente proporcional ao ângulo de giração e conseqüentemente o pêndulo efetua um movimento harmônico de período:

$$t = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{a}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{mgr^2}} = \frac{4\pi}{D} \cdot \sqrt{\frac{JL}{mg}} \quad (\text{A.3})$$

Equação A.3: Período de oscilação, em função do momento de inércia.

Onde:

- J , é o momento de inércia do sistema a ser determinado [kg/m^2].
- t , é período de oscilação [s].

Sabendo que $J = m \times K_{gr}^2$, podemos reescrever a equação A.3 como:

$$t = \frac{4\pi}{D} \cdot \sqrt{\frac{mK_{gr}^2L}{mg}} = \frac{4\pi \cdot K_{gr}}{D} \cdot \sqrt{\frac{L}{g}} \Rightarrow K_{gr} = \frac{TD}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (\text{A.4})$$

Equação A.4: Raio de giração em função do período de oscilação.

Onde, K_{gr} é o raio de giração [m].

A.1.3 Equipamentos

Um pórtico com altura cerca de 2,5 metros foi posicionado e utilizado no local onde foram realizados os testes. O pórtico utilizado era semelhante a uma talhadeira simples, onde foram montados e presos dois grampos tipo "C" à viga superior, de forma que o AUV possuísse espaço para realizar a oscilação bifilar sem colidir com nenhum obstáculo.

Esses grampos fornecem um ponto exato para a origem do movimento e permitem que os filamentos sejam ajustados com facilidade e para que o veículo mantenha o nível durante sua oscilação. Os filamentos são ajustados de forma que o CG fique no centro dos dois apoios, e para isso foram utilizadas duas células de carga entre os cabos de aço, com capacidade máxima de medição de 50 kg cada uma, que indicam por meio de um aparelho receptor com display digital a distribuição de massa em torno de cada apoio. Os dados da célula de carga podem ser transferidos através deste aparelho receptor para uma base de

dados no computador caso seja necessário à utilização dos valores medidos para outros fins. Segue abaixo o desenho de projeto, e os detalhes da montagem do experimento.

Figura A. 5: Desenho de projeto da montagem do experimento.

Figura A. 6: Esquema de montagem do experimento.

Figura A. 7: Detalhe de montagem do grampo tipo "C" e filamentos.

Figura A. 8: Célula de carga (esquerda) e display indicador de carga (direita).

Figura A. 9: Mosquetão de segurança, para prender os cabos de aço.

A.1.4 Medições Experimentais

Abaixo foi descrita a seqüência básica de eventos seguidos para que se possa reproduzir de forma mais simples o experimento.

- Deve se primeiramente montar o veículo com todos os seus respectivos equipamentos, e em seguida o comprimento do modelo deve ser medido.
- Colocar no pórtico os grampos tipo “C” e ajustar o filamento, para que estes possuam o mesmo comprimento em relação ao plano horizontal, e definir uma distância fixa D entre os filamentos .
- Encaixar as células de carga no meio do filamento para que estes possam medir a massa do veículo, e sempre tomando cuidado para não exceder a capacidade máxima da célula podendo danificá-la.
- Suspender o veículo e sustenta-lo no ar por meio dos filamentos.
- Nivelar o veículo se necessário com o plano horizontal.
- Posicionar o centro de gravidade na posição $D/2$, por meio da indicação de massa medida pelas células de carga.
- Oscilar o veículo com uma amplitude máxima de 10 graus.

Com o modelo em oscilação foi medido o período de 20 oscilações e dividido por 20 para calcular a média de cada período. Foram realizadas cinco ciclos de medição.

Os testes foram realizados primeiramente para obter o momento de inércia do veículo em guinada (rotação em yaw, momento de inércia no eixo z), e posteriormente foi rotacionado o veículo 90 graus para obter o momento de inércia do veículo em arfagem (rotação em pitch, momento de inércia no eixo y).

O levantamento dos dados de posicionamento do C.G e dos momentos de inércia do veículo foram feitos para tres configurações distintas, sendo elas:

- AUV sem sensor de velocidade DVL instalado, trimado para testes em piscina.
- AUV sem sensor de velocidade DVL instalado, trimado para testes em mar .
- AUV com sensor de velocidade DVL instalado, trimado para testes em mar .

Lembrando que para cada configuração descrita acima, o veículo foi trimado anteriormente para que este quando inundado em água permanece neutro.

A.1.5 Análise de incerteza

Em um esforço para determinar a sensibilidade do raio de giração final, que foi calculado a partir das medidas descritas acima, uma análise de incerteza deve ser realizada com base nos seguintes níveis de incerteza de cada equipamento, sendo eles:

- Período de oscilação: $u(t) = \pm 0,005$ segundo.
- Comprimento dos filamentos: $u(L) = \pm 0,100$ metros.
- Distância entre filamentos: $u(D) = \pm 0,100$ metros.

Com base na equação A.4 introduzida anteriormente, o valor da incerteza no raio de giração pode ser descrito como:

$$u^2(K_{gr}) = \left(\frac{\partial K_{gr}}{\partial t}\right) u^2(t) + \left(\frac{\partial K_{gr}}{\partial D}\right) u^2(D) + \left(\frac{\partial K_{gr}}{\partial L}\right) u^2(L) \quad (\text{A.5})$$

Equação A.5: Cálculo da incerteza do raio de giração.

Onde:

- u = incerteza na medição.
- t = Período de Oscilação (s).
- K_{gr} = raio de giração (m).
- L = Comprimento do corpo (m).

As derivadas parciais do raio de giração com relação a cada medição são listados abaixo:

$$\frac{\partial K_{gr}}{\partial t} = \frac{D}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{L}} = \frac{K_{gr}}{t} \quad (\text{A.6})$$

Equação A.6: Derivada parcial de K_{gr} em relação a t .

$$\frac{\partial K_{gr}}{\partial D} = \frac{t}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{L}} = \frac{K_{gr}}{D} \quad (\text{A.7})$$

Equação A.7: Derivada parcial de K_{gr} em relação ao D .

$$\frac{\partial K_{gr}}{\partial L} = \frac{tD}{4\pi} \cdot \sqrt{g} \cdot \left(\frac{1}{2}\right) L^{-\frac{3}{2}} = \frac{K_{gr}}{L} \left(\frac{1}{2}\right) \quad (\text{A.8})$$

Equação A.8: Derivada parcial de K_{gr} em relação ao L.

As equações A.5 á A.8 podem ser combinadas resultando na seguinte equação:

$$u^2(K_{gr}) = \left[\left(\frac{K_{gr}}{t} \right)^2 \cdot u^2(t) \right] + \left[\left(\frac{K_{gr}}{D} \right)^2 \cdot u^2(D) \right] + \left[\frac{1}{4} \left(\frac{K_{gr}}{L} \right)^2 \cdot u^2(L) \right] \quad (\text{A.9})$$

Equação A.9: Equação discreta da incerteza.

Com base nos níveis de incerteza listados acima, por meio da Equação A9, o cálculo da incerteza de cada raio de giração é facilmente encontrado.

A.2 Modelagem do AUV Pirajuba em ambiente Solidworks

Tendo em vista o rápido avanço tecnológico e o aumento expressivo de recursos computacionais, onde são encontrados potentes hardwares, softwares de simulação e projeto de alta qualidade que possuem amplas capacidades recursivas, e grande confiabilidade em seus resultados e ao mesmo tempo proporcionando praticidade e ganho de tempo na execução de projetos, foi utilizado o software de maquete eletrônica Solidworks 2011 para projetar, e estimar os parâmetros dos índices de inércia, e a posição do CG do AUV.

O software comercial Solidworks proporciona um ambiente bastante amigável para a realização de projetos e cálculos específicos de engenharia integrando com grande confiabilidade as três principais frentes de projeto, sendo elas:

- CAD - Computer Aided Design (desenho auxiliado por computador);
- CAE - Computer Aided Engineering (engenharia auxiliada por computador);
- CAM - Computer Aided Manufacturing (Fabricação Assistida por Computador);

No caso do AUV foram utilizados os recursos de CAD/CAE, onde foi realizada a modelagem do veículo, atribuído às densidades de cada componente, e com isso calculado o valor dos índices I_y , I_z , e do CG. A figura a seguir mostra o desenho de projeto em 3D, e a forma como são apresentados os resultados calculados pelo software Solidworks para os índices I_y , I_z , e do CG do AUV Pirajuba.

Figura A. 10: C.G. e momentos de inércia estimados pelo software Solidworks.

Como o software apresentou os dados fora do sistema internacional de unidades (SI), e a referência dos eixos inerciais apresentada é diferente do convencional utilizado na área naval, foram feitas as devidas conversões e realizadas as comparações com os dados obtidos experimentalmente. Como o AUV Pirajuba sofreu atualizações em seus componentes embarcados, nos itens a seguir serão apresentados os resultados para os anos de 2012 e 2013.

A.3 Estimativa do momento de inércia com massa adicional

Em mecânica dos fluidos a massa adicional é a inércia adicionada a um sistema, devido a aceleração e a desaceleração de um corpo modificando o volume do fluido. A massa adicional para o AUV é representada quando este esteja submerso em um fluido, geralmente em água, onde ela preenche os volumes vazios em seu interior adicionando assim inércia ao sistema e podendo também modificar a posição do C.G e de seu centro de flutuabilidade.

De forma ilustrativa e teorica para estimar o momento de inércia do veículo quando inundado em água, foi adicionado ao desenho de projeto do AUV Pirajuba, feito em ambiente 3D no software SolidWorks, "volumes de água" localizados nos espaços livres do veículo que naturalmente são preenchidos com água quando submerso.

Após posicionar devidamente os "volumes de água", foram obtidos os novos momentos de inércia e a posição do C.G do veículo para a sua configuração mais adequada sendo esta com DVL e trimado para o mar. Abaixo são indicadas as tabelas com os dados calculados experimentalmente, e pelo software tanto para o veículo seco como inundado.

Tabela A. 1: Comparação entre os resultados obtidos para a massa do AUV.

Ano	Ambiente	DVL	Massa molhada [kg]	Massa seca SW [kg]	Massa seca Exp. [kg]
2012	Piscina	Não	67,42	52,85	53,00
2012	Piscina	Sim	66,10	54,40	54,65
2012	Mar	Não	68,70	54,18	53,84
2012	Mar	Sim	68,86	56,91	56,00
2013	Piscina	Não	67,70	54,52	54,45
2013	Piscina	Sim	67,95	54,77	55,30
2013	Mar	Não	66,18	53,00	53,80
2013	Mar	Sim	66,93	53,75	54,28

Tabela A. 2: Comparação entre os resultados obtidos para a posição do C.G. para o AUV.

