

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE SISTEMAS DINÂMICOS E ENERGÉTICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROJETO DE CONTROLE DE ALOCAÇÃO TOLERANTE  
A FALTAS PARA UM VEÍCULO AUTÔNOMO  
SUBAQUÁTICO UTILIZANDO LÓGICA NEBULOSA**

DAISY ISABEL KANG CARDOZO

FOZ DO IGUAÇU  
2013



Daisy Isabel Kang Cardozo

**Projeto de Controle de Alocação Tolerante a Faltas para um Veículo Autônomo Subaquático utilizando Lógica Nebulosa**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos.

Orientador: Carlos Henrique Farias Dos Santos

Co-orientador: Edson Roberto de Pieri

Foz do Iguaçu  
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca do Campus de Foz do Iguaçu - Unioeste  
Ficha catalográfica elaborada por Miriam Fenner R. Lucas - CRB-9/268

C268 Cardozo, Daisy Isabel Kang  
Projeto de controle de alocação tolerante a faltas para um veículo autônomo subaquático utilizando lógica nebulosa/Daisy Isabel Kang Cardozo. - Foz do Iguaçu, 2013.  
117p.:il:tab.:graf.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Farias dos Santos.

Co-orientadora: Prof. Dr. Edson Roberto de Pieri.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

1. Engenharia - Projeto de controle de alocação. 2. Lógica nebulosa (Fuzzy logic). 3. Veículos subaquáticos.I. Título.

CDU 62-52  
510.22  
629.124

# **Projeto de Controle de Alocação Tolerante a Faltas para um Veículo Autônomo Subaquático utilizando Lógica Nebulosa**

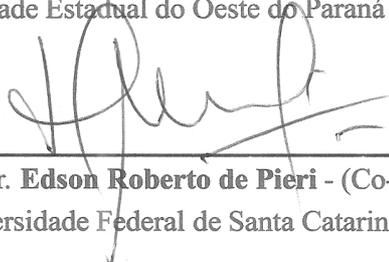
Daisy Isabel Kang Cardozo

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos e aprovada pela Banca Examinadora:

Data da defesa pública: 29/11/2013.



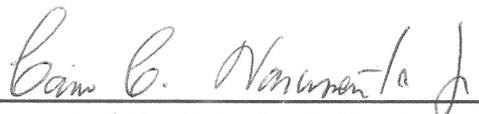
Prof. Dr. **Carlos Henrique Farias Dos Santos** - (Orientador)  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



Prof. Dr. **Edson Roberto de Pieri** - (Co-orientador)  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC



Prof. Dr. **Romeu Reginatto**  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



Prof. Dr. **Cairo Lúcio Nascimento Junior**  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA



# Resumo

Em sistemas críticos como aeronaves, naves espaciais, veículos subaquáticos, usinas nucleares entre outros, as consequências da falha ou falta de um componente pode ser catastrófica. Portanto, considerar a possibilidade de desempenho degradado por causa de falhas ou faltas em algum dos componentes é um requisito inerente desses sistemas. Este trabalho apresenta um controle tolerante a faltas do sistema de propulsão de um Veículo Autônomo Subaquático, denominado BA-1, utilizando um controle de alocação nebuloso. Esta metodologia aproveita as vantagens da redundância dos propulsores, comum em veículos autônomos, para realocar as forças de propulsão em situações de falta. Assim, este controle realiza uma reconfiguração *on line* da matriz de alocação de forças dos propulsores utilizada no método da pseudo inversa. Esta proposta foi testada para todos os possíveis casos de falta horizontal do BA-1 mediante simulações numéricas. Foram utilizados dois estudos de casos para uma trajetória reta no eixo  $x$ ; o primeiro quando o veículo inicia a sua trajetória com falta nos propulsores, e o segundo quando o veículo sofre faltas nos propulsores na sua velocidade máxima de navegação. Os resultados obtidos mostram que o veículo tem um comportamento aceitável em todas as situações excetuando quando o veículo sofre de falta dos propulsores paralelos ao eixo  $x$  na sua máxima velocidade, porém poderia ser solucionado modificando a trajetória desejada na ocorrência dessa falta. Contudo o modelo desenvolvido apresenta rapidez nas respostas e desempenho degradado aceitável.

**Palavras-chave:** Lógica nebulosa, Controle de alocação, Veículos subaquáticos.

# Abstract

In critical systems such as airplanes, space ships, underwater vehicles, nuclear power plants, among others, failures and faults can bring catastrophic consequences. Therefore, it is required to take into account possibilities of degradation in the performance of its components. This work presents a fault-tolerant control for the propulsion system of the BA-1, an Autonomous Underwater Vehicle (AUV), by using a Fuzzy Allocation Control. This methodology takes advantage of thrusters redundancy, common in autonomous vehicles, to relocate the available thrusters forces in failure situations. That is, it performs an on line reconfiguration of the thruster force allocation matrix in the pseudo inverse method. This approach was tested for all the possible cases of horizontal failure of the BA-1 vehicle by means of numerical simulations. Two cases were studied for each failure situation over a linear trajectory in the  $x$  axis; the first one studies the case where failures occurs when the vehicle starts its trajectory; and the second one studies the case where the vehicle suffers failures while travelling in its maximum speed. The studies show that the vehicle has an acceptable behavior on most situations, except when it suffers failures of two thrusters which are parallel to the  $x$  axis when travelling at maximum speed. However that problem could be solved if the reference trajectory is modified after the failure occurs. In all, the control system developed presents quick responses and an acceptable degradation of performance.

**Keywords:** Fuzzy logic, Control allocation , Underwater vehicles.

Dedico este trabalho  
a minha querida avó Isabel.



# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, porque tudo o que eu tenho e sou eu devo a Ele.

Agradeço a Nossa Senhora por não permitir que me afaste de seu filho amado, e pela força e coragem que me deu nos meus momentos de ansiedade e de insegurança.

Ao meu pai pelo carinho, paciência e o apoio incondicional; pela colaboração durante o processo de pesquisa e pelo incentivo que me deu ao longo do trabalho.

Agradeço a minha mãe pela paciência, pelo estímulo constante e por todas as orações que fez em meu favor.

Agradeço ao meu irmão pelo carinho e motivação de sempre.

Ao Prof. Dr. Carlos Henrique Farias Dos Santos, que me orientou durante a pesquisa, agradeço pela paciência, dedicação e pelos conhecimentos que me transmitiu durante a realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Edson Roberto de Pieri, Dr. Romeu Reginatto e Dr. Cairo Lúcio Nascimento Junior, membros da banca examinadora, pelas valiosas sugestões e comentários realizados.

Agradeço a todos meus colegas do PGESDE e do GPR que fizeram muito mais agradável esta longa jornada.

Aos colegas e amigos Larissa Andreia Wagner Machado e Antonio Carlos Bana Chiella, pela colaboração durante a escrita e pelos conselhos ao longo da pesquisa.

Agradeço a todos os professores e funcionários do PGESDE, em particular à profa. Dra. Huei Diana Lee pelo estímulo e motivação.

Agradeço às autoridades da Universidad Nacional del Este - Facultad Politécnica, especialmente aos professores MADE. Lidia Benítez de Pérez, Msc. Eustaquio Alcides Martínez Jara, com quem pude trabalhar desde a graduação; e Ing. Gabriela Bobadilla pela confiança e apoio.

E finalmente, à Fundação Parque Tecnológico Itaipu - FPTI BR pela bolsa de pesquisa, e à Fundação Parque Tecnológico Itaipu - FPTI PY pela bolsa de transporte concedida durante o tempo da pesquisa.



"Je sais bien que je ne serai jamais digne de ce que j'espère,  
mais je vous tends la main comme une petite mendiante et  
je suis sûre que vous m'exaucerez pleinement, car vous êtes si bon!"  
Thérèse de l'Enfant-Jésus et de la Sainte-Face



# Sumário

|   |              |
|---|--------------|
| <b>Lista de Figuras</b>   | <b>xvi</b>   |
| <b>Lista de Tabelas</b>   | <b>xxi</b>   |
| <b>Lista de Símbolos</b>  | <b>xxiii</b> |
| <b>1 Introdução</b>   | <b>1</b>     |
| 1.1 Motivação . . . . .   | 2            |
| 1.2 Justificativa do uso do Controle Nebuloso . . . . .                       | 3            |
| 1.3 Revisão Bibliográfica Relevante do Controle de Alocação em UUVs . . . . . | 4            |
| 1.3.1 Caso Estudado por Podder et al . . . . .                                | 4            |
| 1.3.2 Caso Estudado por Sarkar et al . . . . .                                | 4            |
| 1.3.3 Caso Estudado por Choi et al . . . . .                                  | 4            |
| 1.3.4 Caso Estudado por Fossen . . . . .                                      | 5            |
| 1.3.5 Caso Estudado por Corradini et al . . . . .                             | 5            |
| 1.3.6 Caso Estudado por Soylu et al . . . . .                                 | 5            |
| 1.4 Apresentação do Problema . . . . .  | 5            |
| 1.5 Objetivo . . . . .  | 6            |
| 1.6 Metodologia . . . . .   | 6            |
| 1.6.1 Primeira Fase . . . . .   | 7            |
| 1.6.2 Segunda Fase . . . . .  | 7            |
| 1.6.3 Terceira Fase . . . . .   | 7            |
| 1.7 Estrutura Geral do Trabalho . . . . .                                     | 7            |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>2</b> | <b>Modelagem Matemática do Veículo</b>                               | <b>9</b>  |
| 2.1      | Sistemas de Coordenadas . . . . .                                    | 9         |
| 2.2      | Modelagem Cinemática . . . . .                                       | 10        |
| 2.3      | Modelagem Dinâmica . . . . .   | 13        |
| 2.3.1    | Dinâmica do Corpo Rígido . . . . .                                   | 13        |
| 2.3.2    | Forças e Momentos Hidrodinâmicos . . . . .                           | 14        |
| 2.3.3    | Distúrbios Ambientais . . . . .                                      | 16        |
| 2.4      | Modelagem dos Propulsores . . . . .                                  | 17        |
| 2.4.1    | Esforços de Propulsão . . . . .                                      | 17        |
| 2.4.2    | Dinâmica do Atuador . . . . .  | 18        |
| 2.4.3    | Formulação da Matriz de Propulsão . . . . .                          | 19        |
| <b>3</b> | <b>Controle Tolerante a Falhas</b>                                   | <b>21</b> |
| 3.1      | Faltas e Falhas . . . . .  | 21        |
| 3.2      | Conceitos Básicos sobre Controle Tolerante a <i>Falhas</i> . . . . . | 22        |
| 3.3      | Arquiteturas do Sistema de FTC Ativo . . . . .                       | 24        |
| 3.4      | Diagnóstico e Detecção de <i>Falhas</i> . . . . .                    | 25        |
| 3.5      | Conceito de Controle de Alocação . . . . .                           | 26        |
| 3.5.1    | Técnicas de Controle de Alocação . . . . .                           | 28        |
| <b>4</b> | <b>Lógica Nebulosa e Controladores Nebulosos</b>                     | <b>31</b> |
| 4.1      | Conceitos da Lógica Nebulosa . . . . .                               | 31        |
| 4.2      | Função de Pertinência . . . . .                                      | 33        |
| 4.2.1    | Função de Pertinência Triangular . . . . .                           | 33        |
| 4.2.2    | Função de Pertinência Trapezoidal . . . . .                          | 33        |
| 4.2.3    | Função de Pertinência Sigmoidal . . . . .                            | 34        |
| 4.3      | Operações Básicas de Conjuntos . . . . .                             | 34        |
| 4.4      | Controle Nebuloso . . . . .  | 35        |
| 4.4.1    | Nebulização . . . . .  | 35        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.4.2    | Base de Regras . . . . .                                       | 35        |
| 4.4.3    | Sistema de Inferência . . . . .                                | 36        |
| 4.4.4    | Concentração . . . . .   | 37        |
| 4.4.5    | Tipos de Controladores Nebulosos . . . . .                     | 38        |
| <b>5</b> | <b>Fundamentos do Projeto de Controle</b>                      | <b>39</b> |
| 5.1      | Veículo Subaquático Utilizado . . . . .                        | 39        |
| 5.2      | Configuração dos Propulsores . . . . .                         | 40        |
| 5.3      | Problema de Controle de Alocação do BA-1 . . . . .             | 43        |
| 5.4      | Análise das situações de falta de propulsores . . . . .        | 44        |
| 5.4.1    | Caso 1 - Falta de um Propulsor . . . . .                       | 45        |
| 5.4.2    | Caso 2 - Falta de dois Propulsores . . . . .                   | 45        |
| <b>6</b> | <b>Proposta de Controle Nebuloso de Propulsores</b>            | <b>49</b> |
| 6.1      | Estrutura Geral do Controle . . . . .                          | 49        |
| 6.2      | Estrutura do Controle de Alocação Tolerante a Falhas . . . . . | 50        |
| 6.3      | Controle Nebuloso . . . . .                                    | 50        |
| 6.3.1    | Regras Nebulosas . . . . .                                     | 51        |
| 6.4      | Definição das Regras Nebulosas . . . . .                       | 52        |
| 6.5      | Regras no Caso 1 . . . . .                                     | 53        |
| 6.5.1    | Falta no P1 . . . . .  | 53        |
| 6.5.2    | Falta no P2 . . . . .  | 54        |
| 6.5.3    | Falta no P3 . . . . .  | 54        |
| 6.5.4    | Falta no P4 . . . . .  | 55        |
| 6.6      | Regras no Caso 2 . . . . .                                     | 55        |
| 6.7      | Conclusões . . . . .   | 58        |
| <b>7</b> | <b>Implementação e Análise dos Resultados</b>                  | <b>61</b> |
| 7.1      | Parâmetros de Simulação . . . . .                              | 63        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 7.2      | Simulações do Caso 1 . . . . .                               | 63         |
| 7.2.1    | Falta no P1 ou no P2 . . . . .                               | 63         |
| 7.2.2    | Falta no P3 ou no P4 . . . . .                               | 69         |
| 7.3      | Simulações do Caso 2 . . . . .                               | 74         |
| 7.3.1    | Falta nos propulsores P1 e P2 . . . . .                      | 74         |
| 7.3.2    | Falta nos propulsores P3 e P4 . . . . .                      | 79         |
| 7.3.3    | Falta nos propulsores P1 e P3 . . . . .                      | 83         |
| 7.3.4    | Falta nos propulsores P1 e P4 . . . . .                      | 88         |
| 7.3.5    | Falta nos propulsores P2 e P3 . . . . .                      | 92         |
| 7.3.6    | Falta nos propulsores P2 e P4 . . . . .                      | 97         |
| 7.4      | Conclusões . . . . .   | 101        |
| <b>8</b> | <b>Considerações Finais</b>                                  | <b>103</b> |
| 8.1      | Conclusão . . . . .  | 103        |
| 8.2      | Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .                   | 104        |
|          | <b>Referências Bibliográficas</b>                            | <b>106</b> |
| <b>A</b> | <b>LEI DE CONTROLE</b>                                       | <b>111</b> |
| A.1      | Controle por Realimentação Linearizante . . . . .            | 111        |
| A.1.1    | Controle PID (Proporcional, integral e derivativo) . . . . . | 112        |
| <b>B</b> | <b>VISÃO GERAL DO SIMULADOR DE VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS</b>     | <b>115</b> |
| B.1      | Parâmetros de simulação . . . . .                            | 117        |

# Lista de Figuras

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Referenciais do veículo. . . . .   | 10 |
| 3.1 | Estrutura geral de um FTC Ativo. . . . .   | 23 |
| 3.2 | Estrutura geral de um FTC Passivo. . . . .                                       | 24 |
| 3.3 | Estrutura padrão de controle de malha fechada de um AUV . . . . .                | 24 |
| 3.4 | Controle de um AUV com com FDD e mecanismos de reconfiguração. . . . .           | 25 |
| 3.5 | Método de alocação conexão em cadeia. . . . .                                    | 30 |
| 4.1 | Conjunto <i>crisp</i> temperatura. . . . .                                       | 32 |
| 4.2 | Conjunto nebuloso da temperatura. . . . .  | 32 |
| 4.3 | Função de pertinência triangular. . . . .  | 33 |
| 4.4 | Função de pertinência trapezoidal. . . . .                                       | 34 |
| 4.5 | Arquitetura de um controlador nebuloso (Passino and Yurkovich, 1998). . . . .    | 35 |
| 5.1 | Veículo utilizado para nas simulações (Kondo et al., 2010) . . . . .             | 39 |
| 5.2 | Veículo utilizado para nas simulações esquema geral (Kondo et al., 2010) . . . . | 40 |
| 5.3 | Movimentos horizontais- vista superior . . . . .                                 | 41 |
| 5.4 | Movimentos verticais - vista lateral . . . . .                                   | 41 |
| 5.5 | Seguimento de uma trajetória horizontal com faltas no P1 e P2 do BA-1. . . . .   | 46 |
| 5.6 | Seguimento de uma trajetória horizontal com faltas no P3 e P4 do BA-1. . . . .   | 47 |
| 5.7 | Diagrama do corpo livre do BA-1 . . . . .  | 48 |
| 5.8 | Seguimento de uma trajetória horizontal com faltas no P2 e P4 do BA-1. . . . .   | 48 |
| 6.1 | Esquema geral do controlador proposto. . . . .                                   | 49 |
| 6.2 | Esquema do controlador nebuloso. . . . .   | 51 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 6.3  | Entradas do controlador Nebuloso. . . . .  | 53 |
| 6.4  | Saidas do controlador Nebuloso. . . . .  | 53 |
| 6.5  | Entrada do controle nebuloso quando não tem falta nos propulsores. . . . .             | 53 |
| 6.6  | Entrada do controle nebuloso quando P1 falta. . . . .                                  | 54 |
| 6.7  | Entrada do controle nebuloso quando P2 falta. . . . .                                  | 54 |
| 6.8  | Entrada do controle nebuloso quando P3 falta. . . . .                                  | 55 |
| 6.9  | Entrada do controle nebuloso quando P4 falta. . . . .                                  | 55 |
| 6.10 | Entrada do controle nebuloso quando P1 e P2 faltam. . . . .                            | 56 |
| 6.11 | Entrada do controle nebuloso quando P3 e P4 faltam. . . . .                            | 56 |
| 6.12 | Entrada do controle nebuloso quando P1 e P3 faltam. . . . .                            | 56 |
| 6.13 | Entrada do controle nebuloso quando P1 e P4 faltam. . . . .                            | 57 |
| 6.14 | Entrada do controle nebuloso quando P2 e P3 faltam. . . . .                            | 57 |
| 6.15 | Entrada do controle nebuloso quando P2 e P4 faltam. . . . .                            | 58 |
| 7.1  | Forças do veículo quando o P1 falta. . . . .   | 65 |
| 7.2  | Torques do veículo quando P1 falta no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .         | 65 |
| 7.3  | Torques do veículo quando P1 falta na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .        | 66 |
| 7.4  | Deslocamento do veículo quando P1 falta no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .    | 66 |
| 7.5  | Deslocamento do veículo quando P1 falta na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .   | 67 |
| 7.6  | Erros do veículo quando P1 falta no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .           | 67 |
| 7.7  | Erros do veículo quando P1 falta na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .          | 68 |
| 7.8  | Deslocamento em $x, y, z$ quando P1 falta no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .  | 68 |
| 7.9  | Deslocamento em $x, y, z$ quando P1 falta na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . . | 69 |
| 7.10 | Realocação das forças do veículo quando P3 falta. . . . .                              | 70 |
| 7.11 | Deslocamento do veículo quando P3 falta no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .    | 70 |
| 7.12 | Deslocamento do veículo quando P3 falta na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .   | 71 |
| 7.13 | Torques do veículo quando P3 falta no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .         | 71 |
| 7.14 | Torques do veículo quando P3 falta na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .        | 72 |