Ano	Ambiente	DVL	Xcg molhado [mm]	Xcg seca SW [mm]	Xcg seca Exp. [mm]	Ycg molhado [mm]	Ycg seca SW [mm]	Zcg molhado [mm]	Zcg seca SW [mm]
2012	Piscina	Não	880,19	898,24	885,00	0,17	0,32	11,96	17,25
2012	Piscina	Sim	855,10	901,46	870,00	0,18	0,22	6,11	8,18
2012	Mar	Não	795,00	913,88	887,00	0,17	0,33	13,00	17,94
2012	Mar	Sim	853,09	829,12	847,00	0,26	0,38	15,85	16,04
2013	Piscina	Não	859.67	906.69	871,00	0.09	0.11	11.49	12.50
2013	Piscina	Sim	855.46	901.25	883,00	0.18	0.22	8.55	8.85
2013	Mar	Não	860.89	909,56	897,00	0.09	0.11	9.37	9.88
2013	Mar	Sim	859.90	907.65	892,00	0.18	0.22	7.02	6.95

Tabela A. 3: Comparação entre os resultados obtidos para os momentos de inércia do AUV.

Ano	Ambiente	DVL	Ix molhado [kg.m ²]	Ix seco SW [kg.m ²]	Iy molhado [kg.m ²]	Iy seco SW [kg.m ²]	Iy seco Exp. [kg.m ²]	Iz molhado [kg.m ²]	Iz seco SW [kg.m ²]	Iz seco Exp. [kg.m ²]
2012	Piscina	Não	0,5320	0,3931	13,0483	9,0734	9,2008	12,987	9,0116	9,2126
2012	Piscina	Sim	0,4963	0,4471	13,7040	9,1155	9,7411	13,682	9,1502	9,8534
2012	Mar	Não	0,5391	0,4029	13,0984	9,3434	9,5717	15,773	9,3790	9,6149
2012	Mar	Sim	0,4571	0,4010	13,9121	9,6478	9,9739	13,9472	9,8333	9,8299
2013	Piscina	Não	0,5264	0,4635	13,7810	8,9430	8,8203	13,7281	8,8894	8,8670
2013	Piscina	Sim	0,5135	0,4508	13,7773	9,0063	8,8978	13,8170	8,9657	8,8187
2013	Mar	Não	0,5128	0,4503	13,6522	8,7617	8,6601	13,6119	8,8031	8,7045
2013	Mar	Sim	0,5030	0,4402	13,7002	8,8586	8,6805	13,7300	8,8891	8,6070

Tabela A. 4: Análise de incertezas geradas nos experimentos de pêndulo bifilar.

Ano	Ambiente	DVL	Análise de incertezas - u(k)
2012	Piscina	Não	0,084
2012	Piscina	Sim	0,087
2012	Mar	Não	0,085
2012	Mar	Sim	0,084
2013	Piscina	Não	0,080
2013	Piscina	Sim	0,079
2013	Mar	Não	0,079
2013	Mar	Sim	0,080

Apêndice B

B. Estudo de Sensores Utilizados em Experimentos de Identificação e na Instrumentação de Veículos Autônomos Submarinos (AUVs)

Nos últimos anos com a ascensão tecnológica, os veículos autônomos submarinos (AUVs) estão sendo cada vez mais utilizados. Como exemplo, pode-se utilizar esses veículos para monitoramento ambiental, levantamentos de dados geológicos e biológicos, e em aplicações militares como detecção de minas.

Um dos sistemas primordiais para a segurança destes veículos e para a identificação de locais de interesse para suas missões é o módulo de navegação, que inclui, além dos sensores específicos, um programa na unidade de processamento embarcada, responsável pela correção e combinação de suas medidas. Assim, a pesquisa e implementação dos sistemas de navegação específicos para AUVs é condição para a capacitação no desenvolvimento desses veículos.

Sabendo disso, é de suma importância que o AUV seja adequadamente instrumentado para que a navegação e os controles embarcados atinjam o desempenho ótimo daquele projeto.

B.1. Sensores

Os principais sensores utilizados na navegação de AUVs incluem sistemas inerciais, bússolas magnéticas, inclinômetros, sensor de atitude, profundímetros, velocímetros Doppler, sonar e sistemas acústicos de posicionamento. Os sensores citados anteriormente são especificados no decorrer desta seção.

B.1.1. Sistemas Inerciais

A unidade de medição inercial (IMU) é um sensor que tem como objetivo prever a posição de um determinado corpo dentro de um período de tempo estabelecido. As IMUs devem conter conjuntos de acelerômetros para a medição de força específica e conjuntos de giroscópios para detecção de movimentos de rotação.

Além dos sensores inerciais contidos na IMU, podem existir elementos de filtragem, que possuem o objetivo de eliminar ou reduzir os ruídos que acompanham os sinais dos sensores. As etapas de filtragem também procuram eliminar possíveis distorções no espectro de frequências das observações (efeitos de aliasing). Também são necessários

dispositivos de aquisição (amostragem) e conversores de sinais analógicos para sinais digitais.

O sistema inercial descrito neste documento refere-se a um sistema do tipo “Strapdown”, que é o sistema utilizado pelo AUV Pirajuba. Utilizando a definição de (TITTERTON; WESTON, 1997), “Strapdown” é o nome dado a um sistema de medição inercial integrado, onde os sensores inerciais, conjuntos de acelerômetros e giroscópios, são montados sobre eixos ortogonais coincidentes e fixados diretamente no veículo ou em uma base rígida, portanto, o movimento angular não é isolado.

Os eixos dos acelerômetros e dos giroscópios devem ser coincidentes (paralelos) para que se possam realizar transformações de coordenadas, caso necessário. Para que o sistema inercial possa operar no espaço tridimensional, faz-se necessário a utilização de no mínimo três acelerômetros e três giroscópios montados de acordo com a descrição anterior.

Ao agregar um sistema de sensores inerciais do tipo “Strapdown” com um sistema de controle eletrônico específico a esse sistema, obtém-se então uma estrutura denominada unidade de medição inercial ou IMU (inertial measurement unit).

Fixando-se uma IMU num dado corpo ou veículo, tem-se uma estrutura denominada Plataforma. Esta estrutura passa a formar o sistema de coordenadas do veículo também denominado como sistema de coordenadas da plataforma conforme mostrado na figura B.1.

Figura B. 1: Sistema de coordenadas fixo e móvel utilizado no AUV Pirajuba (LAWRENCE, 1998).

B.1.1.1. ACELERÔMETROS

As operações de um sistema de navegação inercial dependem das leis da mecânica clássica formuladas por Newton. A segunda lei de Newton associa a resultante das forças atuantes em um corpo e a aceleração do mesmo, sendo tal relação proporcional à massa, assumida invariante no tempo. Desta forma, conhecendo-se a aceleração é possível calcular a velocidade através da integração dos dados em relação ao tempo. Os sensores que medem essas acelerações são chamados acelerômetros.

Os acelerômetros são sensores utilizados para medir a aceleração linear em sistemas inerciais, estes sensores medem a aceleração do corpo em que está situado juntamente com a aceleração gravitacional, portanto esta deve ser compensada para não interferir nos resultados. A equação do acelerômetro é indicada a seguir:

$$\mathbf{f} = \mathbf{a} - \mathbf{g} \quad (\text{B.1})$$

onde:

- $\mathbf{f}$ é a força específica;
- $\mathbf{a}$ é o vetor da aceleração com relação a um referencial desejado;
- $\mathbf{g}$ é o vetor de aceleração gravitacional.

Utilizando um exemplo clássico para entender o funcionamento dos acelerômetros, ao posicionar um acelerômetro fixo em um corpo orientado na direção contrária da aceleração gravitacional, e assumindo que esse corpo esteja totalmente em repouso e nivelado sobre a superfície terrestre, o acelerômetro retornará a medição de “-g” como previsto através da equação (B.1).

B.1.1.2. GIROSCÓPIO

Essencialmente, um giroscópio clássico consiste em um rotor (volante), perfeitamente balanceado, que, ao girar em alta velocidade, mantém, de acordo com as leis de Newton, a orientação do seu eixo de rotação, apontando sempre para um mesmo ponto no espaço (com respeito a um sistema de referência universal), exceto quando perturbado por uma força externa, como a gravidade ou o atrito (fricção).

Os giroscópios utilizados em sistemas inerciais do tipo “strapdown” são sensores capazes de medir a variação angular de um corpo com relação a um sistema inercial. O sinal fornecido pelo giroscópio é a taxa angular ou velocidade angular e, portanto deve ser integrada para que se possa obter o ângulo de rotação.

B.2. RUÍDOS E ERROS DE SENSORES

Tendo em vista que os sensores sofrem influências externas, esses sensores podem resultar em erros de medidas de pequenas a grandes magnitudes. Como exemplo, os erros e imprecisões nas medidas de um sistema inercial são influenciados por interferências magnéticas, erros na montagem e na calibração do equipamento, danificação de algum sensor interno e devido a distúrbios aleatórios.

Podem ser destacados também os erros devido à calibração do sensor, e esses erros são classificados como erros determinísticos, ou seja, podem ser expressos por

uma função matemática bem determinada. Já as fontes de erros de natureza aleatória não possuem uma função matemática bem determinada, podendo apenas ser descritas através da teoria de processos estocásticos, (PAPOULIS; PILLAI, 2001). A seguir são indicadas as fontes de erros mais comuns que degradam o processo de navegação inercial “strapdown”.

- **Random Walk:** É um ruído com distribuição normal e é constituído pelo somatório de processos com ruído branco, sendo que este tipo de ruído possui uma potência espectral em todas as frequências (GREWAL; WEILL; ANDREWES, 2001).
- **“Bias” (polarização, ou viés):** Pode ser interpretado como sendo um nível de sinal constante ou que varia muito lentamente, independentemente do sinal de entrada. Mesmo sendo constante, um sinal de “bias” pode mudar de valor em algumas condições, por exemplo, ao se religar o equipamento (ZANONI, 2012).
- **Fator de escala:** Trata-se de um erro que é proporcional ao sinal de entrada, ou seja, o erro de fator de escala comporta-se como um erro de inclinação do coeficiente angular da equação de uma reta. Embora sejam modelados como lineares, erros deste tipo geralmente exibem algum grau de não linearidade (ZANONI, 2012).
- **“Drift” (ou deriva térmica):** Os sensores inerciais são afetados pela temperatura e devem ser compensados eletronicamente. Como esta compensação nunca é perfeita, a deriva térmica deve ser modelada como um processo aleatório (ZANONI, 2012).
- **Desalinhamento:** Refere-se ao desalinhamento mecânico de posicionamento entre eixos. Idealmente os giroscópios e os acelerômetros definem uma base ortogonal idealizada como estrutura da plataforma. Como é impossível se obter um perfeito alinhamento mecânico da plataforma na prática, descrevem-se então os erros de alinhamento de cada sensor com relação aos eixos da plataforma como constantes aleatórias (STOVALL, 1997).

B.3. CLASSIFICAÇÃO DE UMA IMU

Utilizando como base Brown e Hwang (1997), a qualidade de uma IMU está diretamente relacionada ao desempenho do seu conjunto de sensores internos, pois os erros e ruídos dos sensores afetam crucialmente o desempenho da navegação inercial. Atualmente os sistemas de IMUs “strapdown” encontrados comercialmente são divididos basicamente em três categorias: alta qualidade, média qualidade e baixa qualidade, como descritos a seguir:

- **Alta qualidade:** Refere-se a sistemas capazes de navegar e sentir as mudanças de orientações com excelente precisão por longo tempo de duração (tipicamente horas) somente com a IMU (ZANONI, 2012).
- **Média Qualidade:** Requer o auxílio de sensores externos para manter a capacidade oferecida pelos sistemas de alta qualidade. Sistemas de média qualidade conseguem operar durante curtos períodos de duração (tipicamente minutos) somente com a IMU (ZANONI, 2012).
- **Baixa qualidade:** Requer sensores externos para proporcionar um desempenho útil e são capazes de operar somente num curtíssimo intervalo de tempo (tipicamente segundos) utilizando apenas a IMU (ZANONI, 2012).

Como forma de ilustrar as qualidades das IMUs, foi extraída de Brown e Hwang (1997). A tabela 4.1 que indica o valor máximo de erro medido por qualidade de sensor e por tipos de erros.

Tabela B. 1: Classificação de IMUs através dos valores máximos de erro medido.

Parâmetros do Sensor	Alta Qualidade	Média Qualidade	Baixa Qualidade
Máximo erro de viés/bias para o giroscópio [$^{\circ}/h$]	$< 0,01$	$0,1 - 1,0$	10
Random Walk do giroscópio [$\sqrt{^{\circ}/h}$]	3×10^{-4}	0,01	$>0,01$
Máximo erro de viés/bias para o acelerômetro [μg^*]	10 - 50	200 - 500	>1000
Random Walk do acelerômetro [$\mu g^* / \sqrt{Hz}$]	3 - 10	50	>50

* ' g ' Representa a gravidade local em [m/s^2]

A IMU instalada no AUV Pirajuba esta classificada na categoria de baixa qualidade, por possuir erros maximos de bias entorno de $10^{\circ}/h$.

B.4. SISTEMAS ACÚSTICOS DE POSICIONAMENTO

Um dos problemas mais comuns encontrados nos AUVs é a maneira de como realizar a localização e posicionamento desses veículos, já que uma vez submerso, um

sistema de localização global baseado num sistema de satélites (GPS) torna-se impossível, pois debaixo d'água as ondas eletromagnéticas geradas por este, têm dificuldades em se propagarem.

Desta forma, para suprir a necessidade de posicionar e localizar o AUV, foram desenvolvidos equipamentos que utilizam redes acústicas (baselines) para realizar de forma eficaz a medição de posição com a referência debaixo d'água.

As redes acústicas utilizam basicamente dois tipos de sensores para fazer o posicionamento do veículo, um chamado de “farol acústico” e outro de “alvo”, onde um fica posicionado em um ponto conhecido e o outro fica situado no veículo, respectivamente.

Para saber a distância entre um alvo e um dos faróis acústicos, o alvo envia um sinal acústico e espera pela resposta do farol. Sabendo que o farol demora sempre o mesmo tempo para responder aos sinais, este é considerado e pode ser retirado do tempo total, desde o envio até receber a resposta do farol. Desta forma, o tempo de ida e volta do sinal, é dividido por dois e fornece o tempo que o sinal demora entre o veículo e o farol. Pode-se então agora com este dado e com a velocidade do som na água, calcular a distância entre o alvo e o farol.

$$d = v \cdot \Delta t \quad (\text{B.2})$$

Antes de se realizarem as missões deve-se levar em conta que as medidas de posicionamento dependem da velocidade do som na água, que por sua vez, depende das características do meio ambiente (temperatura, salinidade e pressão), com isso é necessário realizar um breve estudo sobre as condições da água no local. Tal estudo pode ser feito através da utilização de um sensor CTD que mede determinadas características da água (condutividade, temperatura e profundidade) ou pode-se também utilizar como comparação um GPS posicionado na superfície na mesma posição dos sensores acústicos e verificar se as distâncias entre os sensores conferem entre si.

Os principais sistemas de posicionamento acústico utilizados para veículos submersíveis são:

- Linha de base longa (LBL)
- Linha de base curta (SBL)
- Linha de base ultracurta (USBL)

Esta classificação é baseada no comprimento de suas linhas de base, como indicado na tabela B.2.

Tabela B. 2: Classificação dos sensores acústicos (ZANONI, 2012).

Sistema de Posicionamento	Distância entre os Transdutores da Linha de Base	Dados obtidos na Medição
LBL [m]	50 - 6000	Somente posicionamento
SBL [m]	10 - 50	Posicionamento e possível direção
USBL [m]	< 0,1	Posição e direção

Há também outro tipo de sistema de posicionamento conhecido por Sistemas de Boias Inteligentes com GPS (GIB), desencadeado pelo crescimento do uso de GPS na maioria dos setores de pesquisa e industriais.

Segue abaixo a descrição de cada tipo de sistema de posicionamento acústico.

B.4.1. Sistemas de Linhas de Base Longa

Utilizando como base o trabalho de (ZANONI, 2012), o sistema LBL realiza os cálculos de posicionamento do veículo através de “transponders” situados em posições bem conhecidas relativas ao fundo oceânico, onde são ajustados com frequências de resposta diferentes entre si, pois quando o alvo enviar o sinal de posicionamento, este possa distinguir as diferentes referências dos “transponders”.

O alvo por sua vez, registra o momento de envio e de resposta do sinal de interrogação enviado aos “transponders”. Tendo em vista que a velocidade de movimentação desempenhada pelo veículo é bastante inferior à velocidade de propagação do som na água, ou até mesmo que o veículo esteja parado a metade do tempo compreendido entre os dois instantes registrados corresponde à duração da propagação da onda sonora entre o alvo e os “transponders”.

Como as distâncias entre os transponders e suas posições são conhecidas, é possível estimar a posição em que o alvo se encontra. Efetuando dois ciclos de interrogação/resposta entre o alvo e os transponders submersos, é possível determinar a posição do alvo.

As vantagens ao se utilizar o sistema de posicionamento do tipo LBL são (ZANONI, 2012):

- Fornece com boa exatidão a posição do veículo independente de sua profundidade.
- Redundância na observação.

- Pode fornecer uma boa exatidão, mesmo em grandes áreas.
- Utiliza um único e pequeno transdutor no veículo.

As desvantagens ao se utilizar o sistema de posicionamento do tipo LBL são (ZANONI, 2012):

- Como este sistema é complexo, há a necessidade de utilizar pessoas especializadas para poder operá-lo.
- Equipamento de custo elevado.
- Equipamento com alto custo de tempo para montá-lo e posterior recuperação.
- Sistemas convencionais deste modelo exigem calibração toda vez, antes de utilizá-lo.

B.4.2. Sistemas de Linhas de Base Curta

O sistema SBL diferentemente do sistema LBL, posicionam três ou mais transdutores no fundo de veículos ou boias de superfície, sendo que esses transdutores podem receber ou enviar as ondas sonoras de comunicação. Desta forma, é possível fazer a localização e o posicionamento do submersível nos próprios veículos de superfície ou em estações base. A precisão deste tipo de sensor é influenciada pela distância entre os transdutores de superfície, sendo que quanto mais longe eles estiverem entre si maior será a exatidão da medição, podendo ficar próxima da precisão do LBL.

As vantagens ao se utilizar o sistema de posicionamento do tipo SBL são (ZANONI, 2012):

- Fácil utilização deste sistema, pois sua complexidade é pequena;
- Boa exatidão;
- A base do sistema se localiza no navio, não há necessidade de posicionar os transdutores no fundo do oceano;
- Possível redundância no sistema;
- Transdutores de pequeno porte.

As desvantagens ao se utilizar o sistema de posicionamento do tipo SBL são (ZANONI, 2012):

- O sistema necessita de uma linha de base grande para serem utilizados em águas profundas (profundidades maiores que quarenta metros);
- Sistemas convencionais deste modelo exigem uma calibração da estrutura em que os “transponders” são fixados;

- Calibração do sistema de linha de base é necessária, mas geralmente não é realizada com rigor;
- O posicionamento absoluto depende de sensores adicionais, barco com giroscópio e com uma unidade de referência vertical.

B.4.3. Sistemas de Linhas de Base Ultra Curta

O sistema de posicionamento via USBL é o sistema mais adequado a se instalar em veículos cujas dimensões são pequenas, pois os sensores acústicos encontram-se agregados entre si de forma compacta, onde recebem o nome de agregado USBL. Este sistema funciona através da comunicação dos sensores embarcados no submersível e outro sistema de “transponders” fixos em uma embarcação flutuante na qual emitirá o sinal acústico (“ping”).

Como os sensores estão montados próximos uns dos outros e distanciados de no máximo 10 cm entre si, o USBL não utiliza os tempos de percurso alvo-agregado para determinar as posições, ao invés disso, o sistema detecta a diferença de fase medida nos receptores do sinal acústico emitido pelo “transponder” fixo à superfície.

Esta diferença de fase relaciona-se matematicamente com a direção do “transponder” emissor relativamente ao agregado. Combinando a direção a que o “transponder” emissor se encontra com a distância entre emissor – agregado e com a profundidade do agregado (ou ambas), é possível determinar a posição do alvo relativamente à embarcação flutuante.

As vantagens ao se utilizar o sistema de posicionamento do tipo USBL são (ZANONI, 2012):

- Fácil utilização deste sistema, pois sua complexidade é pequena.
- Não necessita de transponder no fundo do mar.
- Somente um único transponder fica localizado na superfície.
- Boa exatidão.

As desvantagens ao se utilizar o sistema de posicionamento do tipo USBL são (ZANONI, 2012):

- Precisa de uma rigorosa calibração que nem sempre é realizada por completo.
- O posicionamento absoluto depende de outros sensores como giroscópio e uma unidade de referência vertical (profundímetro).
- Possui mínima redundância.
- O sistema requer um alto grau de alinhamento entre os transponders.

B.4.4. Boias Inteligentes com GPS

Esse tipo de sistema de posicionamento subaquático é a solução mais recente em relação aos sistemas acústicos anteriores. Este método de posicionamento utiliza um equipamento portátil instalado em boias na superfície, que são interligadas entre si e medem a duração da propagação de sinais acústicos emitidos por um transmissor acoplado a um alvo submerso.

Neste sistema, as posições das boias são bem conhecidas e há um transmissor que está sincronizado com um relógio do GPS, que registram os momentos de emissão do sinal.