|   |    |
|---|----|
| 7.15 Erros do veículo quando P3 falta no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .                 | 72 |
| 7.16 Erros do veículo quando P3 falta na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .                | 73 |
| 7.17 Deslocamento em $x, y, z$ quando P3 falta no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .        | 73 |
| 7.18 Deslocamento em $x, y, z$ quando P3 falta na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .       | 74 |
| 7.19 Deslocamento do veículo quando P1 e P2 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .    | 75 |
| 7.20 Deslocamento do veículo quando P1 e P2 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .   | 75 |
| 7.21 Torques do veículo quando P1 e P2 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .         | 76 |
| 7.22 Torques do veículo quando P1 e P2 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .        | 76 |
| 7.23 Erros do veículo quando P1 e P2 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .           | 77 |
| 7.24 Erros do veículo quando P1 e P2 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .          | 77 |
| 7.25 Deslocamento em $x, y, z$ quando P1 e P2 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .  | 78 |
| 7.26 Deslocamento em $x, y, z$ quando P1 e P2 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . . | 78 |
| 7.27 Deslocamento do veículo quando P3 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .    | 79 |
| 7.28 Deslocamento do veículo quando P3 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .   | 80 |
| 7.29 Erro do veículo quando P3 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .            | 80 |
| 7.30 Erro do veículo quando P3 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .           | 81 |
| 7.31 Torque do veículo quando P3 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .          | 81 |
| 7.32 Torque do veículo quando P3 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .         | 82 |
| 7.33 Deslocamento em $x, y, z$ quando P3 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .  | 82 |
| 7.34 Deslocamento em $x, y, z$ quando P3 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . . | 83 |
| 7.35 Deslocamento do veículo quando P1 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .    | 84 |
| 7.36 Deslocamento do veículo quando P1 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .   | 84 |
| 7.37 Torque do veículo quando P1 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .          | 85 |
| 7.38 Torque do veículo quando P1 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .         | 85 |
| 7.39 Erros do veículo quando P1 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .           | 86 |
| 7.40 Erros do veículo quando P1 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . .          | 86 |
| 7.41 Deslocamento em $x, y, z$ quando P1 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s). . . . .  | 87 |
| 7.42 Deslocamento em $x, y, z$ quando P1 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). . . . . | 87 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 7.43 | Deslocamento do veículo quando P1 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s).    | 88  |
| 7.44 | Deslocamento do veículo quando P1 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s).   | 89  |
| 7.45 | Torque do veículo quando P1 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s).          | 89  |
| 7.46 | Torque do veículo quando P1 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s).         | 90  |
| 7.47 | Erros do veículo quando P1 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s).           | 90  |
| 7.48 | Erros do veículo quando P1 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s).          | 91  |
| 7.49 | Deslocamento em $x, y, z$ quando P1 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s).  | 91  |
| 7.50 | Deslocamento em $x, y, z$ quando P1 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). | 92  |
| 7.51 | Deslocamento do veículo quando P2 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s).    | 93  |
| 7.52 | Deslocamento do veículo quando P2 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s).   | 93  |
| 7.53 | Torques do veículo quando P2 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s).         | 94  |
| 7.54 | Torques do veículo quando P2 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s).        | 94  |
| 7.55 | Erros do veículo quando P2 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s).           | 95  |
| 7.56 | Erros do veículo quando P2 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s).          | 95  |
| 7.57 | Deslocamento em $x, y, z$ quando P2 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s).  | 96  |
| 7.58 | Deslocamento em $x, y, z$ quando P2 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). | 96  |
| 7.59 | Deslocamento do veículo quando P2 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s).    | 97  |
| 7.60 | Deslocamento do veículo quando P2 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s).   | 98  |
| 7.61 | Torques do veículo quando P2 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s).         | 98  |
| 7.62 | Torques do veículo quando P2 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s).        | 99  |
| 7.63 | Erros do veículo quando P2 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s).           | 99  |
| 7.64 | Erros do veículo quando P2 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s).          | 100 |
| 7.65 | Deslocamento em $x, y, z$ quando P2 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$ s).  | 100 |
| 7.66 | Deslocamento em $x, y, z$ quando P2 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$ s). | 101 |
| A.1  | Diagrama de blocos da lei CRL ( (Chiella, 2012))                                     | 114 |
| B.1  | Esquema do controlador nebuloso.   | 116 |
| B.2  | Esquema do bloco Propulsores.  | 116 |

B.3 Esquema do bloco AUV. . . . . 117



# Lista de Tabelas

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Nomenclatura dos movimentos de um corpo submerso em um fluido. . . . .         | 10 |
| 4.1 | Operações básicas de conjuntos . . . . .                                       | 34 |
| 5.1 | Caraterísticas Físicas do BA-1. . . . .  | 40 |
| 5.2 | Conjunto de propulsores para cada direção. . . . .                             | 42 |
| 5.3 | Direção do movimento para uma corrente. . . . .                                | 42 |
| 5.4 | Conjunto de propulsores para cada direção em caso de falta do P1 e P2. . . . . | 45 |
| 5.5 | Conjunto de propulsores para cada direção em caso de falta do P3 e P4. . . . . | 45 |
| 6.1 | Síntese de regras do controlador nebuloso . . . . .                            | 59 |
| 7.1 | Parâmetros utilizados para as simulações. . . . .                              | 64 |



# Lista de Símbolos

|   |  |
|---|--|
| $\{B\}$   | referencial do corpo   |
| $\{E\}$   | referencial inercial   |
| $u, v$ e $w$  | velocidades linear no referencial do corpo [ $m/s$ ]                   |
| $p, q$ e $r$  | velocidades angular no referencial do corpo [ $rad/s$ ]                |
| ${}^B\mathbf{v}_1$                                  | vetor de velocidades linear no referencial do corpo [ $m/s$ ]          |
| ${}^B\mathbf{v}_2$                                  | vetor de velocidades angular no referencial do corpo [ $rad/s$ ]       |
| ${}^B\mathbf{v}$                                    | vetor de velocidades no referencial do corpo                           |
| ${}^E\dot{\boldsymbol{\eta}}_1$                     | vetor de velocidades linear no referencial inercial [ $m/s$ ]          |
| ${}^E\dot{\boldsymbol{\eta}}_2$                     | vetor de velocidades angular no referencial inercial [ $rad/s$ ]       |
| ${}^E\dot{\boldsymbol{\eta}}$                       | vetor de velocidades no referencial inercial                           |
| $x, y$ e $z$  | translação no referencial inercial [ $m$ ]                             |
| $\phi, \theta$ e $\psi$                             | orientação no referencial inercial [ $rad$ ]                           |
| ${}^E\boldsymbol{\eta}_1$                           | vetor de posição no referencial inercial [ $m$ ]                       |
| ${}^E\boldsymbol{\eta}_2$                           | vetor de orientação no referencial inercial [ $rad$ ]                  |
| ${}^E\boldsymbol{\eta}$                             | vetor de posição no referencial inercial                               |
| ${}^B\boldsymbol{\tau}_1$                           | vetor de forças no referencial do corpo [ $N$ ]                        |
| ${}^B\boldsymbol{\tau}_2$                           | vetor momentos no referencial do corpo [ $N$ ]                         |
| ${}^B\boldsymbol{\tau}$                             | vetor forças e momentos no referencial do corpo [ $N$ ]                |
| $X, Y, Z$   | forças no referencial do corpo [ $N$ ]                                 |
| $K, M, N$   | momentos no referencial do corpo [ $N$ ]                               |
| $\mathbf{J}_1$                                      | matriz de transformação de velocidade linear por ângulos de Euler      |
| $\mathbf{J}_2$                                      | matriz de transformação de velocidade angular por ângulos de Euler     |
| $\mathbf{J}$  | matriz de transformação de velocidade por ângulos de Euler             |
| $m$   | massa  |
| $x_G, y_G, z_G$                                     | coordenadas do centro de gravidade do veículo                          |
| $\mathbf{I}_x, \mathbf{I}_y, \mathbf{I}_z$          | momentos de inércia  |
| $\mathbf{I}_{xy}, \mathbf{I}_{yz}, \mathbf{I}_{xz}$ | são os produtos de inércia   |
| $\mathbf{M}$  | matriz de inércia do veículo   |
| $\mathbf{M}_{RB}$                                   | matriz de inércia do corpo rígido                                      |
| $\mathbf{M}_A$                                      | matriz de inércia devido a massa adicional                             |
| $\mathbf{C}({}^B\mathbf{v})$                        | matriz de coriolis e centrípeta do veículo, incluindo masas adicionais |

|   |  |
|---|--|
| $C_{RB}({}^B\mathbf{v})$                  | matriz de coriolis e centrípeta do veículo                       |
| $C_A({}^B\mathbf{v})$                     | matriz de coriolis de massa adicional                            |
| $D({}^B\mathbf{v})$                       | matriz de arrasto e sustentação                                  |
| $\mathbf{g}({}^E\boldsymbol{\eta})$       | vetor de forças e momentos restauradoras                         |
| ${}^B\boldsymbol{\tau}_E$                 | vetor forças e momentos relativos ao meio ambiente               |
| $\dot{x}, \dot{y}$ e $\dot{z}$            | velocidades linear no referencial inercial [ $m/s$ ]             |
| $\dot{\phi}, \dot{\theta}$ e $\dot{\psi}$ | velocidades angular no referencial inercial [ $rad/s$ ]          |
| $W$                                       | força gravitacional  |
| $B$                                       | empuxo   |
| $\mathbf{r}_G$                            | vetor de posição do centro de gravidade                          |
| $\mathbf{r}_B$                            | vetor de posição do centro de empuxo                             |
| $\boldsymbol{\nu}_c$                      | vetor de velocidades da correnteza no referencial inercial       |
| ${}^E\boldsymbol{\nu}_c$                  | vetor de velocidades da correnteza no referencial do corpo       |
| $\boldsymbol{\nu}_r$                      | vetor de velocidades relativas                                   |
| $x_B, y_B, z_B$                           | coordenadas do centro de empuxo do veículo                       |
| $v_w$                                     | velocidade com que a água se dirige para o hélice                |
| $D$                                       | diâmetro do hélice   |
| $n_i$                                     | velocidade de rotação de cada hélice [ $rps$ ]                   |
| $\sigma$                                  | ângulo de avanço   |
| $T_{ n n}$                                | coeficiente de empuxo  |
| $Q_{ n n}$                                | coeficiente de torque  |
| $\mathbf{u}$                              | vetor de sinais de controle                                      |
| $\mathbf{B}$                              | matriz de propulsão  |
| $p$                                       | número de propulsores  |
| $i_a$                                     | corrente de armadura do motor DC                                 |
| $V_a$                                     | tensão aplicada  |
| $R_a$                                     | resistência de armadura do motor DC                              |
| $K_m$                                     | constante eletromagnética do motor                               |
| $J_p$                                     | soma dos momentos de inércia do motor e do hélice                |
| $T_m$                                     | vetor de torques dos motores                                     |
| $T$                                       | empuxo produzido por propulsor                                   |
| $Q$                                       | torque produzido por propulsor                                   |
| $T_r$                                     | vetor de torques resistentes                                     |
| $\mathbf{P}$                              | matriz diagonal contendo os momentos de inércia dos propulsores; |
| $\dot{\mathbf{n}}$                        | vetor de aceleração angular dos hélices;                         |
| $\boldsymbol{\tau}_{prop}$                | vetor com a contribuição de força de cada propulsor              |
| $L_a$                                     | é a indutância da armadura                                       |
| $R_a$                                     | é a resistência de armadura                                      |

|               |   |
|---------------|---|
| $C_T(\sigma)$ | coeficiente de empuxo em função de $\sigma$           |
| $C_Q(\sigma)$ | coeficiente de torque em função de $\sigma$           |
| $M_\eta$      | matriz de inércia expressa no referencial inercial    |
| $a_\eta$      | aceleração comandada expressa no referencial inercial |
| $a_\nu$       | aceleração comandada expressa no referencial do corpo |
| $K_d$         | ganhos derivativo do controlador                      |
| $K_p$         | ganhos proporcional do controlador                    |
| $K_i$         | ganhos integral do controlador                        |
| $\eta_d$      | vetor posição e orientação desejada                   |
| $r_d$         | vetor posição e orientação final                      |
| $\xi$         | coeficiente de amortecimento                          |
| $s$           | segundos  |
| $N$           | newton  |
| $V$           | volt  |
| $\Omega$      | ohm   |



# Capítulo 1

## Introdução

Em sistemas críticos como aeronaves, naves espaciais, veículos subaquáticos, usinas nucleares entre outros, as consequências da falha ou falta de um componente pode ser catastrófica (Kwong et al., 1995). Portanto, considerar a possibilidade de desempenho degradado por causa de falhas ou faltas em algum dos componentes é um requisito inerente desses sistemas (Alwi et al., 2011). Uma falta consiste na perda total de um componente (sensor, propulsor, etc), já uma falha corresponde ao funcionamento inadequado do componente.

Um sistema de controle que tem a capacidade de lidar com situações de falta ou falha em algum dos seus componentes de forma automática e mantendo a sua estabilidade é denominado Sistema de Controle Tolerante a Faltas (em inglês *Fault Tolerant Control System* - FTC). Nas últimas três décadas foram realizadas importantes pesquisas sobre o FTC de aeronaves (Eterno et al., 1985; Patton, 1997; Kwong et al., 1995), sistemas industriais (Blanke et al., 2003), veículos subaquáticos (Alessandri, 1999; Kanti Podder and Sarkar, 1999; Podder et al., 2000; Sarkar et al., 2002; Omerdic and Roberts, 2004; Omerdic, 2009; Choi and Kondo, 2010), entre outros sistemas.

Nas bibliografias citadas anteriormente, são utilizadas diferentes metodologias para alcançar o objetivo de controle tolerante, os quais em geral podem ser classificados como ativos ou passivos (Zhang and Jiang, 2008). Os FTCs ativos reagem à ocorrência de faltas, normalmente usando informações de um sistema de detecção e diagnóstico de faltas (em inglês *Fault Detection and Diagnosis* - FDD), para logo invocar alguma forma de re-projeto de controle, que pode ser adaptativa ou re-configurável. Por outro lado, os FTCs passivos operam de forma independente de qualquer informação da falha ou falta. Pois, tanto a operação normal como as possíveis falhas e faltas do sistema são consideradas na etapa de projeto de controle portanto, não são necessários os mecanismos de FDDs nem de re-projeto de controle. Os sistemas passivos são geralmente menos complexos, mas são conservadores, a fim de lidar com piores efeitos de caso de falhas. Estas duas abordagens utilizam metodologias diferentes para obter os mesmos objetivos de controle, porém, eles proporcionam características diferentes ao sistema (Jiang and Yu, 2012) (Ver Capítulo 3).

A pesquisa sobre o FTC ativo e passivo em veículos subaquáticos tem aumentado de

maneira importante nos últimos anos, especialmente no FTC de atuadores e sistemas de propulsão (Akmal et al., 2012). Isto é devido ao recente interesse na utilização de veículos subaquáticos autônomos (em inglês *Autonomous Underwater Vehicles* - AUVs) para missões de coleta de dados nos oceanos, inspeção de barragens hidroelétricas e outros usos, que gerou uma necessidade por sistemas de controles mais robustos e confiáveis (Smith et al., 1994).

## 1.1 Motivação

O desenvolvimento e a pesquisa sobre Veículos Subaquáticos não Tripulados (em inglês *Unmanned Underwater Vehicles* -UUVs) tem despertado o interesse de vários setores. No setor industrial o interesse é inspeção e manutenção de estações subaquáticas e plataformas *offshore* (exploração de gás e petróleo, entre outros), no setor científico é na aquisição de dados científicos e ambientais (pesquisas biológicas) e no setor militar a pesquisa pode ser útil em guerras marítimas entre outros. O principal motivo para a utilização de UUVs é o alto risco que implica realizar missões tripuladas em ambientes hostis e imprevisíveis como os subaquáticos (Antonelli, 2004).

Para que um UUV seja funcional, ele precisa ser capaz de detectar faltas que possam ocorrer durante a missão e se recuperar delas (Alessandri, 1999), pois, a existência de uma pequena falta durante esta, pode ser onerosa e consumir muito tempo (Omerdic and Roberts, 2004).

Os sistemas que têm a capacidade de funcionar corretamente mesmo na presença de faltas são chamados Sistemas Tolerantes a Faltas (em inglês *Fault Tolerant System* - FTS). Nestes sistemas as faltas não são notadas pelo usuário final, pois o sistema detecta e se recupera destas antes que o sistema alcance os seus limites (Blanke et al., 2003).

O propulsor de um Veículo Subaquático (em inglês *Underwater Vehicle* - UV) é uma das fontes de falta mais comum e importante, a qual sempre tem efeito direto no desempenho do controle do veículo (Omerdic, 2009). Por conseguinte, faz parte de um bom projeto de Controle de Tolerância a Faltas diminuir os efeitos que os propulsores defeituosos possam ocasionar no desempenho do veículo.

A maioria dos AUVs tem um sistema sobreatuado de propulsores, ou seja, eles tem maior quantidade de atuadores do que graus de liberdade. O FTC em propulsores tem como um de seus principais objetivos o controle de alocação, o qual consiste basicamente em uma lei de distribuição da força total de controle desejada entre um conjunto redundante de atuadores (propulsores) disponíveis, onde cada propulsor tem como restrição suas limitações físicas (Härkegård, 2002).

Na bibliografia foram revisadas várias abordagens para realizar o controle de alocação (Antonelli, 2006; Sarkar et al., 2002; Podder et al., 2000; Kanti Podder and Sarkar, 1999; Choi

and Kondo, 2010), incluindo métodos analíticos e métodos baseados na inteligência computacional. Neste trabalho é utilizada a inteligência computacional baseada na lógica nebulosa, introduzida por Zadeh (1965). O algoritmo nebuloso proposto permite encontrar através de regras nebulosas da forma: SE antecedente ENTÃO consequente, uma maneira de redistribuir as forças dos propulsores entre os propulsores operacionais, em caso de faltas nos propulsores. O controle proposto foi aplicado em um modelo do veículo Biointeractive BA-1 (Kondo et al., 2010; Choi and Kondo, 2010) utilizado para realizar as simulações.

## 1.2 Justificativa do uso do Controle Nebuloso

Uma característica principal da lógica nebulosa é o tratamento de informações vagas, fornecidas pelos seres humanos, o que proporciona um meio de capturar a natureza aproximada e inexata da linguagem humana, e aproximá-la da decisão computacional. Desta maneira, decisões intermediárias do tipo: talvez, um pouco, e outras variáveis que representam decisões humanas podem ser entendidas e geradas por um computador.

Os controladores baseados nesta lógica são denominados Controladores Nebulosos. Esses controladores, em essência, proporcionam um algoritmo que pode transformar a estratégia de controle linguístico de um especialista humano, em uma estratégia de controle automático (Lee, 1990).