Cada uma das boias registra e transmite para uma estação de controle os instantes de recepção dos sinais, onde na estação dado que se conheçam os momentos das emissões dos sinais, determinam-se a duração da propagação destes, o que possibilita o cálculo da posição do alvo.

Figura B. 2: Sistemas de posicionamento acústico (ALCOCER et al., 2006).

O AUV Pirajuba por sua vez, utiliza o sensor do tipo USBL para realizar o seu posicionamento quando este realiza missões em ambiente marinho.

B.5. Transdutor

O transdutor é um dispositivo que transforma um tipo de energia em outro, utilizando um elemento sensor. Em geral um transdutor é um dispositivo que recebe um sinal e o retransmite, independentemente de conversão de energia.

Como exemplo, o transdutor pode receber um sinal não elétrico (velocidade, posição, temperatura, pH) e transformá-lo enviando um sinal elétrico (corrente, tensão, resistência).

Um tipo curioso de transdutor é elaborado a partir de cristais naturais denominados cristais “piezelétricos”. Estes transduzem energia elétrica em energia mecânica na relação de 1:1 (um sinal elétrico para um sinal mecânico). Existem dois tipos de transdutores, sendo eles:

- **Transdutores passivos:** são aqueles cuja energia de saída é proveniente unicamente (ou quase unicamente) da energia de entrada.

- **Transdutores ativos:** são aqueles que dispõem de uma alimentação de energia. Neles, a maior parte da energia de saída é provida pela alimentação.

B.6. Transponder

O “transponder” (abreviação de Transmitter-responder) é um dispositivo de comunicação eletrônico complementar de automação e cujo objetivo é receber, amplificar e retransmitir um sinal em uma frequência diferente ou transmitir de uma fonte uma mensagem pré-determinada em resposta a outra pré-definida “de outra fonte”.

B.7. Profundímetro

O profundímetro é um sensor que mede a profundidade do veículo através da pressão que a água exerce sobre ele. Deste modo, para obter a profundidade do sistema, é necessário fazer a seguinte conversão:

$$h = \frac{P}{\rho g} \quad (\text{B.3})$$

onde:

- h é a profundidade;
- P é a pressão d'água;
- ρ é a massa específica da água;
- g é a aceleração da gravidade.

B.8. SENSOR DE VELOCIDADE POR EFEITO DOPPLER (DVL)

O sensor de velocidade Doppler Velocity Log (DVL) é o equipamento mais utilizado para realizar a medição de velocidade em veículos submersíveis. O DVL por utilizar o efeito Doppler, onde através desse efeito o sensor fornece a velocidade do veículo em relação ao fluido ou em relação ao fundo do oceano, é um equipamento de alta precisão que fornece a velocidade do veículo nos três eixos de orientação (X,Y,Z), e sua altitude em relação ao fundo do oceano. Na figura 4.3 há uma imagem ilustrativa do DVL.

Figura B. 3: Foto demonstrativa do DVL.

É conhecido como efeito Doppler quando há uma emissão de uma onda entre dois objetos que estão se movimentando de forma relativa entre si, e essa onda ao atingir esses objetos sofre consequentemente uma alteração em seu comprimento de onda e em sua frequência. O comprimento de onda observado após sua reflexão pode ser maior ou menor dependendo se a fonte se afasta ou se aproxima do observador. No caso de aproximação, a frequência aparente da onda recebida pelo observador fica maior que a frequência emitida, o contrário ocorre no caso de afastamento, a frequência aparente diminui. Da física clássica tem-se a seguinte equação:

$$f = \left(\frac{v + v_r}{v + v_s} \right) f_0 \quad (\text{B.4})$$

onde:

- v_r é a velocidade do gerador da onda em relação ao meio;
- v_s é a velocidade do observador da onda em relação ao meio;
- v é a velocidade da onda no meio;
- f_0 é a frequência original da onda emitida pelo emissor;
- f é a frequência refletida obtida pelo receptor.

Existe também no DVL um processo chamado de “PING”. O ping é descrito como o processo em que um eco advindo da dispersão randômica ou dos fluxos de partículas que estão submersos no fluido, carregam a informação para o DVL que por sua vez envia um pequeno pulso de som com frequência fixa na água, onde este ouve os seus ecos vindos do fluido e do fundo oceânico.

Desta forma, é possível que o sensor calcule a velocidade ao longo deste feixe sonoro. Geralmente um ping pode estar entre 0,2 e 3 segundos, dependendo do modelo do DVL e da altura em que o veículo se encontra com relação ao fundo.

As principais características do Sensor Doppler (DVL) são (ZANONI, 2012):

- Alta exatidão e desempenho
- Permite navegar próximo do fundo, devido à robustez.
- Pode ser utilizado em altas profundidades, até 6000 metros.
- Boa integração com os sistemas de posicionamento do modelo acústico de linha de base.

B.9. SENSOR DE ATITUDE

Para a observação da atitude (orientação do veículo) pode-se utilizar uma bússola, que fornece tanto as variações de leitura de campo magnético quanto os ângulos de roll, pitch e yaw, como os sensores inerciais (IMU), ou até mesmo os inclinômetros, porém estes só fornecem os ângulos de roll e pitch.

Entretanto, um dos maiores problemas ao se utilizarem as bússolas, é que estas sofrem influências bastante significativas em suas medições provenientes de campos magnéticos. Esses campos magnéticos podem ser formados através de equipamentos eletrônicos, elétricos e metais ferro magnéticos que estejam embarcados no veículo.

Os inclinômetros por sua vez, não são suscetíveis a campos eletromagnéticos, porém como mencionado anteriormente se limitam apenas aos movimentos de roll e pitch e também sofrem grandes influências em relação às acelerações do corpo em que ele se encontra.

Como alternativa as soluções anteriores, o AUV Pirajuba utiliza o próprio sensor Doppler de velocidade (DVL) para estimar a atitude do veículo por meio das frequências das ondas acústicas como descrito na seção anterior.

Apêndice C

C. Gráficos Utilizados Nos Procedimentos de Identificação da Modelagem Dinâmica do AUV Pirajuba.

C.1 Gráficos: Manobra de Giro em ambiente marinho – plano horizontal.

Os principais sensores utilizados na navegação de AUVs incluem sistemas inerciais, bússolas magnéticas, inclinômetros, sensor de atitude, profundímetros, velocímetros Doppler, sonar e sistemas acústicos de posicionamento. Os sensores citados anteriormente são especificados no decorrer desta seção.

Figura C. 1: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme.

Figura C. 2: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme.

Figura C. 3: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme.

Figura C. 4: Execução da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme.

Figura C. 5: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme e K e T médios a 5 graus.

Figura C. 6: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme e K e T médios a 5 graus.

Figura C. 7: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme e K e T médios a 5 graus.

Figura C. 8: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme e K e T médios a 5 graus.

Figura C. 9: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme e K e T médios a 10 graus.

Figura C. 10: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme e K e T médios a 10 graus.

Figura C. 11: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme e K e T médios a 10 graus.

Figura C. 12: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme e K e T médios a 10 graus.

Figura C. 13: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme e K e T médios a 15 graus.

Figura C. 14: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme e K e T médios a 15 graus.

Figura C. 15: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme e K e T médios a 15 graus.

Figura C. 16: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme e K e T médios a 15 graus.

Figura C. 17: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme e K e T médios a 20 graus.

Figura C. 18: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme e K e T médios a 20 graus.

Figura C. 19: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme e K e T médios a 20 graus.

Figura C. 20: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme e K e T médios a 20 graus.

Figura C. 21: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 5 graus.

Figura C. 22: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 10 graus.

Figura C. 23: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 15 graus.

Figura C. 24: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 20 graus.

C.2. Gráficos: Manobra de Giro em ambiente marinho a 2 m/s – plano horizontal.

Figura C. 25: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 5 graus.

Figura C. 26: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 5 graus.

Figura C. 27: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 5 graus.

Figura C. 28: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 5 graus.

Figura C. 29: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 10 graus.

Figura C. 30: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 10 graus.

Figura C. 31: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 10 graus.

Figura C. 32: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 10 graus.

Figura C. 33: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 15 graus.

Figura C. 34: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 15 graus.

Figura C. 35: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 15 graus.

Figura C. 36: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 15 graus.

Figura C. 37: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 20 graus.

Figura C. 38: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 20 graus.

Figura C. 39: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 20 graus.

Figura C. 40: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme, e para os valores de K e T obtidos a 20 graus.

Figura C. 41: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme, e para os valores de K e T médios.

Figura C. 42: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme, e para os valores de K e T médios.

Figura C. 43: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme, e para os valores de K e T médios.

Figura C. 44: Simulação da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme, e para os valores de K e T médios.

Figura C. 45: Gráfico da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 5 graus de leme a 2 m/s, para validação das estimativas.

Figura C. 46: Gráfico da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 10 graus de leme a 2 m/s, para validação das estimativas.

Figura C. 47: Gráfico da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 15 graus de leme a 2 m/s, para validação das estimativas.

Figura C. 48: Gráfico da manobra de giro do AUV Pirajuba em ambiente marinho, para 20 graus de leme a 2 m/s, para validação das estimativas.

Figura C. 49: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 5 graus e para entrada de 5 graus de leme.

Figura C. 50: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 5 graus e para entrada de 10 graus de leme.

Figura C. 51: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 5 graus e para entrada de 15 graus de leme.

Figura C. 52: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 5 graus e para entrada de 20 graus de leme.

Figura C. 53: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 10 graus e para entrada de 5 graus de leme.

Figura C. 54: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 10 graus e para entrada de 10 graus de leme.

Figura C. 55: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 10 graus e para entrada de 15 graus de leme.

Figura C. 56: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 10 graus e para entrada de 20 graus de leme.

Figura C. 57: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 15 graus e para entrada de 5 graus de leme.

Figura C. 58: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 15 graus e para entrada de 10 graus de leme.

Figura C. 59: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 15 graus e para entrada de 15 graus de leme.

Figura C. 60: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 15 graus e para entrada de 20 graus de leme.

Figura C. 61: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 20 graus e para entrada de 5 graus de leme.

Figura C. 62: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 20 graus e para entrada de 10 graus de leme.

Figura C. 63: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 20 graus e para entrada de 15 graus de leme.

Figura C. 64: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T estimados a 20 graus e para entrada de 20 graus de leme.

Figura C. 65: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T médios e para entrada de 5 graus de leme.

Figura C. 66: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T médios e para entrada de 10 graus de leme.

Figura C. 67: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T médios e para entrada de 15 graus de leme.

Figura C. 68: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para K e T médios e para entrada de 20 graus de leme.

Figura C. 69: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 5 graus.

Figura C. 70: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 10 graus.

Figura C. 71: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 15 graus.

Figura C. 72: Gráfico de roll e pitch para a manobra de Giro em ambiente marinho, a 20 graus.