Atualmente, os controladores nebulosos são cada vez mais utilizados nos sistemas de controle por serem robustos e adaptáveis (Guerra, 1998; Passino and Yurkovich, 1998). Ademais, esses controladores podem tratar de igual maneira sistemas lineares e não lineares, e para desenvolvê-los não é necessário ter um conhecimento muito profundo de matemática ou da teoria de controle, pois não requerem da modelagem matemática precisa do processo a ser controlado (Ren et al., 2013). Este tipo de controle segundo Guerra (1998) é indicado para sistemas não lineares e/ou variantes no tempo e para ambientes com alto nível de ruído e perturbações.

Outra característica importante desta lógica é a facilidade de entender e examinar a base de conhecimento que está na forma de regras: SE antecedente, ENTÃO consequente. Isto permite que os problemas no controlador possam ser isolados mais rapidamente e, conseqüentemente, que o tempo médio de manutenção e o tempo médio entre faltas diminua, além de favorecer a atualização do controlador e a base de conhecimentos (Cox et al., 1998).

Este tipo de controle já é utilizado em várias aplicações como: operações de controle industrial, reconhecimento de padrões, sistemas especialistas, entre outros usos; e a tendência é que aumente (Sandri and Corrêa, 1999).

Diferentes estratégias podem ser aplicadas em projetos de controle de alocação (Choi and Kondo, 2010; Podder et al., 2000; Sarkar et al., 2002; Omerdic and Roberts, 2004; Omerdic, 2009). Os principais critérios utilizados para a seleção de uma estratégia são: as caracte-

terísticas do processo a controlar e as condições de operação em que o robô será submetido. Consequentemente, o controle nebuloso é escolhido, tendo em consideração as características citadas anteriormente.

## **1.3 Revisão Bibliográfica Relevante do Controle de Alocação em UUVs**

Na sequência são apresentados resumos das principais bibliografias utilizadas no trabalho.

### **1.3.1 Caso Estudado por Podder et al**

No artigo de Podder et al. (2000) é abordada a acomodação de faltas de propulsores em AUV, com propulsores redundantes durante a missão. O esquema de resolução apresentado neste artigo tem em consideração a presença do número redundante de propulsores juntamente com todas as faltas de propulsor e determina as forças de referência dos propulsores para produzir o movimento desejado. Estas forças de referência dos propulsores são utilizadas no controlador do propulsor para gerar o movimento necessário. Esta abordagem resolve a redundância de propulsores no espaço cartesiano e permite que o AUV siga as trajetórias com redução assintótica dos erros na área de trabalho.

### **1.3.2 Caso Estudado por Sarkar et al**

Em Sarkar et al. (2002) a visão proposta em Podder et al. (2000), citada em 1.3.1, é estendida para incorporar uma técnica de retroalimentação dinâmica de estado para gerar uma força de propulsão de referência que esteja dentro dos limites de saturação dos propulsores.

### **1.3.3 Caso Estudado por Choi et al**

No artigo (Choi and Kondo, 2010) é abordada uma discussão de um controle tolerante a faltas de um AUV com flutuadores e seis propulsores, dois verticais e quatro horizontais. No artigo foram estudados os seguintes casos no funcionamento dos propulsores:

- Sem faltas nos propulsores,
- Com um propulsor defeituoso,
- Com dois e com três propulsores defeituosos.

A abordagem utilizada prevê uma reconfiguração da matriz de configuração dos propulsores na ocorrência de faltas específicas para alterar o sistema de controle. As magnitudes das faltas são estimadas e a lei de controle é modificada, havendo leis de controle diferentes para cada uma das diferentes faltas que podem ocorrer.

### **1.3.4 Caso Estudado por Fossen**

No artigo de Fossen and Johansen (2006) o controle de alocação é formulado como um problema de otimização, o qual tem como objetivo minimizar a utilização da força de controle, sujeito a restrições como a taxa e posição do atuador. No artigo é apresentada uma maneira de evitar o surgimento de singularidade.

### **1.3.5 Caso Estudado por Corradini et al**

No artigo de Corradini et al. (2011) é proposto um esquema de controle tolerante a faltas para um atuador de um Veículo Remotamente Operado (em inglês *Remotely Operated Vehicles* -ROV) composto pelos módulos convencionais de detecção, isolamento, acomodação, projetados para sistemas não lineares e aplicado a um ROV utilizado para inspeção. Um controle sliding mode foi utilizado para o controle do ROV e a isolamento das faltas. Por último um controle de reconfiguração é desenvolvido para explorar a redundância dos atuadores

### **1.3.6 Caso Estudado por Soylu et al**

Em Soylu et al. (2008) são apresentados um controlador de trajetória sliding mode sem chattering aplicado a um ROV, e um novo método de alocação de propulsores baseado na minimização do componente com maior valor do conjunto de propulsores. Soylu et al. (2008) demonstram que minimizar a norma  $l_\infty$  do conjunto de propulsores garante que as forças individuais dos propulsores sejam pequenas. Porém, para conseguir resultados em tempo real da alocação baseada na norma  $l_\infty$  teve que ser desenvolvida uma rede neural recorrente.

## **1.4 Apresentação do Problema**

O Grupo de Pesquisa em Robótica da UNIOESTE (GPR) vem trabalhando no desenvolvimento de um AUV para inspeção de barragens. A tolerância a faltas é uma das principais características de um AUV. Neste sentido, foi realizada uma pesquisa de uma aplicação de controle tolerante a faltas sobre um veículo já existente.

A proposta apresentada em Choi and Kondo (2010) foi escolhida por apresentar similaridades na distribuição dos propulsores a serem utilizados no projeto do GPR. Estas características são: flutuadores e 6 propulsores, dois verticais e quatro horizontais. No artigo foram estudados quatro casos de possíveis faltas dos propulsores: falta em um propulsor horizontal, falta em um propulsor vertical, faltas em um propulsor horizontal e vertical, e faltas em dois propulsores horizontais e um vertical. Para cada um dos casos foi construída uma matriz de efetividade diferente para realizar o cálculo do controle efetivo.

## 1.5 Objetivo

Projetar um controle de alocação tolerante a faltas de propulsores de um veículo autônomo subaquático utilizando Lógica Nebulosa.

### Objetivos Específicos

- Desenvolver um controle de alocação que reaja automaticamente na ocorrência de faltas dos propulsores horizontais;
- Explorar os métodos de tolerância a faltas existentes em sistemas dinâmicos;
- Formular e resolver o problema de controle de alocação de propulsores na ocorrência de faltas;
- Desenvolver um modelo de simulação para testar o algoritmo proposto;
- Verificar o desempenho do algoritmo proposto para diversas trajetórias.

## 1.6 Metodologia

As técnicas de controle tolerante a faltas a serem utilizadas dependem muito de seu objetivo e área de aplicação. A tolerância a faltas é fundamental em um veículo autônomo subaquático, visto que faltas no sistema podem ocasionar reações e comportamentos indesejados no veículo produzindo danos a partes técnicas, à equipe técnica ou ao entorno (Omerdic and Roberts, 2004). A metodologia utilizada para a realização deste controle foi escolhida tendo em conta as vantagens e desvantagens dos métodos existentes. A elaboração do trabalho foi estruturada em fases, as quais serão descritas a seguir.

### **1.6.1 Primeira Fase**

O primeiro passo para a compreensão da tecnologia em questão foi o levantamento bibliográfico, baseado em livros, teses, artigos técnicos, publicações em congressos e revistas. Na maior parte da bibliografia revisada encontrou-se a utilização de métodos de modelagem matemática no controle tolerante a faltas. No entanto, os sistemas de controle inteligente ou adaptativo possuem características específicas como a capacidade de tomada de decisões, a adaptação a um meio incerto, a auto-organização, planejamento e projeto de operações, que dão grande flexibilidade ao controlador, que favorece o uso desta alternativa em diversas aplicações.

A lógica nebulosa foi a abordagem básica desta pesquisa, pois é uma ferramenta poderosa para aplicações em engenharia de controle inteligente. O controle inteligente é uma técnica de controle que procura simular a tomada de decisões de um operador humano no planejamento das estratégias de controle e no aprendizado de novas funções.

### **1.6.2 Segunda Fase**

Foi analisado o modelo matemático do veículo para obter um conhecimento aprofundado do comportamento do sistema dinâmico e assim construir a base de regras do controlador de alocação nebuloso.

### **1.6.3 Terceira Fase**

Nesta fase realizou-se a descrição do controle nebuloso tolerante a faltas proposto. Foram definidos: Os parâmetros do projeto e o diagrama do controlador proposto. Estes dados foram utilizados no desenvolvimento do programa computacional utilizando o *MatLab Fuzzy Logic Toolbox* e *Simulink*. Portanto, determinou-se o grau de desempenho que atinge o controlador fazendo análises das regras, funções de pertinência e a lógica implementada.

## **1.7 Estrutura Geral do Trabalho**

Nesta secção, descreve-se a estrutura e o conteúdo dos capítulos desta monografia:

### **Capítulo 1: Introdução**

Neste capítulo são apresentadas revisões dos trabalhos mais relevantes na área e o problema a ser tratado. Além disso, são descritos os objetivos, a estrutura e a metodologia da pesquisa, e uma breve síntese dos capítulos.

## **Capítulo 2: Modelagem Matemática do Veículo**

É explicado o desenvolvimento da modelagem da dinâmica de um UV em seis graus de liberdade, necessário para a realização das simulações.

## **Capítulo 3: Controle Tolerante a Falhas**

São abordados temas referentes aos conceitos básicos sobre diagnóstico e acomodação de falhas em sistemas dinâmicos, controle tolerante a falhas de propulsores de veículos subaquáticos não tripulados.

## **Capítulo 4: Lógica Nebulosa e Controladores Nebulosos**

Este capítulo tem por objetivo proporcionar uma visão detalhada da lógica nebulosa estudada para o desenvolvimento do controlador proposto.

## **Capítulo 5: Fundamentos do Projeto de Controle**

Neste capítulo apresentam-se as principais características físicas e dinâmicas do BA-1 veículo subaquático utilizado no trabalho de pesquisa. Este capítulo é importante para a compreensão dos capítulos seguintes, já que apresenta a análise das situações de falta de propulsores e o problema de controle de alocação do BA-1.

## **Capítulo 6: Proposta de Controle Nebuloso de Propulsores**

Neste capítulo se detalha o esquema do controlador nebuloso proposto e as regras nebulosas. Além disso, se apresenta as definições principais para a resolução do problema abordado.

## **Capítulo 7: Implementação e Análise dos Resultados**

Neste capítulo se detalham os casos simulados e a análise dos resultados.

## **Capítulo 8: Considerações Finais**

São apresentadas as conclusões do trabalho, fazendo uma avaliação geral da pesquisa e dos resultados alcançados e por fim são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Modelagem Matemática do Veículo

Para realizar simulações computacionais que permitam comprovar e avaliar o funcionamento do controle de alocação proposto, é necessário contar com um modelo matemático do comportamento do veículo subaquático. Por isto, embora a modelagem dos movimentos do veículo utilizado para o projeto de pesquisa não seja parte do escopo do trabalho, neste capítulo são apresentados os principais fundamentos teóricos utilizados na elaboração do modelo matemático que foi empregado nas simulações.

Para modelar o movimento de veículos subaquáticos é necessário estudar tanto a estática (questões referentes velocidade constante ou em repouso do veículo), a dinâmica dos corpos (questões referentes à aceleração) (Fossen, 1994), e a dinâmica do fluido em que o veículo estará imerso. O modelo utilizado é o modelo matemático dinâmico apresentado por Fossen (1994), pois é o modelo mais empregado para representar os movimentos de um veículo submarino em seis graus de liberdade.

### 2.1 Sistemas de Coordenadas

Os veículos subaquáticos podem ter até seis graus de liberdade. Por este motivo, seis coordenadas independentes são necessárias para determinar a posição e a orientação do corpo rígido. As primeiras três coordenadas e suas derivadas temporais correspondem às posições e movimentos translacionais sobre o eixo  $x$ ,  $y$ , e  $z$ , enquanto as restantes coordenadas e suas derivadas temporais são usadas para descrever os movimentos de orientação e rotacionais.

Os veículos subaquáticos têm 6 movimentos definidos como: *avanço*, *deriva*, *afundamento*, *balanço*, *arfagem*, e *guinada* (Tabela 2.1)

Tabela 2.1: Nomenclatura dos movimentos de um corpo submerso em um fluido.

| <i>Graus de Liberdade</i>                                     | <i>Forças e Momentos</i> | <i>Velocidades Lineares e Angulares</i> | <i>Posições e Ângulos de Euler</i> |
|---|--------------------------|---|------------------------------------|
| Movimento translacional em $x$ - avanço ( <i>surge</i> )      | $X$                      | $u$                                     | $x$                                |
| Movimento translacional em $y$ - deriva ( <i>sway</i> )       | $Y$                      | $v$                                     | $y$                                |
| Movimento translacional em $z$ - afundamento ( <i>heave</i> ) | $Z$                      | $w$                                     | $z$                                |
| Movimento rotacional em $x$ - balanço ( <i>roll</i> )         | $K$                      | $p$                                     | $\phi$                             |
| Movimento rotacional em $y$ - arfagem ( <i>pitch</i> )        | $M$                      | $q$                                     | $\theta$                           |
| Movimento rotacional em $z$ - guinada ( <i>yaw</i> )          | $N$                      | $r$                                     | $\psi$                             |

## 2.2 Modelagem Cinemática

Para analisar os movimentos de um veículo subaquático, são utilizados dois sistemas de referência (Figura. 2.1): Um fixo ao corpo  $\{B\}$ , que geralmente tem como origem o centro de gravidade do veículo (referencial móvel), e um fixo à terra  $\{E\}$  (referencial inercial). Então, a posição e orientação do veículo devem ser descritas relativas a  $\{E\}$ , enquanto as velocidades angulares e lineares do veículo devem ser descritas relativas a  $\{B\}$ .

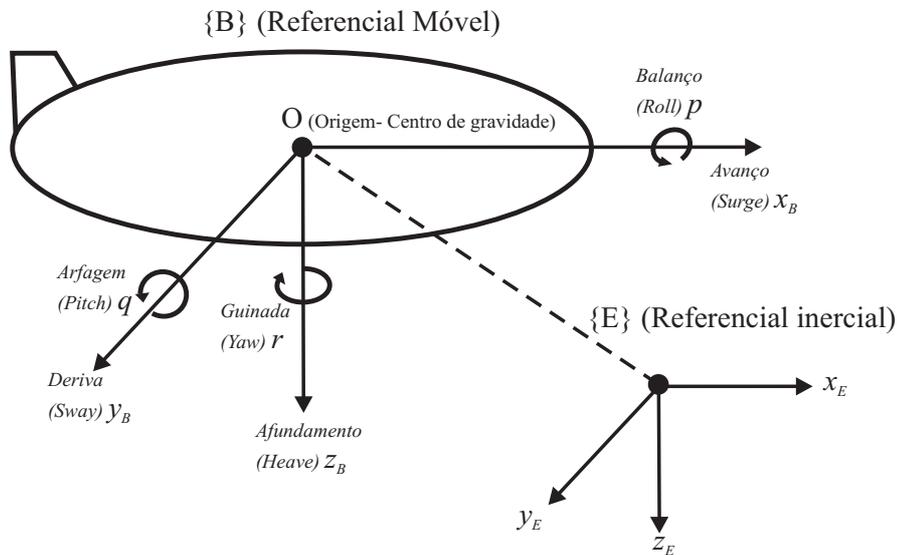


Figura 2.1: Referenciais do veículo.

A relação geométrica entre o  $\{B\}$  e o  $\{E\}$  é descrita pelo modelo cinemático, cujas equações são descritas pelos vetores  ${}^E\boldsymbol{\eta}$  e  ${}^B\mathbf{v}$ .

O vetor de posição e momentos,  ${}^E\boldsymbol{\eta}$ , está composto pelo vetor de posição,  ${}^E\boldsymbol{\eta}_1$ , e o vetor de orientação,  ${}^E\boldsymbol{\eta}_2$ , como pode ser visto abaixo.

$${}^E\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} {}^E\boldsymbol{\eta}_1 \\ {}^E\boldsymbol{\eta}_2 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$${}^E\boldsymbol{\eta}_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$${}^E\boldsymbol{\eta}_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

O vetor de velocidades lineares e angulares,  ${}^B\mathbf{v}$ , está composto pelos vetores de: velocidade linear,  ${}^B\mathbf{v}_1$ , e velocidade angular,  ${}^B\mathbf{v}_2$ , como pode ser visto abaixo.

$${}^B\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$${}^B\mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$${}^B\mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

As forças e momentos que atuam no veículo no  $\{B\}$  são descritas pelo vetor  ${}^B\boldsymbol{\tau}$

$${}^B\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} {}^B\boldsymbol{\tau}_1 \\ {}^B\boldsymbol{\tau}_2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$${}^B\boldsymbol{\tau}_1 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$${}^B\boldsymbol{\tau}_2 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Em sistemas de controle de veículos marinhos geralmente o vetor de orientação  ${}^E\boldsymbol{\eta}_2$  está representado por meio dos ângulos de Euler (como foi expresso em (2.3)). Isto é devido à interpretação física mais evidente e à facilidade na obtenção das medidas diretamente com um giroscópio.

A relação entre o vetor velocidade expresso no referencial fixo ao corpo  $\{B\}$  e o vetor de velocidade expresso no referencial inercial  $\{E\}$  usando os ângulos de Euler é dada pelas equações (2.10) e (2.11).

$${}^E\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 = \mathbf{J}_1({}^E\boldsymbol{\eta}_2) {}^B\mathbf{v}_1 \quad (2.10)$$

$${}^E\dot{\boldsymbol{\eta}}_2 = \mathbf{J}_2({}^E\boldsymbol{\eta}_2) {}^B\mathbf{v}_2 \quad (2.11)$$

onde  $\mathbf{J}_1({}^E\boldsymbol{\eta})$  e  $\mathbf{J}_2({}^E\boldsymbol{\eta})$  são as matrizes de transformação. Sendo  $\mathbf{J}_1({}^E\boldsymbol{\eta})$  a matriz de transformação relativa aos ângulos de Euler: balanço ( $\phi$ ), arfagem ( $\theta$ ), guinada ( $\psi$ ) definida como:

$$\mathbf{J}_1({}^E\boldsymbol{\eta}_1) = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & -s_\psi c_\phi + c_\psi s_\theta s_\phi & s_\psi s_\phi + c_\psi c_\phi s_\theta \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\phi - s_\phi s_\theta s_\psi & -c_\psi s_\phi + s_\theta s_\psi c_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

A matriz de transformação  $\mathbf{J}_2({}^E\boldsymbol{\eta})$  é a matriz de transformação relativa às velocidades angulares  ${}^B\mathbf{v}_2$  e ao vetor  ${}^E\dot{\boldsymbol{\eta}}_2$ , definida como:

$$\mathbf{J}_2({}^E\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} 1 & s_\phi \text{tg}\theta & c_\phi \text{tg}\theta \\ 0 & c_\theta & s_\phi \\ 0 & s_\phi/c_\theta & c_\phi/c_\theta \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Nas equações acima, temos que c=cosseno, s=seno, tg=tangente.