C.3. Gráficos: Identificação no plano horizontal – filtros lineares – Métodos Estocásticos

- Estimativa ARX – Gerada através de zig-zag 5-5 – $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_k = 1$;

$$FT_{ARX} = \frac{\dot{\Psi}(s)}{\Delta(s)} = \frac{1.244s + 7.993}{s^2 + 5.428s + 9.68}$$

Figura C. 73: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARX.

Figura C. 74: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARX.

Figura C. 75: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARX.

Figura C. 76: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARX.

- Estimativa ARX - Gerada através de zig-zag 15-15 – $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_k = 1$;

$$FT_{ARX} = \frac{\dot{\Psi}(s)}{\Delta(s)} = \frac{1.646s + 8.897}{s^2 + 9.403s + 12.23}$$

Figura C. 77: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARX.

Figura C. 78: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARX.

Figura C. 79: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARX.

Figura C. 80: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARX.

- Estimativa ARIMAX – $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_k = 1$;

$$FT_{ARIMAX} = \frac{\Psi(s)}{\Delta(s)} = \frac{-0.1589s^2 - 1.303s + 89.62}{s^2 + 68.85s + 116.5}$$

Figura C. 81: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARIMAX.

Figura C. 82: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARIMAX.

Figura C. 83: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARIMAX.

Figura C. 84: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARIMAX.

- Estimativa BJ - $nb = 2$; $nc = 2$; $nd = 2$; $nf = 2$; $nk = 1$;

$$FT_{BJ} = \frac{\dot{\Psi}(s)}{\Delta(s)} = \frac{1.453s + 0.9584}{s^2 + 1.941s + 1.608}$$

Figura C. 85: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ.

Figura C. 86: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura BJ.

Figura C. 87: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura BJ.

Figura C. 88: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura BJ.

- Estimativa - BJ NOISE - nb = 2; nc = 2; nd = 2; nf = 2; nk = 1;

$$FT_{BJN} = \frac{\dot{\Psi}(s)}{\Delta(s)} = \frac{-0.1804s^2 - 0.6415s + 84.98}{s^2 + 68.29s + 119.5}$$

Figura C. 89: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ Noise.

Figura C. 90: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura BJ Noise.

Figura C. 91: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura BJ Noise.

Figura C. 92: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ Noise.

C.4. Gráficos: Identificação no plano horizontal – filtros lineares com Processamento em Paralelo

- Estimativa ARIX – Gerada através de zig-zag 5, 10, 15 e 20 – $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_k = 1$;

$$FT_{ARIX} = \frac{\Psi(s)}{\Delta(s)} = \frac{-0.08969s^2 - 0.896s + 53.79}{s^2 + 47.6s + 95.39}$$

Figura C. 93: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARIX - Paralelo.

Figura C. 94: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARIX - Paralelo.

Figura C. 95: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARIX - Paralelo.

Figura C. 96: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARIX - Paralelo.

- Estimativa ARX - IV – Gerada através de zig-zag 10, 15 e 20 – $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_k = 1$;

$$FT_{ARX_{IV}} = \frac{\dot{\Psi}(s)}{\Delta(s)} = \frac{0.001101 s^4 - 9.599 s^3 + 192.9 s^2 - 3875 s + 7.696e04}{s^4 + 88.19 s^3 + 2239 s^2 + 3.532e04 s + 9.535e04}$$

Figura C. 97: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARX – IV - Paralelo.

Figura C. 98: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARX – IV - Paralelo.

Figura C. 99: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARX – IV - Paralelo.

Figura C. 100: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARX – IV - Paralelo.

- Estimativa ARIMAX – Gerada através de zig-zag 5 – $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_k = 1$;

$$FT_{ARIMAX} = \frac{\Psi(s)}{\Delta(s)} = \frac{-0.1139 s^2 + 0.8036 s + 29.48}{s^2 + 27.51 s + 35.82}$$

Figura C. 101: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.

Figura C. 102: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.

Figura C. 103: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.

Figura C. 104: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.

- Estimativa ARIMAX – Gerada através de zig-zag 5 – $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_c = 4$; $n_k = 1$;

$$FT_{ARIMAX} = \frac{\Psi(s)}{\Delta(s)} = \frac{1.692 s^3 + 33.58 s^2 + 548.6 s + 1547}{s^4 + 10.05 s^3 + 476.7 s^2 + 1247 s + 2027}$$

Figura C. 105: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.

Figura C. 106: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.

Figura C. 107: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.

Figura C. 108: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura ARIMAX - Paralelo.

- Estimativa BJ – Gerada através de zig-zag 5 – $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_d = 2$; $n_f = 2$; $n_k = 1$;

$$FT_{BJ} = \frac{\dot{\Psi}(s)}{\Delta(s)} = \frac{1.389 s + 0.9569}{s^2 + 1.908 s + 1.573}$$

Figura C. 109: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ - Paralelo.

Figura C. 110: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura BJ - Paralelo.

Figura C. 111: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura BJ- Paralelo.

Figura C. 112: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura BJ- Paralelo.

- Estimativa BJ – Gerada através de zig-zag 5 – nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 1;

$$FT_{BJ} = \frac{\dot{\Psi}(s)}{\Delta(s)} = \frac{1.773 s^3 + 26.52 s^2 + 517.1 s + 731.8}{s^4 + 8.489 s^3 + 442.2 s^2 + 837.2 s + 1045}$$

Figura C. 113: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ- Paralelo.

Figura C. 114: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura BJ- Paralelo.

Figura C. 115: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura BJ- Paralelo.

Figura C. 116: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura BJ- Paralelo.

- Estimativa BJ Noise – Gerada através de zig-zag 5 – nb = 2; nc = 2; nd = 2; nf = 2; nk = 1;

$$FT_{BJ_NOISE} = \frac{\Psi(s)}{\Delta(s)} = \frac{-0.1708 s^2 + 0.2918 s + 62.47}{s^2 + 55.61 s + 78.79}$$

Figura C. 117: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ Noise- Paralelo.

Figura C. 118: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.

Figura C. 119: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.

Figura C. 120: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.

- Estimativa BJ Noise – Gerada através de zig-zag 5 – nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 1;

$$FT_{BJ} = \frac{\dot{\Psi}(s)}{\Delta(s)} = \frac{1.809 s^3 + 26.01 s^2 + 512.8 s + 727}{s^4 + 8.412 s^3 + 434.8 s^2 + 825.5 s + 1035}$$

Figura C. 121: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.

Figura C. 122: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.

Figura C. 123: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.

Figura C. 124: Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme na estrutura BJ Noise - Paralelo.

C.5. Gráficos: Manobra Pulso vertical – Identificação ângulo de Pitch

- Método ARX ordem 3 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 3$; $n_b = 3$; $n_k = 2$;

$$FT_{ARX_3} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.008653s^3 - 0.4432s^2 + 9.67s + 53.11}{s^3 + 46.53s^2 + 51.87s + 22.48} e^{-0.1s}$$

Figura C. 125: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX de ordem 3 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 126: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX de ordem 3 e a curva real de Pulso.

- Método ARX ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_k = 2$;

$$FT_{ARX_4} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.03323s^4 + 0.2503s^3 - 11.29s^2 + 340.6s + 1017}{s^4 + 73.98s^3 + 1008s^2 + 1065s + 432.5} e^{-0.1s}$$

Figura C. 127: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX de ordem 4 e a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 128: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método ARIMAX ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_k = 2$;

$$FT_{ARIMAX_2} = \frac{\theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.3056 s + 2.401}{s^2 + 2.594 s + 0.8521} e^{-0.1s}$$

Figura C. 129: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 130: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método ARIMAX ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_c = 4$; $n_k = 2$;

$$FT_{ARIMAX_4} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.08783 s^3 + 24.72 s^2 + 62.12 s + 3212}{s^4 + 20.04 s^3 + 695.4 s^2 + 3381s + 789.7} e^{-0.1s}$$

Figura C. 131: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 132: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método BJ ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 2; nc = 2; nd = 2; nf = 2; nk = 2;

$$FT_{BJ-2} = \frac{\theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.3346s + 2.417}{s^2 + 2.568s + 0.7375} e^{-0.1s}$$

Figura C. 133: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 134: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método BJ ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 2;

$$FT_{BJ-4} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.01425 s^4 - 0.8653 s^3 + 12.43 s^2 + 142s + 1389}{s^4 + 69.72s^3 + 646.2 s^2 + 1458s + 358.3} e^{-0.1s}$$

Figura C. 135: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 136: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método BJ- Noise ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 2; nc = 2; nd = 2; nf = 2; nk = 2;

$$FT_{BJN_2} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.05099s + 3.849}{s^2 + 4s + 1.008} e^{-0.1s}$$

Figura C. 137: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 138: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método BJ- Noise ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 2;

$$FT_{BJN_4} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.4852 s^3 + 4.305 s^2 + 74.49 s + 750.2}{s^4 + 6.075 s^3 + 297.1 s^2 + 786.9 s + 218.3} e^{-0.1s}$$

Figura C. 139: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 140: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise de ordem 4 e a curva real de Pulso.

C.6. Gráficos: Identificação utilizando manobra de Pulso com processamento em paralelo

- Método ARX - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_k = 2$;

$$FT_{ARX_P_2} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.1105s + 2.368}{s^2 + 2.445s + 0.8009} e^{-0.1s}$$

Figura C. 141: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX Paralelo de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 142: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX - Paralelo de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método ARX- IV - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_k = 2$;

O método de identificação ARX – IV descrito abaixo é uma variação particular e muito semelhante ao método ARX tradicional, onde este utiliza uma combinação de matrizes de forma distinta da ARX para estimar os parâmetros da equação. Mais detalhes sobre esse método podem ser vistos e definidos em (LJUNG, 1999).

$$FT_{ARX_{IV_P_2}} = \frac{\theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.1404s + 1.644}{s^2 + 1.732s + 0.6538} e^{-0.1s}$$

Figura C. 143: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX_IV - Paralelo de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 144: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX_IV - Paralelo de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método ARX - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_k = 2$;

$$FT_{ARXP_4} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.02196s^4 - 0.4661s^3 + 2.434s^2 + 227.2s + 1724}{s^4 + 69.5s^3 + 1122s^2 + 1836s + 710} e^{-0.1s}$$

Figura C. 145: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX - Paralelo de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 146: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX - Paralelo de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método ARMAX - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_k = 2$;

$$FT_{ARMAX_P_2} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.1479s + 1.738}{s^2 + 1.711s + 0.7294} e^{-0.1s}$$

Figura C. 147: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX - Paralelo de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 148: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX - Paralelo de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método ARIMAX - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS -Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_c = 4$; $n_k = 2$;

$$FT_{ARIMAX_P_4} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.2986 s^3 + 2.395 s^2 + 13.02 s + 50.01}{s^4 + 7.679 s^3 + 24.63 s^2 + 58.49 s + 3.053e^{-11}} e^{-0.1s}$$

Figura C. 149: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX - Paralelo de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 150: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX - Paralelo de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método BJ - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_d = 2$; $n_f = 2$; $n_k = 2$;

$$FT_{BJ_P_2} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.1739s + 2.091}{s^2 + 2.209s + 0.7583} e^{-0.1s}$$

Figura C. 151: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ - Paralelo de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 152: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ - Paralelo de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método BJ - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_b = 4$; $n_c = 4$; $n_d = 4$; $n_f = 4$; $n_k = 2$;

$$FT_{BJ_P_4} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.03365s^4 - 1.702s^3 + 32.81s^2 + 175s + 2376}{s^4 + 164s^3 + 873.4s^2 + 2552s + 561.9} e^{-0.1s}$$

Figura C. 153: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ - Paralelo de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 154: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ - Paralelo de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método BJ-Noise - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_d = 2$; $n_f = 2$; $n_k = 2$;

$$FT_{BJN_P_2} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.06925 s + 2.612}{s^2 + 2.752 s + 0.7326} e^{-0.1s}$$

Figura C. 155: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise - Paralelo de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 3.