Reescrevendo as equações (2.10) e (2.11) obtemos a equação (2.14).

$$\begin{bmatrix} {}^E\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \\ {}^E\dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1({}^E\boldsymbol{\eta}_1) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2({}^E\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B\mathbf{v}_1 \\ {}^B\mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

sintetizando a equação (2.14) obtemos a equação (2.15).

$${}^E\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}({}^E\boldsymbol{\eta}) {}^B\mathbf{v} \quad (2.15)$$

Na equação (2.13) pode-se observar que  $\mathbf{J}_2({}^E\boldsymbol{\eta}_2)$  é indefinido na arfagem para o ângulo  $\theta = \pm 90^\circ$ , o qual significa que  $\mathbf{J}_2^{-1}({}^E\boldsymbol{\eta}_2) \neq \mathbf{J}_2^T({}^E\boldsymbol{\eta}_2)$ . No entanto, isto não é um problema para veículos subaquáticos pois estes estão projetados para operar longe desta singularidade (Fossen, 1994).

## 2.3 Modelagem Dinâmica

A modelagem dinâmica de um veículo compreende os efeitos que produz o movimento do veículo em um meio subaquático. Esta interação entre o veículo e o meio provoca transferências de energia entre eles. O movimento do AUV pode ser descrito pela equação matricial (2.16) (Fossen, 1994),

$$\mathbf{M}^B \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}^{(B\mathbf{v})} \mathbf{v} + \mathbf{D}^{(B\mathbf{v})} \mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = {}^B \boldsymbol{\tau}_E + {}^B \boldsymbol{\tau} \quad (2.16)$$

onde

- $\mathbf{M}$  é a matriz de inércia do veículo que inclui:
  - a matriz de inércia do corpo rígido ( $\mathbf{M}_{RB}$ ),
  - e a matriz de massa adicional ( $\mathbf{M}_A$ );
- $\mathbf{C}^{(B\mathbf{v})}$  é a matriz de Coriolis e centrípeta do veículo  $\mathbf{C}_{RB}^{(B\mathbf{v})}$ , incluindo massas adicionais  $\mathbf{C}_A^{(B\mathbf{v})}$ ;
- $\mathbf{D}^{(B\mathbf{v})}$  é a matriz de amortecimento hidrodinâmico;
- $\mathbf{g}^{(E\boldsymbol{\eta})}$  é o vetor de forças e momentos de restauração;
- ${}^B \boldsymbol{\tau}_E$  é o vetor de forças e momentos relativas ao meio ambiente;
- ${}^B \boldsymbol{\tau}$  é o vetor de forças e momentos de propulsores

Pode-se observar da equação (2.16) que várias forças e momentos atuam sobre o veículo subaquático enquanto este se movimenta no meio aquático.

### 2.3.1 Dinâmica do Corpo Rígido

As massas adicionais são produzidas pela inércia do fluido circundante ao veículo. A matriz de componentes inerciais é dada por:

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -l_{xy} & -l_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -l_{yx} & -l_y & -l_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -l_{zx} & -l_{zy} & l_z \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

onde  $m$  é a massa do veículo,  $(I_x, I_y, I_z)$  são os momentos de inércia,  $(I_{xy}, I_{yz}, I_{xz})$  são os produtos de inércia e  $(x_G, y_G, z_G)$ , são as coordenadas do centro de gravidade no referencial do corpo. A matriz  $\mathbf{M}_{RB}$  é positiva definida com uma única parametrização.

Os termos centrípetos e de Coriolis, obtidos a partir de  $\mathbf{M}_{RB}$  são representados pela

seguinte matriz:

$$\mathbf{C}_{RB} = \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \dots \\
 -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) & \dots \\
 m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) & \dots \\
 m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) & \dots \\
 \\
 m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) & \\
 -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) & \\
 -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) & \\
 \dots & 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_y q \\
 I_{yz}q + I_{xz}p - I_z r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_x p & \\
 -I_{yz}r - I_{xy}p + I_y q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_x p & 0 & 
 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

onde  $\mathbf{C}_{RB} = -\mathbf{C}_{RB}$

### 2.3.2 Forças e Momentos Hidrodinâmicos

As forças e momentos hidrodinâmicos estão constituídos pelos esforços hidrodinâmicos ao qual o veículo está sujeito quando está submerso e se desloca por um fluido. Os principais são:

- Os esforços gerados pela inércia do fluido chamados massas adicionadas, que são representados pela matriz de inércia adicionada,  $\mathbf{M}_A$ , e pela matriz de forças hidrodinâmicas de Coriolis e centrífugas,  $\mathbf{C}_A$ .
- Os esforços produzidos pelo peso e empuxo do fluido chamados forças e momentos restauradores, representados pela matriz  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ .
- Os esforços produzidos pelo arrasto hidrodinâmico  $\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu}$ , causados principalmente pela fricção de superfície e arrasto devido à pressão.

#### Massas Adicionadas

Este esforço está relacionado com o deslocamento do fluido que envolve um veículo subaquático em aceleração. Isto ocorre porque quando um veículo submerso acelera, o fluido que o envolve reage aplicando uma força de igual intensidade em direção oposta.

A massa adicionada está composta pela matriz de inércia  $\mathbf{M}_A$  e a matriz de Coriolis e Centrípeta  $\mathbf{C}_A$ , onde a matriz  $\mathbf{M}_A$  é representada por (2.19) quando o veículo tem três eixos de simetria:

$$\mathbf{M}_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

A matriz de forças e momentos centrípeta e de Coriolis de massa adicionada é expressada por:

$$\mathbf{C}_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Na equação (2.20) é utilizada a notação da Sociedade de Arquitetos Navais e Engenheiros Marinheiros (1950) (em inglês *Society of Naval Architects and Marine Engineers* - SNAME) (Fossen, 1994).

## Arrasto Hidrodinâmico

O arrasto hidrodinâmico ocorre como consequência da resistência do fluido ao movimento do veículo. É uma força paralela à velocidade do veículo em relação ao fluido cujo efeito no modelo dinâmico (2.16) é representado por:

$$\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} = - \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u}|u| & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v}|v| & 0 \\ 0 & 0 & Z_w + Z_{w|w}|w| & \dots \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{array}{cccc} & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 \\ \dots & K_p + K_{p|p}|p| & 0 & 0 \\ & 0 & M_q + M_{q|q}|q| & 0 \\ & 0 & 0 & N_r + N_{r|r}|r| \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{cccc} & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 \\ \dots & K_p + K_{p|p}|p| & 0 & 0 \\ & 0 & M_q + M_{q|q}|q| & 0 \\ & 0 & 0 & N_r + N_{r|r}|r| \end{array}} \right] \boldsymbol{\nu} \quad (2.21)$$

onde  $(X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r)$  são coeficientes de amortecimento linear,

e  $(X_{u|u}, Y_{v|v}, Z_{w|w}, K_{p|p}, M_{q|q}, N_{r|r})$  são os coeficientes de amortecimento quadrático.

### Forças e Momentos Restauradores

Os esforços restauradores correspondem a ação gravitacional e ao empuxo hidrostático, que atuam na direção vertical do referencial inercial, e possuem sentidos contrários (Fossen, 1994).

Se é considerado que o peso atua no centro de gravidade do veículo, e seu vetor posição é  $\mathbf{r}_G = [x_G, y_G, z_G]$ , e o empuxo ou força de flutuação atua no centro de empuxo, cujo vetor posição é  $\mathbf{r}_B = [x_B, y_B, z_B]$ . Assim, as forças e momentos restauradores são expressos no referencial do corpo por:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = - \left[ \begin{array}{c} (W - B)s\theta \\ -(W - B)c\theta s\phi \\ -(W - B)c\theta c\phi \\ -(y_G W - y_B B)c\theta c\phi + (z_G W - z_B B)c\theta s\phi \\ -(z_G W - z_B B)s\theta + (x_G W - x_B B)c\theta c\phi \\ -(x_G W - x_B B)c\theta s\phi - (y_G W - y_B B)s\theta \end{array} \right] \quad (2.22)$$

onde  $W$  é o peso do veículo e  $B$  é o empuxo.

### 2.3.3 Distúrbios Ambientais

Nesta seção serão modelados os distúrbios causados pelas correntes marinhas. Segundo Fossen (1994), para levar em consideração estes distúrbios é necessário ter em consideração a velocidade relativa do veículo com relação à água ( $v_r$ ) na equação (2.16). Desta forma, a velocidade da corrente no referencial inercial pode ser expressa por:

$$\boldsymbol{\nu}_r = \boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{\nu}_c \quad (2.23)$$

onde  $\boldsymbol{\nu}_c = [u_c \ v_c \ w_c \ 0 \ 0 \ 0]^T$  é um vetor irrotacional das velocidades da correnteza no referencial do veículo. Finalmente, a dinâmica do veículo com a corrente marinha constante e irrotacional é dada pelas equações diferenciais 2.24 e 2.25.

$$M\dot{\boldsymbol{\nu}}_r + \mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2.24)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu}_r + {}^E\boldsymbol{\nu}_c, \quad (2.25)$$

onde o vetor  ${}^E\boldsymbol{\nu}_c = [{}^E u_c \ {}^E v_c \ {}^E w_c \ 0 \ 0 \ 0]^T$  é a velocidade da corrente no referencial inercial.

## 2.4 Modelagem dos Propulsores

A modelagem do sistema propulsor é importante para a determinação dos empuxos gerados pela combinação vetorial dos mesmos (Goulart, 2007). A modelagem dos propulsores depende das particularidades do veículo a utilizar. Porém, a maioria dos veículos subaquáticos utilizam hélices acionados por motores de corrente contínua para realizar a propulsão (Fossen, 1994). Nesta seção será abordada a modelagem de propulsores com estas características.

### 2.4.1 Esforços de Propulsão

O empuxo ( $T$ ) e o torque ou momento axial ( $Q$ ) produzidos por cada propulsor são dados por (Hsu et al., 2000):

$$T = C_T(\sigma) \frac{\rho}{8} [v_w^2 + (0,7\pi nD)^2] \pi D^2 \quad (2.26)$$

$$Q = C_Q(\sigma) \frac{\rho}{8} [v_w^2 + (0,7\pi nD)^2] \pi D^3 \quad (2.27)$$

nestas equações,  $\sigma$  é definido por:

$$\sigma = \arctan \left( \frac{v_w}{0,7\pi nD} \right) \quad (2.28)$$

onde:

|               |   |
|---------------|---|
| $v_w$         | velocidade com que a água entra no hélice;    |
| $D$           | diâmetro do hélice;                           |
| $n$           | velocidade angular do hélice;                 |
| $\sigma$      | ângulo de avanço;                             |
| $\rho$        | massa específica da água;                     |
| $C_T(\sigma)$ | coeficiente de empuxo em função de $\sigma$ ; |
| $C_Q(\sigma)$ | coeficiente de torque em função de $\sigma$ . |

Considerando que, a velocidade de entrada da água no hélice ( $v_w$ ) é igual à componente da velocidade relativa do veículo, e que a parcela de propulsão associada à velocidade de entrada de água nos hélices é bem menor do que a parcela devida à rotação dos hélices, então  $\sigma = 0^\circ$ . Logo, as equações (2.26) e (2.27) podem ser escritas como:

$$T = T_{|n|n}|n|n \quad (2.29)$$

$$Q = Q_{|n|n}|n|n \quad (2.30)$$

onde:

$$T_{|n|n} = C_T(0^\circ)\rho(0, 7)^2\pi^3 D^4(1/8) \quad \text{é o coeficiente de empuxo;}$$

$$Q_{|n|n} = C_Q(0^\circ)\rho(0, 7)^2\pi^3 D^5(1/8) \quad \text{é o coeficiente de torque.}$$

sendo que nas equações (2.29) e (2.30) o fluxo axial de água nos hélices é negligenciado. Desta forma temos que os esforços de propulsão resultam em:

$$\boldsymbol{\tau}_{prop} = \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (2.31)$$

sendo  $\mathbf{u}$  um vetor de dimensões  $p \times 1$ , onde  $p$  o número de propulsores, cada elemento do vetor é expresso por  $u_i = |n_i|n_i$ ,  $\mathbf{B}$  é uma matriz de dimensões  $6 \times p$ , cujos elementos são distribuídos em função da localização de cada propulsor no veículo.

## 2.4.2 Dinâmica do Atuador

Para motores de corrente contínua, a dinâmica é descrita por (Fossen, 1994):

$$L_a \frac{di_a}{dt} = -R_a i_a - 2\pi K_m n + v_a \quad (2.32)$$

$$2\pi J_p \frac{dn}{dt} = T_m - Q \quad (2.33)$$

onde:

- $L_a$  é a indutância da armadura;  
 $R_a$  é a resistência de armadura;  
 $i_a$  é a corrente de armadura;  
 $v_a$  é a tensão da armadura;  
 $K_m$  é a constante eletromagnética do motor;  
 $J_p$  é a soma dos momentos de inércia do motor e do hélice;  
 $T_m$  é o torque do motor;  
 $Q$  é o torque resistente (equação (2.27)).

O termo  $L_a \frac{di_a}{dt}$  da equação (2.32) é desconsiderado pois a constante de tempo elétrica do motor é bem menor do que a constante de tempo mecânica (Hsu et al., 2000). Assim temos:

$$-R_a i_a - 2\pi K_m n + v_a = 0 \quad (2.34)$$

Em geral, para motores de imã permanente, o torque ( $T_m n$ ) é aproximadamente proporcional a corrente de armadura, desta forma o torque pode ser representado como:

$$T_m = K_m i_a \quad (2.35)$$

Por fim, pode-se representar a dinâmica dos propulsores na forma matricial por:

$$P \dot{\mathbf{n}} = \mathbf{T}_m - \mathbf{T}_r \quad (2.36)$$

onde:

- $P$  matriz diagonal contendo os momentos de inércia dos propulsores;  
 $\dot{\mathbf{n}}$  vetor de aceleração angular dos hélices;  
 $\mathbf{T}_m$  vetor de torques dos motores;  
 $\mathbf{T}_r$  vetor de torques resistentes.

### 2.4.3 Formulação da Matriz de Propulsão

A matriz de propulsão é uma característica que varia dependendo da arquitetura de cada veículo, pois a contribuição dada por cada propulsor ao movimento do veículo subaquático depende da posição e orientação do mesmo. Por isto cada veículo subaquático terá a sua própria matriz de propulsão  $B$  na qual estejam contidas estas informações. A forma de determinar a matriz  $B$  é descrita a seguir.

A contribuição de força de cada propulsor pode ser descrita por:

$$\mathbf{B}_F = \sum_{i=1}^p \mathbf{F}_{prop_i} T_{|n_i|n_i} \quad (2.37)$$

onde:

- $\mathbf{F}_{prop_i}$  contribuição de força de cada propulsor na origem de coordenadas do veículo ( $O$ );
- $p$  número de propulsores;
- $T_{|n_i|n_i}$  coeficiente de empuxo.

As forças de propulsão do veículo também produzem momentos em relação a origem do referencial do corpo, esses momentos podem ser descritos por (Goulart, 2007; Sokal, 2010):

$$\mathbf{B}_M = \sum_{i=1}^p \left[ Q_{|n_i|n_i} \mathbf{F}_{prop_i} + \mathbf{R}_{prop_i} \times (\mathbf{F}_{prop_i} T_{|n_i|n_i}) \right] \quad (2.38)$$

onde:

- $\mathbf{R}_{prop_i}$  é o vetor de posição do centro de empuxo de cada propulsor;
- $Q_{|n_i|n_i}$  coeficiente torque.

sendo

$$\mathbf{F}_{prop_i} = \begin{bmatrix} T_{x_i} \\ T_{y_i} \\ T_{z_i} \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_{prop_i} = \begin{bmatrix} E_{x_i} \\ E_{y_i} \\ E_{z_i} \end{bmatrix}, \quad (2.39)$$

podemos expandir  $\mathbf{B}_M$ , o que resulta em:

$$\mathbf{B}_M = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^p (T_{x_i} Q_{|n_i|n_i}) \\ \sum_{i=1}^p (T_{y_i} Q_{|n_i|n_i}) \\ \sum_{i=1}^p (T_{z_i} Q_{|n_i|n_i}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^p \left[ (E_{y_i} T_{z_i} - E_{z_i} T_{y_i}) T_{|n_i|n_i} \right] \\ \sum_{i=1}^p \left[ (E_{z_i} T_{x_i} - E_{x_i} T_{z_i}) T_{|n_i|n_i} \right] \\ \sum_{i=1}^p \left[ (E_{x_i} T_{y_i} - E_{y_i} T_{x_i}) T_{|n_i|n_i} \right] \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

compactando obtemos:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_F \\ \mathbf{B}_M \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

# Capítulo 3

## Controle Tolerante a Falhas

Os veículos subaquáticos têm o compromisso de estar preparados para funcionar em ambientes desestruturados e se recuperar de faltas que possam ocorrer (Podder et al., 2001). Um FTC constitui uma das principais formas de lidar com as faltas de um sistema, para que o este possa funcionar de maneira adequada mesmo na presença de faltas/falhas de algum dos seus componentes.

O FTC é definido por Blanke et al. (2003) como um conjunto de técnicas desenvolvidas para lidar com situações de falta de forma autônoma incrementando a disponibilidade da planta e reduzindo o risco de perigo. Este controle, de forma geral está dividido em duas categorias ou abordagens, o FTC ativo e o FTC passivo.

Este capítulo apresenta uma breve síntese dos princípios básicos do controles tolerantes a faltas. O capítulo começa com algumas definições e descrições dos diferentes tipos de faltas e falhas que podem ocorrer nos propulsores de um AUV. Logo, os diferentes tipos de controladores tolerantes a faltas são apresentados e finalmente são introduzidos os conceitos de controle de alocação e métodos existentes.

### 3.1 Faltas e Falhas

Para trabalhar com o FTC é importante ter uma visão clara dos diferentes estados indesejados ou não permitidos que os componentes de um sistema podem adquirir durante a operação. Na sequência serão apresentados os termos falta e falha.

De acordo com (Gustafsson, 2001; Omerdic and Roberts, 2004; Blanke et al., 2003) o Comitê Técnico da Federação Internacional de Controle Automático (em inglês *International Federation of Automatic Control* - IFAC) estabelece que uma falha é um desvio permanente da condição normal/aceitável de ao menos uma das características, propriedades ou parâmetros do sistema. Isto é, um componente do sistema está com falha quando este está tendo um comportamento inadequado de forma contínua.

Já uma falta, é uma interrupção permanente da habilidade do sistema de realizar a função requerida em condições específicas de operação. Em outras palavras, uma falta é uma avaria total de um componente do sistema.

Como pode ser deduzido dos parágrafos anteriores, a ocorrência de uma falta é uma situação muito mais severa que uma falha, pois, quando um componente do sistema apresenta uma falha, o componente pode ainda ser utilizado com algumas limitações. Por outro lado, quando uma falta ocorre outro componente deve tentar substituir o componente com falta.

Os tipos principais de faltas citados por Zhang and Jiang (2008) são:

**Travado no lugar:** ocorre quando um atuador fica travado, por exemplo, por falta de lubrificação;

**Flotante:** ocorre quando o componente move-se sem controle, por exemplo, pela perda de fluido hidráulico;

**Handover:** ocorre quando um componente funcionando fora de controle se movimenta na sua máxima velocidade até alcançar o seu limite;

**Perda da efetividade:** ocorre quando um componente não funciona da maneira nominal, perdas de precisão.

É interessante destacar que faltas e falhas podem ser categorizadas também em termos de tempo como:

**Abruptas:** são as que são notadas facilmente, pois produzem uma mudança súbita no comportamento do sistema;

**Incipientes:** são as que podem não ser percebidas de forma imediata. Estas faltas podem tornar-se gradualmente piores.