Figura C. 156: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise - Paralelo de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método BJ-Noise - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 2;

$$FT_{BJN_P_4} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.1474s^3 + 4.744s^2 + 71.62s + 1403}{s^4 + 2.92s^3 + 468.7s^2 + 1317s + 315.3} e^{-0.1s}$$

Figura C. 157: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise - Paralelo de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 3.

Figura C. 158: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ-Noise - Paralelo de ordem 4 e a curva real de Pulso.

C.7. Gráficos: Manobra PRBS plano vertical – Identificação Ângulo de Pitch

- Método PRBS - ARX ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_k = 1$;

$$FT_{PRBS_ARX_2} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.04939 s + 1.177}{s^2 + 1.188 s + 0.5305}$$

Figura C. 159: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 160: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARX de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS - ARMAX ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_k = 1$;

$$FT_{PRBS_ARMAX_2} = \frac{\theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.06542 s + 1.341}{s^2 + 1.521 s + 0.5284}$$

Figura C. 161: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARMAX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 162: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS - ARIMAX ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_k = 2$;

$$FT_{PRBS_ARIMAX_2} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.3501s + 9.429}{s^2 + 14.68s + 2.58} e^{-0.1s}$$

Figura C. 163: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 164: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS - ARIMAX ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_c = 4$; $n_k = 1$

$$FT_{PRBS_ARIMAX_4} = \frac{\theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.3151 s^3 + 9.552 s^2 + 19.25 s + 1617}{s^4 + 30.2 s^3 + 700.1 s^2 + 1779 s + 479.8}$$

Figura C. 165: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 3.

Figura C. 166: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS - BJ ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_d = 2$; $n_f = 2$; $n_k = 2$

$$FT_{PRBS_BJ_2} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.2285s + 2.156}{s^2 + 2.272s + 0.6487} e^{-0.1s}$$

Figura C. 167: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 4.

Figura C. 168: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS - BJ ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 2

$$FT_{PRBS_BJ_4} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.2731 s^3 + 5.223 s^2 + 135.6 s + 1624}{s^4 + 3.192 s^3 + 634 s^2 + 1680 s + 453.6} e^{-0.1s}$$

Figura C. 169: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 170: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ-Noise ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_d = 2$; $n_f = 2$; $n_k = 1$

$$FT_{PRBS_BJN_2} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.07598s + 1.766}{s^2 + 1.824s + 0.5801}$$

Figura C. 171: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ-Noise de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 3.

Figura C. 172: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ-Noise de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ-Noise ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_b = 4$; $n_c = 4$; $n_d = 4$; $n_f = 4$; $n_k = 1$;

$$FT_{PRBS_BJN_4} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.01957 s^3 + 7.196 s^2 + 45.61 s + 1483}{s^4 + 10.36 s^3 + 706.4 s^2 + 1531 s + 404.9}$$

Figura C. 173: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ-Noise de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 3.

Figura C. 174: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ-Noise de ordem 4 e a curva real de Pulso.

C.8. Gráficos: Identificação utilizando manobra de PRBS com processamento em paralelo

- Método PRBS - ARX - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_k = 2$;

$$FT_{PRBS_Par_ARX_2} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.1384 s + 1.888}{s^2 + 2.011 s + 0.6406} e^{-0.1s}$$

Figura C. 175: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 3.

Figura C. 176: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARX de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – ARIX-IV - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_k = 2$;

O Método ARIX-IV é semelhante ao ARX com integração da variável externa, utilizando a equação de estimação particular IV, como indicada anteriormente no item 4.3.2.2.

$$FT_{PRBS_Par_ARIX_4} = \frac{\theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.1781 s^3 + 0.7473 s^2 + 79.55 s + 881.7}{s^4 + 5.492 s^3 + 522.2 s^2 + 1034 s + 452.3} e^{-0.1s}$$

Figura C. 177: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARIX de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 3.

Figura C. 178: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARIX de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – ARMAX - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_k = 1$;

$$FT_{PRBS_Par_ARMAX_2} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.06524 s + 1.095}{s^2 + 1.187 s + 0.5411}$$

Figura C. 179: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARMAX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 180: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – ARIMAX - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_k = 2$;

$$FT_{PRBS_Par_ARIMAX_2} = \frac{\theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.1157 s + 6.152}{s^2 + 9.545 s + 1.865} e^{-0.1s}$$

Figura C. 181: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARIMAX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 3.

Figura C. 182: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARIMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – ARIMAX - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_c = 4$; $n_k = 2$;

$$FT_{PRBS_Par_ARIMAX_4} = \frac{\theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.3419 s^3 + 6.46 s^2 + 64.68 s + 298.7}{s^4 + 24.01 s^3 + 157.3 s^2 + 316.1 s + 84.72} e^{-0.1s}$$

Figura C. 183: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARIMAX de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 184: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: nb = 2; nc = 2; nd = 2; nf = 2; nk = 2;

$$FT_{PRBS_Par_BJ_2} = \frac{\theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.1536 s + 2.329}{s^2 + 2.403 s + 0.7204} e^{-0.1s}$$

Figura C. 185: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 3.

Figura C. 186: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 2;

$$FT_{PRBS_Par_BJ_4} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.2175 s^3 + 4.744 s^2 + 117.7 s + 1700}{s^4 + 3.348 s^3 + 636 s^2 + 1725 s + 455.7} e^{-0.1s}$$

Figura C. 187: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 188: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS-Ordem do sistema: $n_b = 4$; $n_c = 4$; $n_d = 4$; $n_f = 4$; $n_k = 2$;

$$FT_{PRBS_Par_BJ2_4} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.3018 s^3 + 5.85 s^2 + 126.2 s + 1541}{s^4 + 5.895 s^3 + 640.4 s^2 + 1561 s + 413.7} e^{-0.1s}$$

Figura C. 189: Comparação entre a curva estimada por outra combinação de PRBS - Paralelo pelo método BJ de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 3.

Figura C. 190: Comparação entre a curva estimada por outra combinação de PRBS - Paralelo pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ-Noise - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: nb = 2; nc = 2; nd = 2; nf = 2; nk = 2;

$$FT_{PRBS_Par_BJN_2} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.1558 s + 2.328}{s^2 + 2.405 s + 0.698} e^{-0.1s}$$

Figura C. 191: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ-Noise de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 3.

Figura C. 192: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ-Noise de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ-Noise - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 2;

$$F_{T_{PRBS_Par_BJN_4}} = \frac{\Theta(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.04132 s^4 - 0.7256 s^3 + 3.739 s^2 + 322.8 s + 4464}{s^4 + 105.2 s^3 + 1882 s^2 + 4604 s + 1212} e^{-0.1s}$$

Figura C. 193: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ-Noise de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 1.

Figura C. 194: Comparação entre a curva estimada por PRBS - Paralelo pelo método BJ-Noise de ordem 4 e a curva real de Pulso.

C.9. Gráficos: plano vertical – Identificação Taxa de Profundidade

- Método ARIX ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_k = 2$;

$$FT_{p_ARIX_2} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.06165 s - 3.059}{s^2 + 3.963 s + 143.1} e^{-0.2s}$$

Figura C. 195: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIX de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 196: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIX de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método ARX ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_k = 2$;

$$FT_{p_ARX_4} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.03006 s^4 - 0.7107 s^3 - 63.72 s^2 + 1555 s - 4735}{s^4 + 148.3 s^3 + 3521 s^2 + 9.855e04 s + 2.233e05} e^{-0.2s}$$

Figura C. 197: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 198: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método ARMAX ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema:
na = 2; nb = 2; nc = 2; nk = 1;

$$FT_{p_ARMAX_2} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.1157 s^2 + 2.472 s - 3.148}{s^2 + 187.7 s + 99.65} e^{-0.1s}$$

Figura C. 199: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 200: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método ARIMAX ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema:
na = 4; nb = 4; nc = 4; nk = 3;

$$FT_{p_ARIMAX_4} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.878 s^4 + 181.6 s^3 - 5754 s^2 + 3.83e04 s - 5.71e04}{s^4 + 4306 s^3 + 1.85e05 s^2 + 1.67e06 s + 1.99e06} e^{-0.2s}$$

Figura C. 201: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 202: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método BJ ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 2; nc = 2; nd = 2; nf = 2; nk = 1;

$$FT_{p_{BJ,2}} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.1157 s^2 + 2.472 s - 3.148}{s^2 + 187.7 s + 99.65}$$

Figura C. 203: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real PRBS-manobra 1.

Figura C. 204: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método BJ ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 1;

$$FT_{p_{BJ-4}} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.8776 s^4 - 0.2962 s^3 - 4.207 s^2 + 41.72 s - 112.5}{s^4 + 449.65 s^3 + 254.3 s^2 + 7347 s + 1652}$$

Figura C. 205: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real PRBS-manobra 1.

Figura C. 206: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método BJ Noise ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema:
nb = 2; nc = 2; nd = 2; nf = 2; nk = 1;

$$FT_{p_{BJ_Noise_2}} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.0005809 s - 0.0576}{s^2 + 3.692 s + 0.6342}$$

Figura C. 207: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 208: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método BJ Noise ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema:
nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 3;

$$FT_{p_BJ_Noise_4} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.8776 s^4 - 0.2962 s^3 - 4.207 s^2 + 41.72 s - 112.5}{s^4 + 449.65 s^3 + 254.3 s^2 + 7347 s + 1652}$$

Figura C. 209: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 210: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 4 e a curva real de Pulso.