Para evitar mal-entendidos, nas seções seguintes para denominar as faltas e falhas de forma genérica será utilizado o termo *Falhas*.

## 3.2 Conceitos Básicos sobre Controle Tolerante a *Falhas*

De acordo com o Jiang and Yu (2012), os sistemas de FTC têm como principal objetivo preservar a estabilidade total do sistema e manter níveis de desempenho aceitáveis no caso de mal funcionamento de componentes do sistema. Estes tipos de controle podem lidar com *Falhas* de duas maneiras: antecipando as *Falhas* na etapa do projeto de controle, o que é denominado

FTC passivo; ou respondendo às *Falhas* em tempo real, reorganizando os elementos do sistema (geralmente redundantes) para realizar as funções de controle necessárias, FTC ativo.

No caso de um **FTC Ativo**, geralmente são necessárias as informações das *Falhas* que ocorrem no sistema, portanto frequentemente é requerido um esquema de FDD e um mecanismo de reconfiguração do controlador. O FDD permite obter o estado dos componentes do sistema em tempo real e o mecanismo de reconfiguração altera as entradas/saídas entre o controlador e a planta através de modificações na estrutura e nos parâmetros do controle. O FTC Ativo toma ações corretivas ativamente mediante o mecanismo de reconfiguração, que adapta o sistema de controle dependendo do tipo de *Falhas* do sistema. O controle baseado nesta arquitetura, geralmente, tem os seguintes objetivos de projeto de controle (Jiang and Yu, 2012):

1. Desenvolver um esquema de FDD que forneça informações sobre as *Falhas* de maneira oportuna e com o mínimo nível de incerteza ;
2. Realizar a reconfiguração do controle existente de forma efetiva de tal forma a atingir um desempenho aceitável;
3. Inserir o controlador reconfigurado de forma suave para minimizar os possíveis chaveamentos transitórios.

Este tipo de controle depende diretamente do tempo necessário para obter a informação da *Falha* do veículo, a precisão da informação, e o tempo para reconfigurar o novo esquema de controle. Nestes tipos de sistemas o processo de FDD depende da natureza das *Falhas*, os limites de incerteza e os algoritmos de FDD. De modo geral quando um sistema está com *Falhas* se torna instável, e o tempo que se dispõe para reagir às *Falhas* é limitado. Os FTCS são sistemas de tempo real de segurança crítica, isto é, se o tempo de reação real é maior que o tempo de reação crítica, o sistema entra em um estado não recuperável.

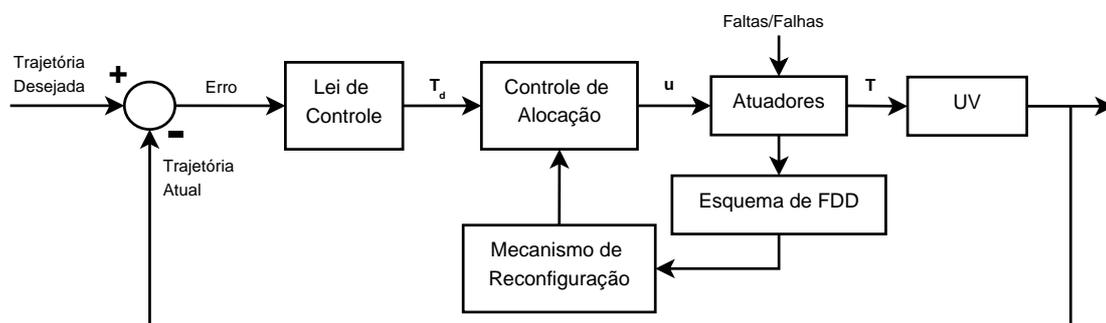


Figura 3.1: Estrutura geral de um FTC Ativo.

Por outro lado, o **FTC Passivo** é geralmente baseado nos conceitos de controle robusto, lida com as *Falhas* sem necessidade de um FDD nem de um mecanismo de reconfiguração do controlador. As condições de funcionamento normal e as possíveis *Falhas* são consideradas já na etapa de projeto de controle (Alwi et al., 2011).

Nos FTC Passivos o sistema utiliza as redundâncias do sistema sem que seja necessário utilizar nenhum ajuste dos parâmetros nem da estrutura do controle. Este controle tem como principal característica a simplicidade e compactação, e a capacidade de lidar o melhor possível com o conjunto de *Falhas* projetadas. O principal objetivo dos FTC passivos é a robustez do sistema de controle e a estabilidade, sem necessariamente garantir o melhor desempenho para qualquer situação de *Falhas* em específico Jiang and Yu (2012).

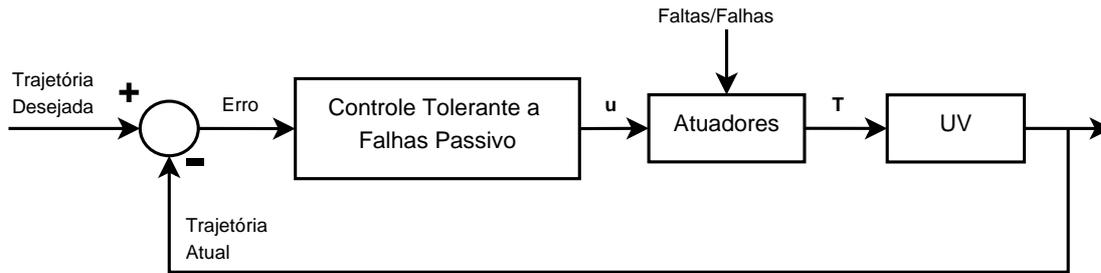


Figura 3.2: Estrutura geral de um FTC Passivo.

### 3.3 Arquiteturas do Sistema de FTC Ativo

Uma estrutura padrão de controle de malha fechada de um AUV é mostrada na Figura 3.1. No entanto, geralmente a tarefa de regulação é separada da tarefa de distribuição de controle (Härkegård and Glad, 2005). Então, o controle especifica somente a lei de controle que gera o controle total efetivo a ser produzido, e a distribuição do controle entre os atuadores é decidida pelo controle de alocação como pode ser observado na Figura 3.3.

Na primeira parte deste diagrama de blocos pode ser observado que o Controle Total Efetivo Desejado,  $T_d$  (vetor de forças e momentos de propulsão desejados), é gerado mediante a lei de controle. Logo, o Controle de Alocação se encarrega de distribuir a demanda de controle entre cada um dos atuadores, gerando o vetor de alocação de controle  $u$ . No sistema, os atuadores geram um Controle Total Efetivo  $T$ , que é utilizado como entrada da dinâmica do sistema do UV. A tarefa do controle de alocação é encontrar um conjunto de controle  $u$  para os atuadores, de tal forma que  $T = T_d$ .

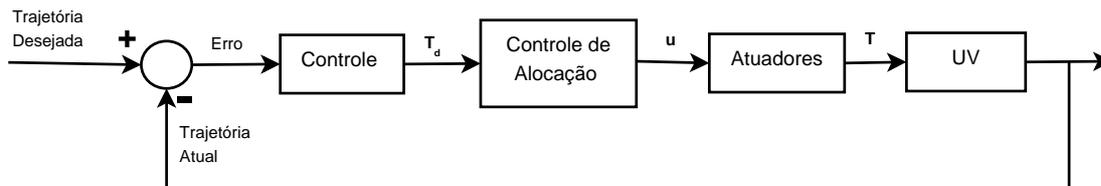


Figura 3.3: Estrutura padrão de controle de malha fechada de um AUV

Por outro lado, na figura 3.4 pode ser observada a estrutura do controle de malha fechada de FTC Ativo, com um FDD e um mecanismo de reconfiguração. Nessa estrutura, diferente da

estrutura padrão, quando uma falta é detectada pelo FDD o controle de alocação tem a capacidade de reconfigurar automaticamente as forças de propulsão entre os propulsores funcionais do veículo, para que este possa cumprir a sua missão.

Em geral, o algoritmo de alocação é o mesmo tanto para veículos remotamente operados (ROVs) como para veículos autônomos (AUVs), pois, como foi observado, desde o ponto de vista do controle de alocação, não é relevante como a lei de controle gera o vetor de forças e momentos de propulsão  $T_d$ .

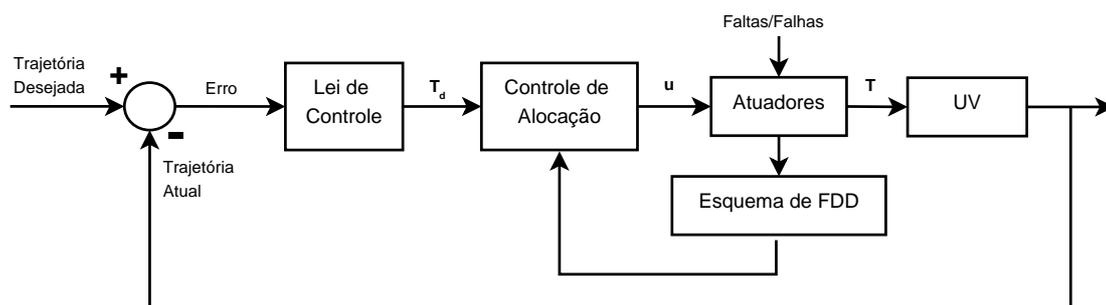


Figura 3.4: Estrutura de controle de malha fechada de um AUV com FDD e mecanismos de reconfiguração.

### 3.4 Diagnóstico e Detecção de Falhas

Propulsores são susceptíveis a diferentes tipos de *Falhas* durante a missão subaquática. Algumas dessas *Falhas* não são críticas e o propulsor é capaz de continuar a operação com o uso restringido, por exemplo, reduzir a velocidade máxima. Em outros casos, o propulsor deve ser desligado (Faltas) e a missão tem que ser continuada com os propulsores restantes operáveis.

O FDD é usado para monitorar os estados dos propulsores e informar qualquer defeito. As falhas dos propulsores são classificadas em duas classes principais:

- Falhas Internas: Exemplo de falhas internas são: temperatura dos enrolamentos está fora do intervalo, perda da comunicação entre o unidade de controle de propulsores e processador principal, queda da tensão do barramento, etc;
- Falhas Externas: Exemplo de falhas externas são: propulsores presos ou quebrados.

A principal função de uma FDD é detectar *Falhas*, e fornecer informações sobre estas para que um mecanismo de reconfiguração possa, mediante estas informações, minimizar os efeitos das *Falhas* no sistema. Segundo o Isermann (2006) basicamente o Diagnóstico e Detecção de Faltas (em inglês *Fault Diagnosis - FDD*) pode ser dividido em três etapas: detecção, isolamento e identificação da falha. Na detecção de *Falhas*, é determinado o tipo de *Falhas* presentes no

sistema (Ver 3.1). A isolação consiste na determinação do tipo, local e tempo da *Falha*. A identificação das *Falhas*, determina a magnitude em questões do tempo e do ambiente.

Podem ser citadas duas abordagens principais na modelagem dos sistemas (Omerdic and Roberts, 2004):

### **Baseados no Modelo Matemático**

São divididos em duas classes

1. Os que utilizam modelos quantitativos (equações diferenciais, funções de transferência, métodos de espaço de estados). São métodos baseados em modelos analíticos, ou seja, utilizam modelos matemáticos da planta para obter redundâncias analíticas. As faltas são detectadas e isoladas monitorando os parâmetros ou estados estimados. É baseado em estimação de parâmetros, estimação de estados ou espaço de paridade.
2. Os que utilizam modelos qualitativos (Inteligência artificial). São utilizados modelos qualitativos do processo para prever o comportamento do processo em condições normais e com faltas na operação. A detecção é feita comparando o comportamento predito com as observações atuais.

### **Não Baseados no Modelo Matemático**

Podem ser classificados como:

1. Métodos baseados no conhecimento: São baseados no conjunto de conhecimentos sobre a estrutura do processo, as funções das unidades de processo e os modelos qualitativos.
2. Técnicas de processamento de sinal: Não utilizam modelagem matemática. Utilizam ferramentas de estatística para analisar determinados sinais e detectar faltas no sistema.

## **3.5 Conceito de Controle de Alocação**

As terminologias e notações utilizadas nas publicações referentes ao controle de alocação geralmente dependem da natureza da aplicação para a que são utilizadas (Omerdic and Roberts, 2004). Com o objetivo de generalizar o problema de alocação em (Härkegård, 2003) é apresentada uma formulação genérica do problema do controle de alocação, que também é utilizada no livro de Omerdic and Roberts (2004). Na sequência serão apresentadas estas formulações para prover uma visão mais clara deste controle.

A tarefa do controle de alocação consiste em resolver um sistema de equações indeterminadas, normalmente restritas. A entrada para o controle de alocação é o controle total efetivo a ser produzido, denominado entrada de controle virtual  $\mathbf{v}(t) \in \mathbb{R}^k$ . A saída do controle de alocação é a entrada verdadeira de controle  $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^m$ , onde  $m > k$ .

Quando um conjunto de atuadores é acionado pelo vetor  $\mathbf{u}$ , gera o controle efetivo total  $\mathbf{v}_{sys}(t) \in \mathbb{R}^k$ .

Se o controle de alocação é bem-sucedido,  $\mathbf{v}_{sys} = \mathbf{v}$ . Matematicamente para um vetor dado  $\mathbf{v}(t) \in \mathbb{R}^k$  o vetor  $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^m$  deve ser encontrado de forma que

$$g(\mathbf{u}(t)) = \mathbf{v}(t) \quad (3.1)$$

onde  $g : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^k$  é o mapeamento da entrada de controle verdadeiro para a entrada de controle virtual, realizado pelo atuadores e o  $rank(jacobian(g)) = k$ . A maioria das publicações na área de controle de alocação considera um caso linear, para o qual tem a forma

$$\mathbf{B}\mathbf{u}(t) = \mathbf{v}(t) \quad (3.2)$$

onde  $\mathbf{B}$  é a matriz de controle efetivo de tamanho  $k \times m$  com rank  $k$ . As restrições da posição dos atuadores são dadas como um conjunto de desigualdades

$$\mathbf{u}_{min} \leq \mathbf{u}(t) \leq \mathbf{u}_{max} \quad (3.3)$$

Além disso, se existirem restrições de taxa de variação do atuador,  $\rho$ , este outro conjunto de desigualdades deve ser satisfeito:

$$\rho_{min} \leq \dot{\mathbf{u}}(t) \leq \rho_{max} \quad (3.4)$$

Como o controle de alocação é parte do sistema de controle digital, a derivação da equação anterior pode ser aproximada da seguinte forma:

$$\dot{\mathbf{u}}(t) \approx \frac{\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t - T)}{T} \quad (3.5)$$

onde  $T$  é o tempo de amostragem. Substituindo a equação (3.5) na equação (3.4), as restrições de taxa de variação são transformadas em conjuntos adicionais de restrições de posição.

$$T\rho_{min} + \mathbf{u}(t - T) \leq \mathbf{u}(t) \leq T\rho_{max} + \mathbf{u}(t - T) \quad (3.6)$$

Finalmente obtemos

$$\underline{\mathbf{u}}(t) \leq \mathbf{u}(t) \leq \bar{\mathbf{u}}(t) \quad (3.7)$$

onde

$$\begin{aligned}\underline{\mathbf{u}}(t) &= \max \{ \mathbf{u}_{min}, T \boldsymbol{\rho}_{min} + \mathbf{u}(t - T) \} \\ \bar{\mathbf{u}}(t) &= \min \{ \mathbf{u}_{max}, T \boldsymbol{\rho}_{max} + \mathbf{u}(t - T) \}\end{aligned}\quad (3.8)$$

A equação (3.2) restrita por (3.7) constitui a formulação padrão do problema de controle de alocação linear. Não tendo em conta a dependência do tempo, o problema padrão de controle de alocação linear restrito pode ser formulado como:

Para um determinado  $\mathbf{v}$  encontre  $\mathbf{u}$  tal que

$$\mathbf{B}\mathbf{u} = \mathbf{v} \quad (3.9)$$

e

$$\underline{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u} \leq \bar{\mathbf{u}} \quad (3.10)$$

A equação (3.9) define o conjunto de hiperplanos no espaço de controle verdadeiro  $\mathfrak{R}^m$ . A interseção destes hiperplanos é um conjunto convexo, denotado por  $\aleph$ . O conjunto de desigualdades (3.10) representa uma hipercaixa no mesmo espaço. Esta hipercaixa é denominada Subconjunto de Controle Restrito (admissível) e é denotado por  $\Omega$ . O conjunto de soluções  $\mathfrak{S}$  é dado pela interseção do  $\aleph$  e  $\Omega$ . Três casos são possíveis:

1.  $\mathfrak{S}$  é vazio (não existe solução);
2.  $\mathfrak{S}$  tem um elemento (solução única);
3.  $\mathfrak{S}$  tem mais de um elemento (mais de uma solução).

### 3.5.1 Técnicas de Controle de Alocação

O problema de controle alocação é abordado principalmente em (Bordignon, 1996; Härgård, 2003). É importante destacar que a maioria dos estudos realizados sobre controle de alocação foram desenvolvidos para o controle de aeronaves. Contudo, estes métodos são importantes na área de veículos subaquáticos pelas similaridades que possuem. Por exemplo, tanto no controle de alocação de veículos subaquáticos como nas aeronaves o número de efetores (propulsores) é maior do que os graus de liberdade.

Na sequência é apresentada uma síntese dos principais métodos de alocação revisados:

#### Métodos *Ad hoc*

A característica comum dos métodos ad hoc, é que o projetista do controle utiliza os conhecimentos da engenharia para atribuir os controles efetivos.

### Controle de Alocação Direta

Este método é baseado no conceito do Conjunto de Momentos Possíveis (em inglês *Attainable Moment Set* - AMS) que é o conjunto de vetores de todos os momentos que são alcançáveis tendo em consideração um conjunto de restrições de controle. Este método, apesar de ser computacionalmente caro, permite que o conjunto completo de momentos disponíveis seja utilizado. Além de que os métodos de solução atual para problemas de alocação de controle, embora às vezes computacionalmente simples, eram restritivos.

### Inversa generalizada (em inglês *Generalised Inverse* - GI)

Para sistemas com número igual de efetadores e objetivos, o método mais utilizado para resolver o problema de alocação de controle é inverter a matriz de efetividade de controle. A extensão desta abordagem para sistemas subdeterminados é utilizar uma matriz inversa generalizada. Uma matriz generalizada inversa de uma matriz  $\mathbf{B}$  é qualquer matriz  $\mathbf{P}$  que satisfaz:

$$\mathbf{BP} = \mathbf{I} \quad (3.11)$$

### Método da Conexão em Cadeia (DCM)

No caso geral, a abordagem GI padrão não é capaz de produzir controle admissível para todos os AMS. Isto significa que existe energia de controle disponível para melhorar a precisão da solução, mesmo quando alguns efetores estão saturados. Por exemplo: em vez de usar qualquer uma das duas abordagens GI, é possível encontrar uma solução ainda melhor, que usa essa energia adicional. A idéia principal do método em cadeia é o particionamento de efetores de controle em dois grupos, com esquema de priorização, onde um segundo conjunto de efetores só é usado quando o primeiro conjunto é incapaz de atender as demandas. A Figura 3.5 mostra que o primeiro conjunto controle de alocação  $u_1$  e em seguida um conjunto secundário  $u_2$  (opcional) é alocado usando o objetivo residual

$$y_{d2} = y_d - \mathbf{B}u_1 \quad (3.12)$$

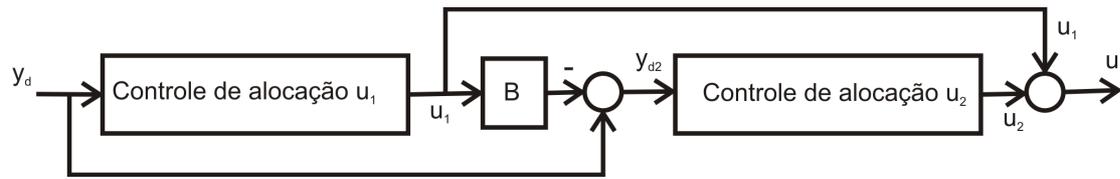


Figura 3.5: Método de alocação conexão em cadeia.