C.10. Gráficos: Identificação utilizando Pulso com processamento em paralelo para taxa de profundidade

- Método ARX – IV ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_k = 3$;

$$FT_{p_ARX_IV_2_p} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.1614 s^2 + 3.854 s - 12.52}{s^2 + 677.6 s + 203} e^{-0.2s}$$

Figura C. 211: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX – IV de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 212: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX - IV de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método ARX – IV ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_k = 3$;

$$FT_{p_ARX_IV_4_p} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.279 s^4 + 13.62 s^3 - 374.7 s^2 + 4729 s - 9045}{s^4 + 533.8 s^3 + 2277 s^2 + 4.609e05 s + 1.427e05} e^{-0.2s}$$

Figura C. 213: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX – IV de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 214: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX - IV de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método ARMAX - ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_k = 1$;

$$FT_{p_ARMAX_2-p} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.01544 s^2 + 0.3322 s - 0.4661}{s^2 + 24.8 s + 9.098}$$

Figura C. 215: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 216: Comparação entre a curva estimada pelo método ARMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método ARIMAX ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema:
na = 4; nb = 4; nc = 4; nk = 3;

$$FT_{p_ARIMAX_4_p} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.480 s^4 + 47.35 s^3 - 982.1 s^2 + 5609 s - 2.12e04}{s^4 + 2904 s^3 + 9.92e04 s^2 + 1.09e06 s + 3.26e05} e^{-0.2s}$$

Figura C. 217: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 218: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método BJ- ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 2; nc = 2; nd = 2; nd = 2; nk = 3;

$$FT_{p_{BJ_2_p}} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.06243 s - 0.1684}{s^2 + 7.664 s + 2.683}$$

Figura C. 219: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real PRBS-manobra 1.

Figura C. 220: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método BJ ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 4; nc = 4; nd = 4; nd = 4; nk = 2;

$$FT_{p_{BJ_4_p}} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.112 s^4 + 8.974 s^3 - 905.8 s^2 + 1.53e04 s - 3.28e04}{s^4 + 4205 s^3 + 9400 s^2 + 1.572e06 s + 4.774e05} e^{-0.1s}$$

Figura C. 221: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real PRBS-manobra 1.

Figura C. 222: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método BJ Noise- ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_d = 2$; $n_e = 2$; $n_k = 3$;

$$FT_{p_{BJ_Noise_2_p}} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.06243 s - 0.1684}{s^2 + 7.664 s + 2.683}$$

Figura C. 223: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real PRBS-manobra 1.

Figura C. 224: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método BJ Noise ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema:
nb = 4; nc = 4; nd = 4; nd = 4; nk = 3;

$$FT_{p_{BJ_Noise-4_p}} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.79 s^4 + 14.22 s^3 - 442.1 s^2 + 1.13e04 s - 3.76e04}{s^4 + 4181s^3 + 4095s^2 + 1.99e06s + 5.35e05} e^{-0.2s}$$

Figura C. 225: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real PRBS-manobra 1.

Figura C. 226: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.

C.11. Gráficos: Identificação utilizando PRBS com processamento em paralelo para taxa de profundidade

- Método PRBS – ARX-IV ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_k = 2$;

$$FT_{p_PRBS_ARX_IV_2} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.03778s - 0.07725}{s^2 + 5.506s + 2.163} e^{-0.1s}$$

Figura C. 227: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARX-IV de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 228: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARX-IV de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – ARX-IV ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_k = 3$;

$$\begin{aligned}
 FT_{p_PRBS_ARX_IV_4} &= \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} \\
 &= \frac{0.0424 s^4 + 7.923 s^3 - 67.94 s^2 + 1577 s - 8464}{s^5 + 20.67 s^4 + 1588 s^3 + 1.16e04 s^2 + 5.07e05 s + 2.03e05} e^{-0.2s}
 \end{aligned}$$

Figura C. 229: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARX-IV de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 230: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARX-IV de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – ARIMAX ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_k = 3$;

$$FT_{p_PRBS_ARIMAX_2} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.00566 s^2 + 2.072 s - 19.61}{s^3 + 21.83 s^2 + 1109 s + 301.2} e^{-0.2s}$$

Figura C. 231: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 232: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – ARIMAX ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_c = 4$ $n_k = 3$;

$$\begin{aligned}
 FT_{p_PRBS_ARIMAX_4} &= \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} \\
 &= \frac{-0.3295s^4 + 2.059s^3 - 230.1s^2 + 857.6s - 7889}{s^5 + 29.88s^4 + 1608s^3 + 2.62e04s^2 + 4.50e05s + 1.32e05} e^{-0.2s}
 \end{aligned}$$

Figura C. 233: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 234: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 2; nc = 2; nd = 2; nf = 2; nk = 1;

$$FT_{p_PRBS_BJ_2} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.004289 s - 0.04726}{s^2 + 2.863 s + 0.8055}$$

Figura C. 235: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 236: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 3;

$$FT_{p_PRBS_BJ_4} = \frac{\dot{\Delta}_s(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.125 s^3 + 0.2696 s^2 - 1.646 s - 0.4822}{s^4 + 11.07 s^3 + 93.51 s^2 + 56.69 s + 10.72} e^{-0.2s}$$

Figura C. 237: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 238: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ Noise ordem 2 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 2; nc = 2; nd = 2; nf = 2; nk = 3;

$$FT_{p_PRBS_BJ_Noise_2} = \frac{\dot{\Delta}_s(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.07055 s - 2.585}{s^2 + 2.316 s + 534.6} e^{-0.2s}$$

Figura C. 239: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ Noise de ordem 2 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 240: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ Noise de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ Noise ordem 4 – Validação Pulso e PRBS - Ordem do sistema: nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 3;

$$FT_{p_PRBS_BJ_Noise_4} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.1428 s^3 - 3.322 s^2 + 3.162 s - 66.24}{s^4 + 10.35 s^3 + 549.1 s^2 + 3560 s + 980} e^{-0.2s}$$

Figura C. 241: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ Noise de ordem 4 a curva real PRBS - manobra 2.

Figura C. 242: Comparação entre a curva estimada por PRBS pelo método BJ Noise de ordem 4 e a curva real de Pulso.

7.1.1.1.

C.12. Gráficos: Identificação utilizando PRBS com processamento em paralelo para taxa de profundidade

- Método PRBS – ARX-IV - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_k = 2$;

$$FT_{p_ARX_IV_2.p} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.0113 s^2 + 0.7672 s - 11.9}{s^3 + 2.351 s^2 + 988.5 s + 162.8} e^{-0.1s}$$

Figura C. 243: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX – IV de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 244: Comparação entre a curva estimada pelo método ARX - IV de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – ARIX-IV - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_k = 3$;

$$\begin{aligned}
 FT_{p_ARIX_IV_4_p} &= \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} \\
 &= \frac{0.2268 s^4 + 10.17 s^3 + 55.48 s^2 + 64.71 s - 1.007e04}{s^5 + 36.88 s^4 + 1935 s^3 + 2.327e04 s^2 + 6.768e05 s + 1.499e05} e^{-0.2s}
 \end{aligned}$$

Figura C. 245: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIX – IV de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 246: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIX - IV de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – ARIMAX - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: $n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_c = 2$; $n_k = 2$;

$$FT_{p_ARIMAX_2_p} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.03467s^2 + 4.937s - 19.55}{s^3 + 22.51s^2 + 1116s + 285.3} e^{-0.1s}$$

Figura C. 247: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 248: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – ARIMAX - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: $n_a = 4$; $n_b = 4$; $n_c = 4$; $n_k = 3$;

$$\begin{aligned}
 FT_{p_ARIMAX_4_p} &= \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} \\
 &= \frac{-0.5318 s^4 + 3.075 s^3 - 388 s^2 + 933.8 s - 8041}{s^5 + 29.07 s^4 + 1644 s^3 + 2.41e04 s^2 + 4.53e05 s + 1.21e05} e^{-0.2s}
 \end{aligned}$$

Figura C. 249: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 250: Comparação entre a curva estimada pelo método ARIMAX de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: nb = 2; nc = 2; nd = 2; nf = 2; nk = 1;

$$FT_{p_{BJ-2-p}} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.004282 s - 0.04557}{s^2 + 2.685 s + 0.7416}$$

Figura C. 251: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real PRBS-manobra 1.

Figura C. 252: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 1;

$$FT_{p_{BJ-4.p}} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.1225 s^4 + 3.54 s^3 - 121.2 s^2 + 2404 s - 8138}{s^5 + 6.897 s^4 + 1486 s^3 + 4793 s^2 + 4.791e05 s + 1.125e05}$$

Figura C. 253: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real PRBS-manobra 1.

Figura C. 254: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ de ordem 4 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ Noise - Paralelo ordem 2 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: nb = 2; nc = 2; nd = 2; nf = 2; nk = 3;

$$FT_{p_BJ_Noise_2_p} = \frac{\dot{d}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{0.03514 s - 1.601}{s^2 + 1.958 s + 515.2} e^{-0.2s}$$

Figura C. 255: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 2 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 256: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 2 e a curva real de Pulso.

- Método PRBS – BJ Noise - Paralelo ordem 4 – Validação Pulso e PRBS -
Ordem do sistema: nb = 4; nc = 4; nd = 4; nf = 4; nk = 3;

$$FT_{p_BJ_Noise_4_p} = \frac{\dot{\Delta}(s)}{\Delta_s(s)} = \frac{-0.00212 s^4 + 0.243 s^3 - 17.12 s^2 + 306.1 s - 883.5}{s^4 - 5.78 s^3 + 1753 s^2 + 4.60e04 s + 1.26e04}$$

Figura C. 257: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 4 e a curva real PRBS- manobra 1.

Figura C. 258: Comparação entre a curva estimada pelo método BJ Noise de ordem 4 e a curva real de Pulso.

Para validar os dados obtidos pelas manobras tanto no plano horizontal quanto no vertical foram obtidos de forma desacoplada entre os planos, foi verificado a variação da velocidade de avanço durante a execução das manobras nos dois planos e a influência das entradas de Pulso e PRBS no ângulo de Yaw, da mesma forma que analisado para os ângulos de roll e pitch nos casos das manobras de zig-zag e giro. Desta forma:

Figura C. 259: Comportamento do ângulo e da taxa de Yaw durante a execução de uma manobra de Pulso 10 graus.

Figura C. 260: Comportamento do ângulo e da taxa de Yaw durante a execução de uma manobra de PRBS.

Figura C. 261: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de zigzag 5 graus.

Figura C. 262: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de zigzag 10 graus.

Figura C. 263: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de zigzag 15 graus.

Figura C. 264: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de zigzag 20 graus.

Figura C. 265: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de Giro 5 graus.

Figura C. 266: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de Giro 10 graus.

Figura C. 267: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de Giro 15 graus.

Figura C. 268: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de Giro 20 graus.

Figura C. 269: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de Pulso 5 graus.

Figura C. 270: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de Pulso 10 graus.

Figura C. 271: Comportamento da velocidade de avanço durante a execução de uma manobra de PRBS.