# Capítulo 4

## Lógica Nebulosa e Controladores Nebulosos

Para a compreensão da lógica nebulosa, faz-se necessária uma discussão sobre conjuntos nebulosos que foram desenvolvidos por Zadeh (1965). Estes conjuntos geralmente são mais adequados para manipular o pensamento humano, tipicamente representado por termos linguísticos, tais como: quente, frio, alto e baixo.

Após a concepção da lógica nebulosa, esta lógica foi aplicada em sistemas de controle. Hoje, a lógica nebulosa é difundida em vários países, onde suas aplicações vão desde máquinas de lavar e câmeras, até o controle autônomo de helicópteros (Passino and Yurkovich, 1998).

Na sequência serão apresentados os conceitos básicos dos conjuntos nebulosos e controle nebuloso.

### 4.1 Conceitos da Lógica Nebulosa

Na matemática os conjuntos são definidos como uma coleção de objetos que possuem uma ou mais características em comum. Os objetos que pertencem a um conjunto são chamados de membros ou elementos do conjunto. Ainda na teoria clássica de conjuntos, um conjunto é denotado também como conjunto *crisp* e pode ser descrito por funções características como segue:

$$\mu_c : U \longrightarrow \{0, 1\} \quad (4.1)$$

onde  $U$  é denominado universo de discurso, por exemplo, uma coleção de elementos que podem ser contínuos ou discretos. Em um conjunto *crisp*, cada elemento do universo de discurso pertence ao conjunto *crisp* ( $\mu_c = 1$ ), ou não ( $\mu_c = 0$ ). Considere uma função característica  $\mu_{c_{quente}}$  representando o conjunto *crisp* quente, um conjunto com todas as temperaturas “quentes”. A figura 4.1 descreve este conjunto *crisp*, considerando temperaturas maiores que 40° C como quentes.

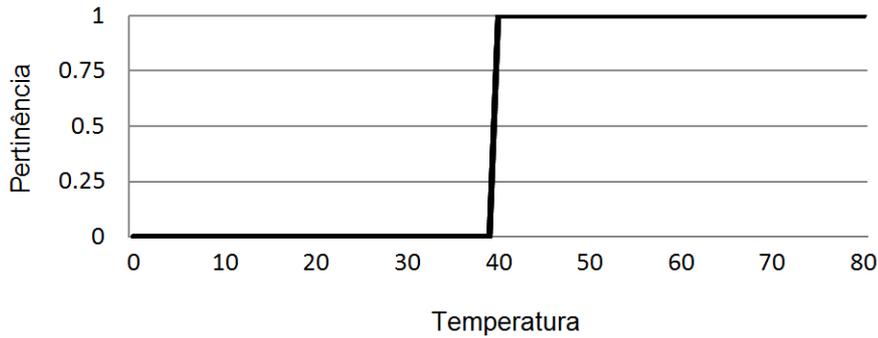


Figura 4.1: Conjunto *crisp* temperatura.

Um conjunto nebuloso estende a pertinência binária  $\{0, 1\}$  de um conjunto convencional para um espectro num intervalo  $[0, 1]$ . Além disso, diferentemente de um conjunto convencional, todos os elementos do conjunto universo  $U$  são membros de um dado conjunto  $A$ . Portanto, para cada elemento  $x \in U$ .

$$0 \leq \mu_A(x) \leq 1. \quad (4.2)$$

Neste caso, os elementos do universo de discurso pode pertencer ao conjunto nebuloso com qualquer valor entre 0 e 1. Este valor é chamado de grau de pertinência. Se um elemento tem um valor próximo de 1, o grau de pertinência, ou valor verdade é alto. A função que caracteriza um conjunto nebuloso é chamada de função de pertinência, a qual oferece um grau de pertinência para cada elemento de um universo de discurso. Como exemplo, admita que a função característica  $\mu_{quente}$  seja considerada, a qual expressa a opinião humana, por exemplo, que  $37^\circ$  C seja um pouco quente, e que  $38^\circ$  C seja quente, mas não tão quente quanto  $40^\circ$  C ou maior. O resultado desta indagação é um transição gradual de uma pertinência (completamente verdadeira) para uma não pertinência (completamente falsa). A Figura 4.2 mostra a função de pertinência  $\mu_{quente}$  para o conjunto nebuloso quente.

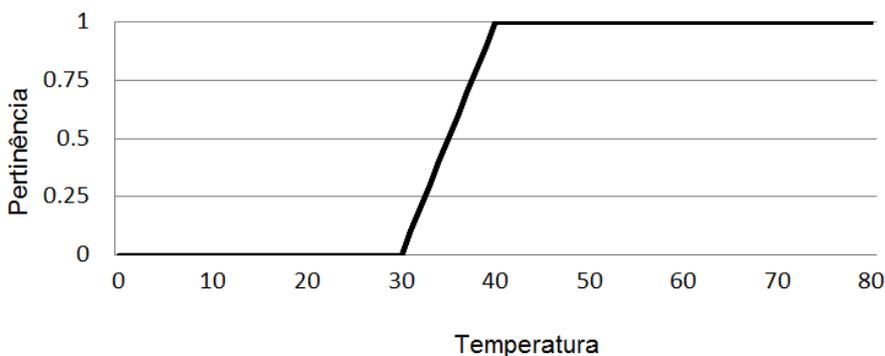


Figura 4.2: Conjunto nebuloso da temperatura.

Então podemos dizer que um conjunto nebuloso é um conjunto de pares ordenados dados por:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) : x \in X\} \quad (4.3)$$

onde  $X$  é um conjunto universo de objetos (também chamado de universo de discurso) e  $\mu_A(x)$  é o grau de pertinência do objeto  $x$  em  $A$ . Usualmente,  $\mu_A(x)$  está localizado num intervalo de  $[0, 1]$ . Vale ressaltar que certos autores relaxam o intervalo de pertinência de  $[0, 1]$  para  $[0, R_{max}]$ , onde  $R_{max}$  é um número real finito positivo.

## 4.2 Função de Pertinência

Uma função de pertinência  $\mu_A(x)$  é caracterizada pelo seguinte mapeamento:

$$\mu_A : x \longrightarrow [0, 1], x \in X \quad (4.4)$$

onde  $x$  é um numero real que descreve um objeto ou seu atributo,  $X$  é o universo de discurso e  $A$  é um subconjunto de  $X$ . As funções de pertinência assumem diversas formas sendo as mais utilizadas as triangulares e as trapezoidais. Estas duas funções são descritas com mais detalhe na sequência.

### 4.2.1 Função de Pertinência Triangular

Como se observa na Figura 4.3, esta função utiliza três parâmetros  $(a, b, c)$ , mais a variável de entrada a ser nebulizada:

$$triangular(x, a, b, c) = \max \left( \min \left( \frac{(x - a)}{(b - a)}, \frac{(c - x)}{(c - b)} \right), 0 \right) \quad (4.5)$$

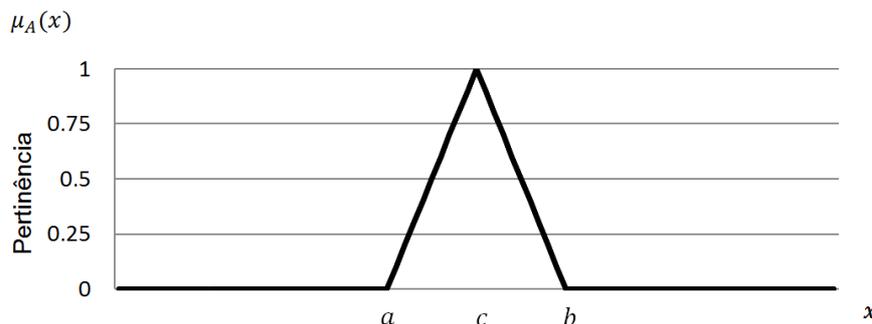


Figura 4.3: Função de pertinência triangular.

### 4.2.2 Função de Pertinência Trapezoidal

Como pode-se observar na Figura 4.4, esta função utiliza quatro parâmetros  $(a, b, c, d)$ , mais a variável de entrada a ser nebulizada:

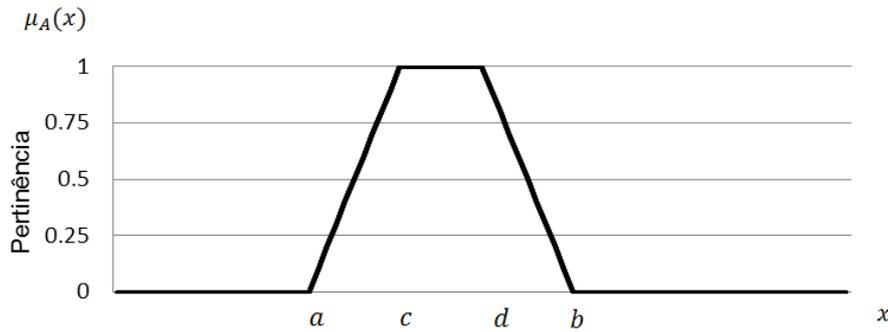


Figura 4.4: Função de pertinência trapezoidal.

$$\text{trapezoidal}(x, a, b, c, d) = \max \left( \min \left( \frac{(x-a)}{(b-a)}, 1, \frac{(d-x)}{(d-c)} \right), 0 \right) \quad (4.6)$$

### 4.2.3 Função de Pertinência Sigmoide

Uma função de pertinência sigmoide é definida pela equação (4.7)

$$\text{sigmoide}(x, a, c) = \frac{1}{1 + \exp[-a(x-c)]} \quad (4.7)$$

onde  $a$  controla a inclinação no ponto de cruzamento  $x = c$ . Dependendo do sinal do parâmetro  $a$ , a função de pertinência sigmoide pode ser aberta para a direita ou para esquerda. É geralmente utilizada para representar conceitos como por exemplo: “muito grande” ou “muito negativo”. Funções sigmoides são amplamente utilizadas na ativação de funções.

## 4.3 Operações Básicas de Conjuntos

O uso dos operadores básicos permite determinar o grau de pertinência de cada ponto em relação a um conjunto nebuloso, onde um valor perto de 0 (zero) significa que o valor não pertence ao conjunto, e valor próximo de 1 (um) significa que o valor pertence a aquele conjunto. Desta maneira, um item pode ou não pertencer a um conjunto. Na Tabela 4.1 podem ser observados as principais operações sobre conjuntos.

Tabela 4.1: Operações básicas de conjuntos

| Nome da Operação | Crisp      | Nebuloso                   |
|------------------|------------|----------------------------|
| União            | $A \cup B$ | $\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$ |
| Intersecção      | $A \cap B$ | $\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$ |
| Complemento      | $\neg A$   | $1 - \mu_A(x)$             |

## 4.4 Controle Nebuloso

O controle nebuloso permite utilizar uma estratégia de controle na forma de regras linguísticas que definem a estratégia de controle desejada. Um controlador nebuloso pode ser dividido em quatro componentes, os quais são, unidade de nebulização, base de regras e base de dados (base de conhecimentos), unidade de inferência (unidade de tomada de decisões) e unidade de concentração (Passino and Yurkovich, 1998).

A unidade de nebulização transforma os dados medidos em conjuntos nebulosos. A base de conhecimentos consta de uma base de regras e uma base de dados. Esta unidade tem o conhecimento sobre o sistema físico a ser controlado. A unidade de tomada de decisão define como o sistema deve fazer as inferências utilizando as regras nebulosas contidas na base de regras. A unidade de concentração adiciona as saídas de todas as regras que foram acionadas por uma entrada em particular do conjunto nebuloso, para produzir uma saída *crisp*.

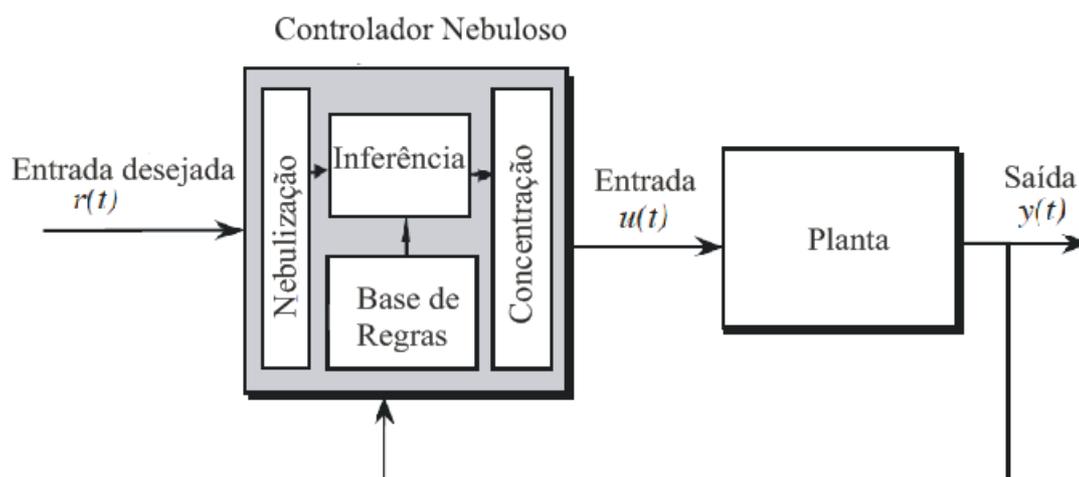


Figura 4.5: Arquitetura de um controlador nebuloso (Passino and Yurkovich, 1998).

### 4.4.1 Nebulização

A nebulização é o mapeamento do domínio de valores numéricos reais, para valores nebulosos, definidos pelas funções de pertinência.

### 4.4.2 Base de Regras

Contem a quantidades nebulosas das descrições dos especialistas. Na base de Regras ficam armazenadas as definições sobre a concentração e normalização dos universos de discurso,

e as definições das funções de pertinência dos termos nebulosos.

A base de regras é formada por estruturas do tipo:

**Se** condição **Então** conclusão

ou seja,

**Se**  $x$  é  $A$  **Então**  $B$

onde  $A$  e  $B$  são valores ou expressões linguísticas definidas por conjuntos nebulosos com universos de discurso  $X$  e  $Y$  respectivamente. Essas regras, são regras linguísticas, geralmente são armazenadas em forma de matrizes.

Em um dado controlador nebuloso, é importante que existam tantas regras quantas forem necessárias para mapear totalmente as combinações dos termos das variáveis, isto é, que a base seja completa, garantindo que exista sempre ao menos uma regra a ser disparada para cada entrada. Também são essenciais as consistências, onde procura-se evitar a possibilidade de contradições e inconsistências entre as regras gerenciadas pela função de implicação.

As premissas são relacionadas pelos conectivos lógicos, dados pelo operador de conjunção (e) e o operador de disjunção (ou). Em geral, as regras tem a forma de um sistema de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (MIMO), mas que pode ser transformado em vários sistemas com Múltiplas Entradas e uma Saída (MISO). Por exemplo, a regra MIMO:

**Se**  $x_1$  é  $A_1$  e . . . e  $x_n$  é  $A_n$

**Então**  $y_1$  é  $C_1$  e . . . e  $y_m$  é  $C_m$

equivalente a  $m$  regras MISO:

**Se**  $x_1$  é  $A_1$  e . . . e  $x_n$  é  $A_n$

**Então**  $y_j$  é  $C_j$

Depois de disparar as regras, cada uma delas terá um grau de pertinência associado, este valor será então utilizado para calcular a saída desta regra.

### 4.4.3 Sistema de Inferência

Emula a tomada de decisão dos especialistas, interpretando e aplicando conhecimentos sobre o controle da planta. Isto é realizado mediante a avaliação das variáveis antecedentes pelas regras de controle definidas na base de regras. Este processo é realizado nas seguintes etapas:

- Identificar os valores correspondentes aos graus de pertinência dos termos linguísticos correspondentes às antecedentes.
- Determinar a força das conclusões de cada regra disparada;
- Definir a saída nebulosa.

Desta forma, quando um controlador recebe uma entrada discreta, por exemplo 20 graus, o processo de nebulização pode indicar que a entrada tem um grau de pertinência 0,5 para o termo linguístico CALOR e de 0,5 para o termo linguístico FRIO, e se houver uma outra entrada discreta, este realizará o mesmo procedimento. Depois, as regras relacionadas aos valores linguísticos obtidos são acionadas e, seguidamente, cada uma das regras terá um grau de pertinência associado, este valor será então utilizado para calcular a saída desta regra. Assim, no final um segmento de área será obtido como valor de saída para cada uma das regras disparadas.

E necessário juntar essas saídas todas em um único valor para que seja concentrado e seja retornada uma resposta ao sistema.

Existem 3 tipos de mecanismos de inferência para agrupar esses segmentos de área: Agregação, Ativação e Acumulação. Na Agregação o resultado será a união desses valores usando o operador AND. Na Ativação o resultado será o produto (interseção) desses valores usando o operador MIN, e na Acumulação o resultado será a soma de todos segmentos de área usando o operador MAX.

#### 4.4.4 Concentração

Converte os resultados do sistema de inferência em entradas para o processo. Na concentração o valor das variáveis linguísticas de saída seria traduzido para um valor numérico discreto, com o objetivo de obter-se o melhor valor que represente o valor desejado.

Nos controladores nebulosos a interface de concentração é utilizada para obter uma única ação de controle precisa, a partir do conjunto nebuloso. O procedimento compreende a identificação do domínio das variáveis de saída num correspondente universo de discurso e com a ação de controle nebulosa inferida evolui-se para uma ação de controle não nebulosa.

A seleção do método está diretamente relacionada com as características do processo controlado e o comportamento de controle necessário. Abaixo são citados os métodos mais utilizados:

- **Centro de Gravidade:** Consiste na técnica do cálculo do centroide de figuras planas, este cálculo é baseado na região resultante da agregação de todas as regras;
- **Centro da área ou Método do Centroide (CA):** o valor do controle é o valor do universo que corresponde ao centro de gravidade do conjunto nebuloso;

- **Método da Média do Máximo (MM):** o valor da saída é obtido tomando a média entre os elementos extremos no universo que correspondem aos maiores valores da função de pertinência do conjunto nebuloso de saída.

#### 4.4.5 Tipos de Controladores Nebulosos

Os modelos diferem quanto à forma de representação dos termos na condição (premissa), quanto à representação das ações de controle e quanto aos operadores utilizados para implementação do controlador. Os modelos de Mamdani e de Larsen, Takagi-Sugeno e o de Tsukamoto são os tipos de controladores nebulosos mais encontrados na literatura.

##### Modelos de Mamdani e de Larsen

Foi proposto como a primeira tentativa de inferência nebulosa, para controlar um motor a vapor e uma caldeira, por meio de regras de controle linguísticas obtidas a partir de especialistas humanos. Foram determinadas duas entradas  $x$  e  $y$ , e uma saída  $z$ . De forma geral, estas estratégias são computacionalmente muito intensivas e não existe uma forma rigorosa de analisá-las, a não ser através de estudos experimentais.

Uma desvantagem dos modelos linguísticos, como o modelo de Mamdani, é que os mesmos não contém uma forma explícita do conhecimento objetivo sobre o sistema se tal conhecimento não poder ser expresso ou incorporado na estrutura do conjunto nebuloso.

##### Modelo Takagi-Sugeno-Kang

No modelo Takagi-Sugeno-Kang (TSK) as regras antecedentes descrevem regiões difusas no espaço de entrada (como no modelo linguístico) e as regras consequentes são funções exatas do modelo de entradas. O método de raciocínio de TSK que é associada com uma base de regras de formato especial com a parte consequente sendo funcional ao invés de nebulosa como usado nos modelos linguísticos.

Com esse modelo de saída de um número real exato, o conjunto nebuloso concentrado de inferência será um conjunto nebuloso concentrado com um número finito de pontos, simplificando os cálculos envolvidos no processo computacional, elevando sua eficiência de processamento.

# Capítulo 5

## Fundamentos do Projeto de Controle

Neste capítulo apresentam-se as considerações para o desenvolvimento do controle de alocação de propulsores na, presença de faltas, de um veículo submarino baseado na técnica de lógica nebulosa.

### 5.1 Veículo Subaquático Utilizado

O veículo utilizado para realizar as simulações é o *Biointeractive “BA-1”* (Choi and Kondo, 2010; Kondo et al., 2010) (figura 5.1 e figura 5.2). Este veículo foi desenvolvido para monitorar o entorno marinho, e realizar o estudo dos hábitos alimentares dos peixes. O BA-1 tem cinco graus de liberdade (avanço, deriva, afundamento, arfagem, e guinada). A distância vertical do centro de massa e o centro de flutuação estabilizam de forma automática o movimento de balanço do veículo.



Figura 5.1: Veículo utilizado para nas simulações (Kondo et al., 2010)

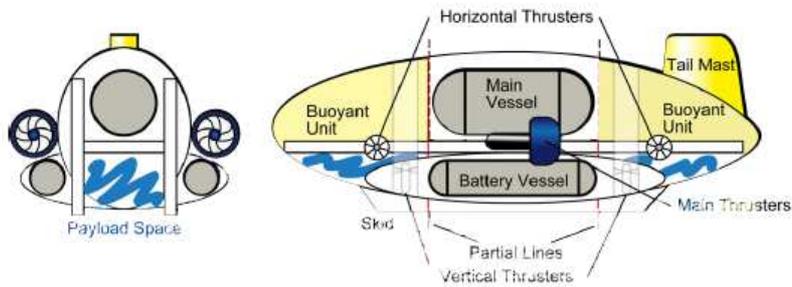


Figura 5.2: Veículo utilizado para nas simulações esquema geral (Kondo et al., 2010)

Este veículo possui forma de torpedo e tem em total 6 propulsores fixos; isto é, não podem ser rotacionados; responsáveis pelos movimentos do veículo, como pode ser observado na figura 5.2. As suas características físicas são descritas na tabela 5.1

Tabela 5.1: Características Físicas do BA-1.

| <i>Especificações do BA-1</i>         |                        |
|---------------------------------------|------------------------|
| Profundidade de operação              | 1000 m de profundidade |
| Comprimento                           | 3 m                    |
| Largura                               | 1 m                    |
| Altura                                | 0.9 m                  |
| Peso                                  | 430 Kg                 |
| Propulsores para movimento horizontal | 4 propulsores          |
| Propulsores para movimento vertical   | 2 propulsores          |

## 5.2 Configuração dos Propulsores

Devido às características físicas do veículo e às baixas velocidades em que este opera, o seu sistema de propulsão pode ser dividido em dois subsistemas, um horizontal (ver figura 5.3) e outro vertical (ver figura 5.4).

Os propulsores verticais, P5 e P6, permitem realizar os movimentos de afundamento e arfagem. Os propulsores horizontais: P1, P2, P3 e P4; permitem o movimento nos eixos  $x$  e  $y$  e o movimento rotacional no eixo  $z$ .

Na tabela 5.2 pode-se observar as possíveis combinações de propulsores que permitem que o BA-1 realize movimentos no plano horizontal e vertical. Percebe-se como qualquer combinação de pares de propulsores horizontais pode produzir o movimento rotacional em  $z$ .

Por outra parte na tabela 5.3, pode ser observada a convenção de sinais das correntes de entrada dos propulsores e os seus respectivos sentidos de giro. Assim, por exemplo, se um movimento de translação no eixo  $x$  positivo é desejado, o sinal da corrente requerida para os

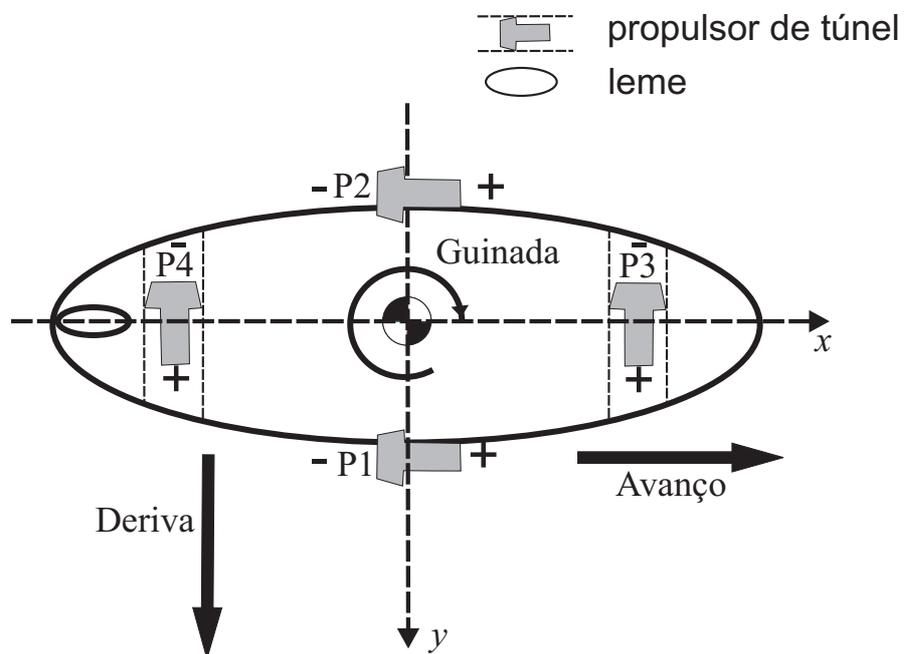


Figura 5.3: Movimentos horizontais - vista superior (o propulsor 1 - P1 está posicionado no estibordo (boreste); o propulsor 2 - P2 está posicionado no bombordo; o propulsor 3 - P3 está posicionado na proa; o propulsor 4 - P4 está posicionado na popa.)

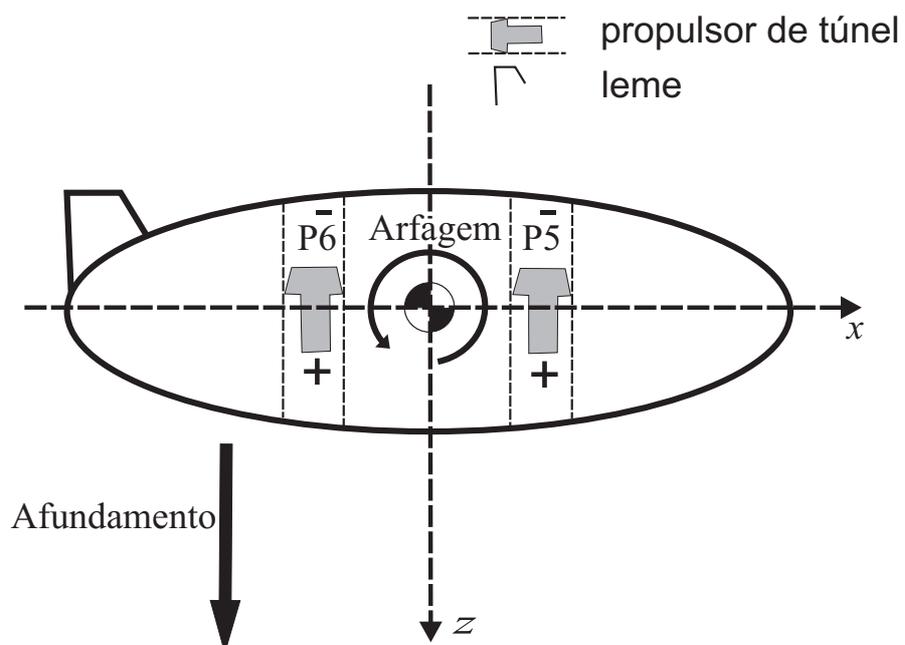


Figura 5.4: Movimentos verticais - vista lateral (o propulsor 5 - P5 e o propulsor 6 - P6 estão posicionados verticalmente no veículo)

Tabela 5.2: Conjunto de propulsores para cada direção.

| <i>Movimento</i>     | <i>Conjunto de propulsores por movimento</i> |
|----------------------|--|
| Translacional em $x$ | (P1,P2)                                      |
| Translacional em $y$ | (P3,P4)                                      |
| Translacional em $z$ | (P5,P6)                                      |
| Rotacional em $x$    | Este movimento não é controlado ativamente   |
| Rotacional em $y$    | (P5,P6)                                      |
| Rotacional em $z$    | (P1,P2,P3,P4)                                |

Tabela 5.3: Direção do movimento para uma corrente.

| <i>Propulsor</i> | <i>Sentido de giro</i> | <i>Sinal da corrente de entrada</i> |
|------------------|------------------------|-------------------------------------|
| P1               | anti-horário           | positivo                            |
| P2               | horário                | positivo                            |
| P3               | horário                | positivo                            |
| P4               | anti-horário           | positivo                            |
| P5               | anti-horário           | positivo                            |
| P6               | horário                | positivo                            |

propulsores P1 e P2 será positivo. Na figura 5.3 e na figura 5.4 podem ser vistos que cada propulsor tem um sinal negativo e positivo para indicar o sentido da propulsão correspondente a cada sinal.

### 5.3 Problema de Controle de Alocação do BA-1

Neste trabalho serão considerados somente o controle de alocação de propulsores horizontais do veículo, pois este é o subsistema mais complexo do BA-1.

Para analisar este controle, considera-se a relação existente entre o vetor de forças generalizadas,  $\tau$ , e o vetor de forças dos propulsores,  $T$ , como:

$$\tau = BT \quad (5.1)$$

onde  $B$  é a matriz de configuração dos propulsores, e seus elementos são determinados pela posição geométrica dos propulsores do veículo.

Transformando a equação (5.1) em função aos propulsores horizontais do BA-1, o vetor de forças e momentos que atuam no veículo no plano horizontal pode ser descrito pela equação (5.2) como:

$$\tau_{horizontal} = B_{horizontal}T_{horizontal} \quad (5.2)$$

onde  $\tau_{horizontal}$  é composto pela força na direção  $x$  denominada  $\tau_x$ , a força na direção  $y$  denominada  $\tau_y$ , e o momento no eixo  $z$  denominado  $\tau_\psi$ ; como pode ser observado na sequência:

$$\tau_{horizontal} = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_\psi \end{bmatrix}$$

O vetor  $T_{horizontal}$  é o vetor das forças individuais dos propulsores horizontais dado por:

$$T_{horizontal} = \begin{bmatrix} T_{P1} \\ T_{P2} \\ T_{P3} \\ T_{P4} \end{bmatrix}$$

onde  $T_{P1}$ ,  $T_{P2}$ ,  $T_{P3}$  e  $T_{P4}$  correspondem às forças dos propulsores P1, P2, P3 e P4 respectivamente.

A matriz de configuração dos propulsores horizontais do veículo,  $B_{horizontal}$ , é dada por:

$$B_{horizontal} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -a & a & b & -b \end{bmatrix}$$

onde  $a$  é a distancia horizontal entre o centro do veículo e eixo dos propulsores P1 e P2, e  $b$  é a distancia horizontal entre o centro do veículo e os propulsores P3 e P4.

Pode-se observar que a matriz  $B_{horizontal}$  é não quadrada, e por conseguinte não invertível. Isto é devido a que o subsistema de propulsão horizontal é sobre-atuado, 4 propulsores para 3 graus de liberdade. Por isto, para poder encontrar a inversa da matriz  $B_{horizontal}$  é necessário utilizar a pseudo-inversa desta matriz.

Então a equação (5.2) pode ser re-escrita da seguinte forma (equação (5.3)):

$$T_{horizontal} = B_{horizontal}^* \tau_{horizontal} \quad (5.3)$$

onde  $B_{horizontal}^*$  é a pseudo-inversa da matriz  $B_{horizontal}$ , a qual é obtida mediante a equação (5.4),

$$B_{horizontal}^* = B_{horizontal}^T (B_{horizontal} B_{horizontal}^T)^{-1} \quad (5.4)$$

Da mesma forma, podem ser adicionados pesos para cada propulsor utilizando a equação (5.5):

$${}^W B_{horizontal}^* = W^{-1} B_{horizontal}^T (B_{horizontal} W^{-1} B_{horizontal}^T)^{-1} \quad (5.5)$$

onde  $W$  é a matriz diagonal de pesos correspondentes aos propulsores horizontais, dada por

$$W = \text{diag}(w_1, w_2, w_3, w_4)$$

sendo  $w_1, w_2, w_3, w_4$  os pesos dos propulsores P1, P2, P3 e P4 respectivamente. Se é desejado que todos os propulsores tenham igual peso, esta matriz é uma matriz identidade.

Uma condição para a utilização desta técnica de alocação de propulsores é que pelo menos três propulsores horizontais funcionem corretamente.

## 5.4 Análise das situações de falta de propulsores

Na sequência será analisado o comportamento do veículo BA-1 nas possíveis situações de falta dos propulsores, tendo em consideração as características do veículo mencionadas na seção 5.1 e 5.2 as quais foram separadas em dois casos: Caso 1 - Falta de um Propulsor; Caso 2 - Falta de dois Propulsores.

### 5.4.1 Caso 1 - Falta de um Propulsor

Em situação de falta de um propulsor os movimentos nos distintos graus de liberdade podem ser obtidos com os restantes propulsores operativos, segundo a tabela 5.4 ou a tabela 5.5

Tabela 5.4: Conjunto de propulsores para cada direção em caso de falta do P1 e P2.

| <i>Movimento</i>     | <i>Conjunto de propulsores por movimento - Falta do P1</i> | <i>Conjunto de propulsores por movimento - Falta do P2</i> |
|----------------------|--|--|
| Translacional em $X$ | (P2,P3,P4)   | (P1,P3,P4)   |
| Translacional em $Y$ | (P3,P4)  | (P3,P4)  |
| Translacional em $Z$ | (P5,P6)  | (P5,P6)  |
| Rotacional em $X$    | movimento não controlado                                   | movimento não controlado                                   |
| Rotacional em $Y$    | (P5,P6)  | (P5,P6)  |
| Rotacional em $Z$    | (P2,P3,P4)   | (P1,P3,P4)   |

Tabela 5.5: Conjunto de propulsores para cada direção em caso de falta do P3 e P4.

| <i>Movimento</i>     | <i>Conjunto de propulsores por movimento - Falta do P3</i> | <i>Conjunto de propulsores por movimento - Falta do P4</i> |
|----------------------|--|--|
| Translacional em $X$ | (P1,P2)  | (P1,P2)  |
| Translacional em $Y$ | (P1,P2,P4)   | (P1,P2,P3)   |
| Translacional em $Z$ | (P5,P6)  | (P5,P6)  |
| Rotacional em $X$    | movimento não controlado                                   | movimento não controlado                                   |
| Rotacional em $Y$    | (P5,P6)  | (P5,P6)  |
| Rotacional em $Z$    | (P1,P2,P4)   | (P1,P2,P3)   |

Das tabelas 5.4 e 5.5 pode ser percebido que o veículo é capaz de produzir qualquer movimento, ainda se um propulsor horizontal está com falta.

Então o controle de alocação dos propulsores horizontais, neste caso, é obtido mediante a reconstrução da matriz de configuração dos propulsores  $B_{horizontal}$ . Devido à redundância dos propulsores, ao eliminar a coluna correspondente ao propulsor com falta na matriz  $B_{horizontal}$ , esta é reduzida a uma matriz  $3 \times 3$ . Assim, a matriz  $B_{horizontal}$  se torna uma matriz quadrada, não singular, inversível que pode ser utilizada na equação (5.2).

### 5.4.2 Caso 2 - Falta de dois Propulsores

Quando dois propulsores têm falta, não é possível realizar o procedimento citado na seção 5.4.1, pois ao eliminar duas colunas correspondentes aos propulsores com falta da matriz

$B_{horizontal}$ , esta se torna não invertível.

Assim, neste caso existe maior quantidade de graus de liberdade do que propulsores operativos, 3 graus de liberdade (avanço, deriva e guinada) e 2 propulsores operativos. Portanto, necessariamente o veículo perde um grau de liberdade horizontal nesta situação.

Dependendo de que propulsor está com falta, pode-se dividir este controle como:

- Faltas nos propulsores relacionados ao mesmo grau de liberdade;
- Faltas nos propulsores (P1, P3) ou (P1, P4) ou (P2, P3) ou (P2, P4).

### Faltas em propulsores relacionados ao mesmo grau de liberdade

Neste caso, para que o veículo consiga completar a missão, ou pelo menos retornar de forma segura para a superfície, duas situações são possíveis:

#### Se os propulsores P1 e P2 têm falta

Quando os propulsores P1 e P2 têm falta, os propulsores P3 e P4 podem controlar os movimentos de deriva e guinada. Porém, como pode ser observado na figura 5.5, o veículo fica impossibilitado de realizar movimento de translação em  $x$  na sua posição normal.

Para realizar uma trajetória em  $x$ , o BA-1 deve realizar um movimento de guinada de  $90^\circ$  e avançar na sua deriva. Isto ocasiona que os propulsores P3 e P4 precisem de uma propulsão muito maior para realizar o recorrido desejado em  $x$ , devido ao maior arrasto hidrodinâmico do veículo, como também pode ser observado na figura 5.5.

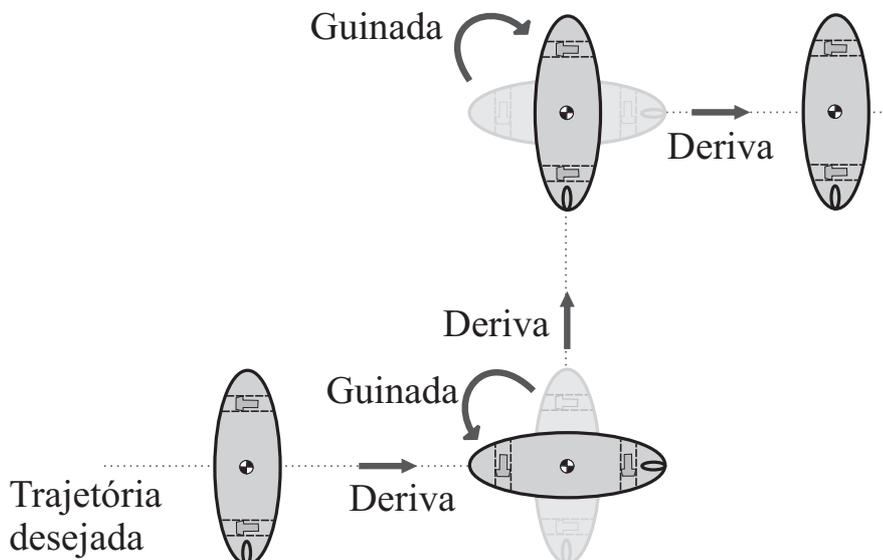


Figura 5.5: Seguimento de uma trajetória horizontal com faltas no P1 e P2 do BA-1.