Figura C. 272: Análise das velocidades de rotação nos eixos x,y e z, durante um zig-zag de 5 graus.

Figura C. 273: Análise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um zig-zag de 10 graus.

Figura C. 274: Análise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um zig-zag de 15 graus.

Figura C. 275: Análise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um zig-zag de 20 graus.

Figura C. 276: Análise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um Giro de 5 graus.

Figura C. 277: Análise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um Giro de 10 graus.

Figura C. 278: Análise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um Giro de 15 graus.

Figura C. 279: Análise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante um Giro de 20 graus.

Figura C. 280: Análise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante uma manobra de Pulso de 5 graus.

Figura C. 281: Análise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante uma manobra de Pulso de 10 graus.

Figura C. 282: Análise das velocidades de rotação nos eixos x, y e z, durante uma manobra de PRBS.

Figura C. 283: Análise dos ângulos de pitch e roll durante a manobra de Pulso de 10 graus.

Figura C. 284: Análise dos ângulos de pitch e roll durante a manobra de PRBS.

ANEXO A

A.1.1. Forças e momentos gerados pela massa adicional

Considerando a matriz de massa adicional (sem perda de generalidade) possuindo 21 derivadas hidrodinâmicas distintas. As forças e momentos provenientes da massa adicional podem ser derivadas aplicando a teoria do potencial. Esse método é baseado assumindo que o fluido é viscoso, sem circulação e que o corpo do veículo esteja completamente submerso em um fluido sem barreiras ou limites. A expressão da energia cinética em função das massas adicionais é dada por:

$$\begin{aligned}
 T_A = \frac{1}{2} & (-X_{\dot{u}}u^2 - Y_{\dot{v}}v^2 - Z_{\dot{\omega}}\omega^2 - 2Y_{\dot{\omega}}v\omega - 2X_{\dot{\omega}}\omega u - 2Y_{\dot{v}}uv \\
 & -K_{\dot{p}}p^2 - M_{\dot{q}}q^2 - N_{\dot{r}}r^2 - 2M_{\dot{r}}qr - 2K_{\dot{r}}rp - 2K_{\dot{q}}pq \\
 & -2p(X_{\dot{p}}u + Y_{\dot{p}}v + Z_{\dot{p}}\omega) \\
 & -2p(X_{\dot{p}}u + Y_{\dot{p}}v + Z_{\dot{p}}\omega) \\
 & -2q(X_{\dot{q}}u + Y_{\dot{q}}v + Z_{\dot{q}}\omega) \\
 & -2r(X_{\dot{r}}u + Y_{\dot{r}}v + Z_{\dot{r}}\omega))
 \end{aligned}
 \tag{A.1}$$

A derivação das forças e momentos gerados pela massa adicional é usualmente feito através da lei de Kirchhoff (Kirchhoff, 1869) que simplifica a relação entre as forças e os momentos atuantes no veículo. Considerando a lei de Kirchhoff em relação a força e o momento:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_A}{\partial u} = r \frac{\partial T_A}{\partial v} - q \frac{\partial T_A}{\partial \omega} - X_A \tag{A.2a}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_A}{\partial v} = p \frac{\partial T_A}{\partial \omega} - r \frac{\partial T_A}{\partial u} - Y_A \tag{A.2b}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_A}{\partial \omega} = q \frac{\partial T_A}{\partial u} - p \frac{\partial T_A}{\partial v} - Z_A \tag{A.2c}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_A}{\partial p} = \omega \frac{\partial T_A}{\partial v} - v \frac{\partial T_A}{\partial \omega} + r \frac{\partial T_A}{\partial q} - q \frac{\partial T_A}{\partial r} - K_A \tag{A.3a}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_A}{\partial q} = u \frac{\partial T_A}{\partial \omega} - \omega \frac{\partial T_A}{\partial u} + p \frac{\partial T_A}{\partial r} - r \frac{\partial T_A}{\partial q} - M_A \tag{A.3b}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_A}{\partial r} = v \frac{\partial T_A}{\partial u} - u \frac{\partial T_A}{\partial v} + q \frac{\partial T_A}{\partial p} - p \frac{\partial T_A}{\partial q} - N_A \tag{A.3c}$$

Substituindo a equação A.2 em A.3, resulta nas equações com os termos da massa adicional:

$$\begin{aligned}
X_A &= X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{\dot{w}}(\dot{w} + uq) + X_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{\dot{w}}wq + Z_{\dot{q}}q^2 \\
&\quad + X_{\dot{v}}\dot{v} + X_{\dot{p}}\dot{p} + X_{\dot{r}}\dot{r} - Y_{\dot{v}}vr - Y_{\dot{p}}rp - Y_{\dot{r}}r^2 \\
&\quad - X_{\dot{u}}ur - Y_{\dot{w}}wr \\
&\quad + Y_{\dot{w}}vq + Z_{\dot{p}}pq - (Y_{\dot{q}} - Z_{\dot{r}})qr \\
Y_A &= X_{\dot{v}}\dot{u} + Y_{\dot{w}}\dot{w} + Y_{\dot{q}}\dot{q} \\
&\quad + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{p}}\dot{p} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + X_{\dot{v}}vr - Y_{\dot{w}}vp + X_{\dot{r}}r^2 + (X_{\dot{p}} - Z_{\dot{r}})rp - Z_{\dot{p}}p^2 \\
&\quad - X_{\dot{w}}(up - wr) + X_{\dot{u}}ur - Z_{\dot{w}}wp \\
&\quad - Z_{\dot{q}}pq + X_{\dot{q}}qr \\
Z_A &= X_{\dot{w}}(\dot{u} - wq) + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} - X_{\dot{u}}uq - X_{\dot{q}}q^2 \\
&\quad + Y_{\dot{w}}\dot{v} + Z_{\dot{p}}\dot{p} + Z_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{\dot{v}}vp + Y_{\dot{r}}rp + Y_{\dot{p}}p^2 \\
&\quad + X_{\dot{v}}up + Y_{\dot{w}}wp \\
&\quad - X_{\dot{v}}vq - (X_{\dot{p}} - Y_{\dot{q}})pq - X_{\dot{r}}qr \\
K_A &= X_{\dot{p}}\dot{u} + Z_{\dot{p}}\dot{w} + K_{\dot{q}}\dot{q} - X_{\dot{v}}wu + X_{\dot{r}}uq - Y_{\dot{w}}w^2 - (Y_{\dot{q}} - Z_{\dot{r}})wq + M_{\dot{r}}q^2 \\
&\quad + Y_{\dot{p}}\dot{v} + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{\dot{w}}v^2 - (Y_{\dot{q}} - Z_{\dot{r}})vr + Z_{\dot{p}}vp - M_{\dot{r}}r^2 - K_{\dot{q}}rp \\
&\quad + X_{\dot{w}}uv - (Y_{\dot{v}} - Z_{\dot{w}})vw - (Y_{\dot{r}} + Z_{\dot{q}})wr - Y_{\dot{p}}wp - X_{\dot{q}}ur \\
&\quad + (Y_{\dot{r}} + Z_{\dot{q}})vq + K_{\dot{r}}pq - (M_{\dot{q}} - N_{\dot{r}})qr \\
M_A &= X_{\dot{q}}(\dot{u} + wq) + Z_{\dot{q}}(\dot{w} - uq) + M_{\dot{q}}\dot{q} - X_{\dot{w}}(u^2 - w^2) - (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})wu \\
&\quad + Y_{\dot{q}}\dot{v} + K_{\dot{q}}\dot{p} + M_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{\dot{p}}vr - Y_{\dot{r}}vp - K_{\dot{r}}(p^2 - r^2) + (K_{\dot{p}} - N_{\dot{r}})rp \\
&\quad - Y_{\dot{w}}uv + X_{\dot{v}}vw - (X_{\dot{r}} + Z_{\dot{p}})(up - wr) + (X_{\dot{p}} - Z_{\dot{r}})(wp + ur) \\
&\quad - M_{\dot{r}}pq + K_{\dot{q}}qr \\
N_A &= X_{\dot{r}}\dot{u} + Z_{\dot{r}}\dot{w} + M_{\dot{r}}\dot{q} + X_{\dot{v}}u^2 + Y_{\dot{w}}wu - (X_{\dot{p}} - Y_{\dot{q}})uq - Z_{\dot{p}}wq - K_{\dot{q}}q^2 \\
&\quad + Y_{\dot{r}}\dot{v} + K_{\dot{r}}\dot{p} + N_{\dot{r}}\dot{r} - X_{\dot{v}}v^2 - X_{\dot{r}}vr - (X_{\dot{p}} - Y_{\dot{q}})vp + M_{\dot{r}}rp + K_{\dot{q}}p^2 \\
&\quad - (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})uv - X_{\dot{w}}vw + (X_{\dot{q}} + Y_{\dot{p}})up + Y_{\dot{r}}ur + Z_{\dot{q}}wp \\
&\quad - (X_{\dot{q}} + Y_{\dot{p}})vq - (K_{\dot{p}} - M_{\dot{q}})pq - K_{\dot{r}}qr
\end{aligned}$$

(A.4)

Imlay (1961) rearranjou as equações em 4 linhas, a primeira linha esta disposta em relação a componente longitudinal, na segunda linha disposta na componente lateral, a terceira linha é uma mescla entre u ou w. No caso de um ou dos dois componentes de velocidade forem grande o bastante para ser tratada como constante a terceira linha pode ser tratada como um termo adicional do movimento no plano lateral. A quarta linha é composta por uma mescla de componentes que são geralmente negligenciáveis como termos de segunda ordem.

Anexo B

B.1.1 Adimensionalização das equações de movimento

Uma dada equação ou propriedade física será adimensionalizada considerando os termos dimensionais em função da massa, comprimento e tempo como unidades fundamentais, e dividindo a massa por $\frac{1}{2}\rho l^3$, o comprimento por l , e o tempo por l/U . Por exemplo, as dimensões de $\partial M/\partial q$ são: massa X (Comprimento)² X (Tempo)⁻¹. Logo,

$$\frac{\partial M}{\partial q} \frac{1}{\frac{1}{2}\rho l^3} \frac{1}{l^2} \frac{l}{U} = \frac{\partial M}{\partial q} \frac{1}{\frac{1}{2}\rho l^4 U}$$

é a correspondente equação adimensionalizada. A forma adimensional de uma dada propriedade física será indicada pelo termo principal dessa propriedade, a menos que explicitamente definido de forma contrária a esta. Então:

$$m' = \frac{m}{\frac{1}{2}\rho l^3}, t' = \frac{tU}{l}, I_z' = \frac{I_z}{\frac{1}{2}\rho l^5}, x_0' = \frac{x_0}{l}$$

Quando a análise de estabilidade é completamente expressa na forma adimensional, os principais termos podem ser omitidos, desde que seja declarada como tal.