### Se os propulsores P3 e P4 têm falta

Quando os propulsores P3 e P4 têm falta, os propulsores P1 e P2 podem controlar os movimentos de avanço e guinada. Como estes são os movimentos principais do BA-1, esta situação não proporciona maiores inconvenientes no seguimento de trajetórias do veículo. Porém o veículo fica impossibilitado de realizar o movimento translacional em  $y$ , por isto ele deve realizar um movimento de guinada de  $90^\circ$  e seguir a trajetória desejada em direção  $y$ , como pode ser observado na figura 5.6.

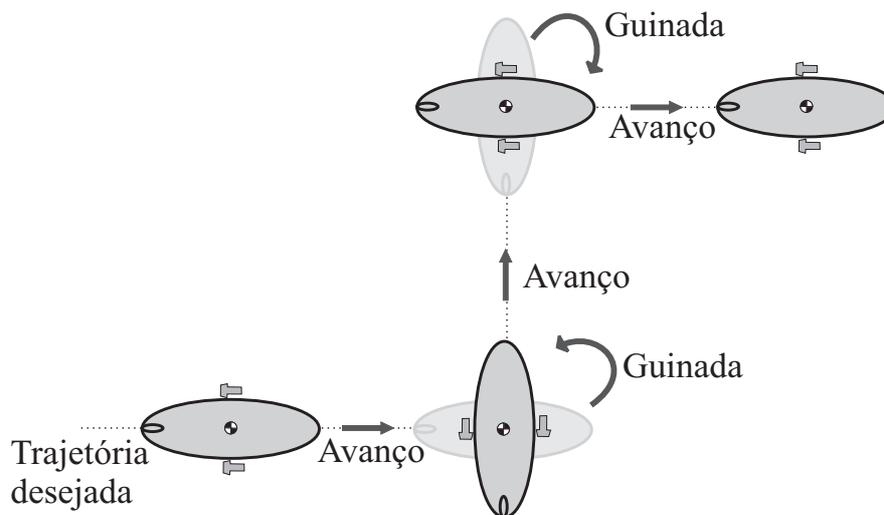


Figura 5.6: Seguimento de uma trajetória horizontal com falhas no P3 e P4 do BA-1.

### Falta nos propulsores (P1, P3) ou (P1, P4) ou (P2, P3) ou (P2, P4)

Nestes casos, não é possível realizar o mencionado anteriormente, já que o veículo não é capaz de realizar um movimento num grau de liberdade requerido sem gerar também um movimento indesejado em  $\tau_\psi$ . Então, não pode ser determinada a força do propulsor necessária para realizar o movimento no grau de liberdade desejado. Para resolver este problema o Choi and Kondo (2010) propõem introduzir uma força resultante que atravessa pelo centro de gravidade do veículo e entre os dois propulsores operantes. Esta força resultante é obtida mediante o diagrama de corpo livre do veículo (ver figura 5.7) e pode ser decomposta para obter os valores das forças individuais dos propulsores operantes.

Por exemplo, para o caso em que os propulsores P2 e P4 estão com falta, o seguimento da trajetória desejada pode ser observado na figura 5.8, onde  $\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{a}{b}$  e as forças dos propulsores P1 e P3 são obtidas do diagrama de corpo livre do veículo.

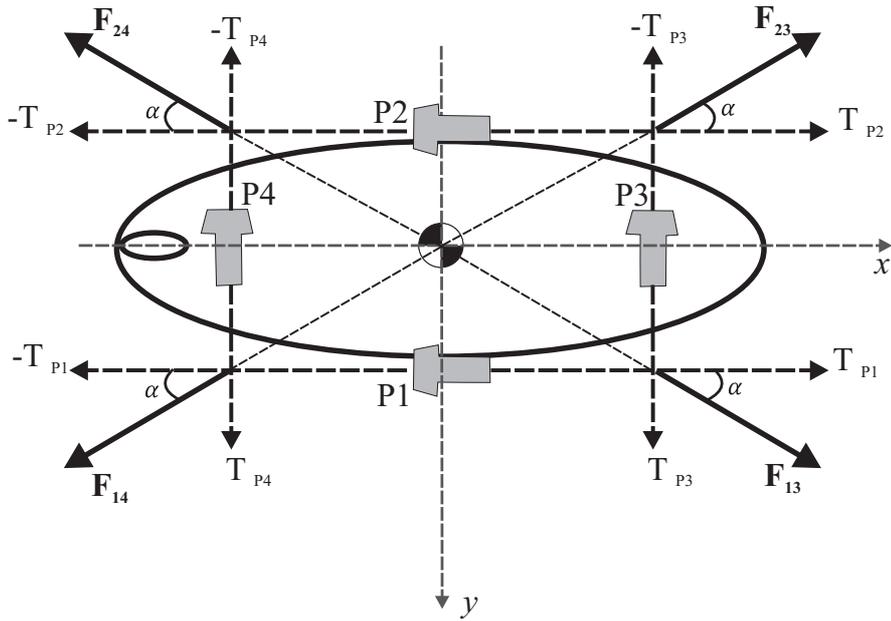


Figura 5.7: Diagrama do corpo livre do BA-1

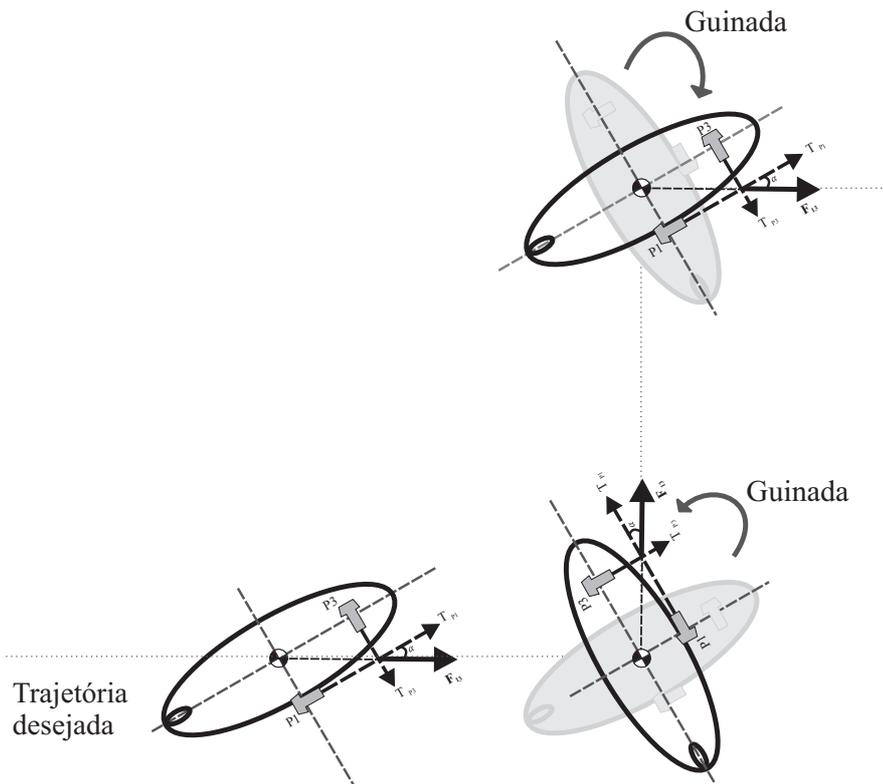


Figura 5.8: Seguimento de uma trajetória horizontal com faltas no P2 e P4 do BA-1.

# Capítulo 6

## Proposta de Controle Nebuloso de Propulsores

Nesta secção será apresentado a estrutura geral do controlador utilizado para este trabalho. Logo o controle de alocação tolerante a faltas nebuloso será detalhado.

### 6.1 Estrutura Geral do Controle

A estrutura utilizada neste trabalho pode ser observada na figura 6.1, onde em um primeiro momento, um gerador de trajetória produz uma Trajetória Desejada que é comparada com a Trajetória Atual do veículo, AUV, para obter o Erro de trajetória. Em seguida, a Lei de Controle do AUV gera as forças e momentos desejados  $\tau_{horizontal}^d$  para que o veículo permaneça na trajetória desejada. Então, o Controle de Alocação mapeia o vetor  $\tau_{horizontal}^d$  no vetor de forças individuais de cada propulsor horizontal,  $T_{horizontal}$ , utilizando a matriz de configuração de propulsores  $B_{horizontal}^{novo}$ , a qual é gerada pelo controle nebuloso a partir dos Estados obtidos dos indicadores de falta,  $f$ .

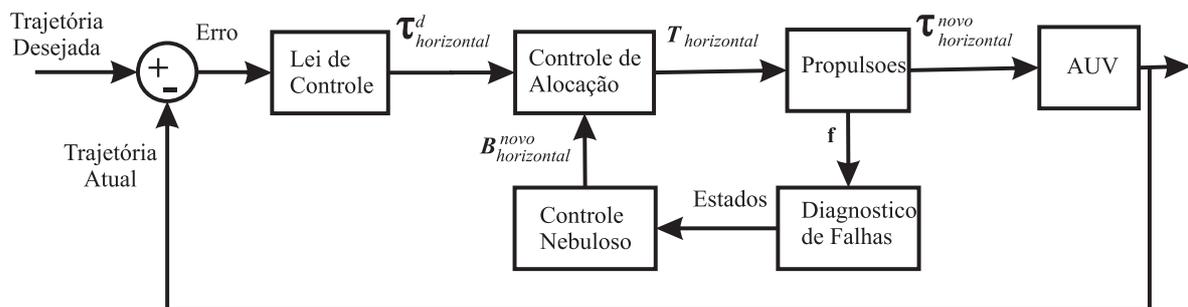


Figura 6.1: Esquema geral do controlador proposto.

## 6.2 Estrutura do Controle de Alocação Tolerante a Faltas

As entradas do sistema de alocação de faltas são as forças e momentos desejados,  $\tau_{desejado}$ . A saída do sistema de alocação é o vetor de velocidades desejadas dos propulsores  $n$ , a qual posteriormente é transformada em tensão desejada para os propulsores.

Neste trabalho as formas de Diagnóstico de faltas não serão consideradas, e será assumido que as faltas são detectadas quando ocorrem. Assim um indicador de falhas  $f_i$ , será atribuído para cada propulsor horizontal, sendo o valor 1 um indicador de que o propulsor está ativo e 0 um indicador de que o propulsor está com falta. Estes valores posteriormente são integrados para obter um indicador total de faltas (*Estados*).

No início o controle de Alocação realiza a separação dos torques e momentos em horizontais e verticais ( $\tau_{horizontal}$  e  $\tau_{vertical}$ ). Em seguida, ele recebe a matriz de configuração dos propulsores gerada pelo controlador nebuloso e o problema de alocação é solucionado mediante a técnica da pseudo inversa, de forma separada para os propulsores horizontais e verticais.

## 6.3 Controle Nebuloso

Para que o veículo seja tolerante a faltas, o mecanismo de Controle Nebuloso de propulsores deve ser capaz de reconfigurar a matriz de configuração de propulsores de forma automática quando ocorre uma situação de falta, a fim de que a missão possa ser concluída sem perdas maiores. Então, quando uma falta é detectada, o Controle Nebuloso recebe os estados dos propulsores e reconfigura a matriz de configuração  $B_{horizontal}$ , em uma  $B_{horizontal}^{novo}$ , considerando as regras projetadas antecipadamente para cada falta (ver seção 6.3.1). Logo, o controle de alocação utiliza as equações mencionadas na seção 5.3, que depende da quantidade de faltas e de quais são estes propulsores, para realizar a redistribuição de forças dos propulsores e alimentar o controle de malha fechada de forma similar à operação nominal sem falta. Assim, uma nova resposta de controle é calculada com a nova matriz de configuração horizontal dos propulsores  $B_{horizontal}^{novo}$ , como segue:

$$\tau_{horizontal}^{novo} = B_{horizontal}^{novo} T_{horizontal}^{novo} \quad (6.1)$$

O controle de alocação nebuloso representa uma solução híbrida para o controle de alocação utilizando pseudo-inversa. Isto é, uma nova matriz de configuração de propulsores,  $B_{horizontal}^{novo}$ , é obtida utilizando regras nebulosas, para que depois uma nova matriz de forças e momentos desejados,  $\tau_{horizontal}^{novo}$ , seja calculada utilizando a pseudo-inversa (equação (5.5)), segundo o mencionado na seção 5.3.

O esquema geral do controlador nebuloso é o apresentado na figura 6.2. onde sensores detectam a ocorrência de uma falta num propulsor e enviam esta informação ao controlador nebuloso. Este controlador recebe estes parâmetros de entrada e, seguindo um conjunto de regras

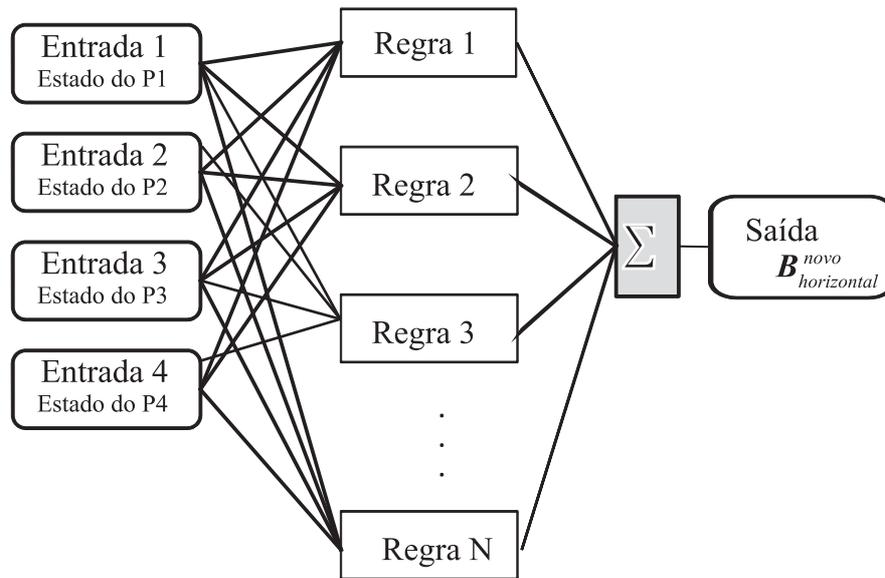


Figura 6.2: Esquema do controlador nebuloso.

determinado, escolhe uma saída para esse conjunto de parâmetros de entrada. A saída obtida, a matriz de configuração, é utilizada como parâmetro de entrada para o cálculo do controle efetivo, além de outros parâmetros de entrada, como posição desejada, posição calculada e velocidades calculadas. Este controle efetivo calculado, que é o adequado para a situação atual do funcionamento dos propulsores, será aplicado à dinâmica do AUV.

Esta alocação nebulosa permite a passagem de um estado, seja caso 1 (seção 5.4.1) ou caso 2 (seção 5.4.2), de forma dinâmica. Os critérios de transição são determinados por um controlador nebuloso do tipo Mandani, o qual conta com um conjunto de regras estabelecidas por meio de uma heurística própria para o problema proposto, de tal forma a que não seja feita uma transição indesejada, isto é, que a dinâmica do veículo não reaja de forma equivocada por causa de entradas não controladas.

Finalmente, pode-se dizer que o objetivo de controle pode ser definido como a apreciação adequada de uma determinada situação e uma resposta desejada do sistema num tempo estabelecido. O controlador nebuloso desenvolvido realiza a realocação do controle efetivo entre os propulsores restantes numa situação de falta de propulsores, considerando a minimização da quantidade de regras para o tempo de resposta desejado.

### 6.3.1 Regras Nebulosas

Estas regras foram realizadas tendo em consideração a disposição geométrica dos propulsores e os diagramas de corpo livre do sistema de forças e momentos do veículo. Um controlador nebuloso permite utilizar a estratégia mencionada anteriormente em forma de regras linguísticas para a definição de uma estratégia de controle automático. Sendo uma regra nebu-

losa composta da seguinte maneira:

SE  $A$  É  $A_i$  E  $B$  É  $B_i$  OU  $C$  É  $C_i$  ENTÃO  $D$  É  $D_i$

onde  $A, B, C$  e  $D$  são variáveis nebulosas,  $A_i, B_i, C_i$  e  $D_i$  são valores linguísticos nebulosos, "E" e "OU" são conectores das regras.

As entradas do controle nebuloso são os estados de cada um dos propulsores horizontais. A saída do conjunto nebuloso é uma matriz de configuração dos propulsores nova,  $B_{horizontal}^{novo}$ , adequada para esse determinado caso. Da mesma forma, tem-se as variáveis nebulosas *EstadoP1*, *EstadoP2*, *EstadoP3* e *EstadoP4* que podem adquirir os valores linguísticos *ATIVADO* *DESATIVADO*.

As variáveis nebulosas  $P1X, P1Y, P1Z, P2X, P2Y, P2Z, P3X, P3Y, P3Z, P4X, P4Y, P4Z$  podem adquirir os valores linguísticos *POSITIVO, POSITIVO MEDIO, POSITIVO MEDIO PEQUENO, POSITIVO POUCO PEQUENO, POSITIVO PEQUENO, POSITIVO SUPER PEQUENO, ZERO, NEGATIVO SUPER PEQUENO, NEGATIVO PEQUENO, NEGATIVO POUCO PEQUENO, NEGATIVO MEDIO PEQUENO, NEGATIVO MEDIO, NEGATIVO, NEGATIVO MEDIO GRANDE, NEGATIVO GRANDE*

## 6.4 Definição das Regras Nebulosas

As regras para o algoritmo nebuloso foram desenvolvidas heurísticamente, por meio do conhecimento do sistema e do objetivo de controle desejado. O conhecimento do funcionamento do sistema foi adquirido com o estudo do protótipo BA- 1 e de uma estimativa intuitiva da resposta da dinâmica do sistema analisado.

Como foi mencionado na secção 6.3.1 o controlador nebuloso tem 4 entradas correspondentes aos Estados dos propulsores (figura 6.3), e doze saídas correspondentes á influência dos propulsores sobre os graus de liberdade do veículo. Os quatro Estados têm 2 funções de pertinência cada um, *ATIVADO* e *DESATIVADO*, função de pertinência  $Z$  e função de pertinência  $S$  respectivamente. As saídas são funções de pertinência triangulares correspondentes a cada um dos elementos da matriz de configuração dos propulsores  $B_{horizontal}^{novo}$ , segundo a situação do veículo.

As regras nebulosas têm em consideração os indicadores de estado para estabelecer a matriz de configuração dos propulsores adequada. No caso de não ocorrer nenhuma falta a matriz de configuração dos propulsores permanece com os valores originais (figura 6.5).

SE *EstadoP1* É *ATIVADO* E *EstadoP2* É *ATIVADO* E *EstadoP3* É *ATIVADO* E *EstadoP4* É *ATIVADO* ENTÃO  $P1X$  É  $PG - POSITIVO GRANDE$ ,  $P1Y$  É  $Z - ZERO$ ,  $P1Z$  É  $NP - NEGATIVO PEQUENO$ ,  $P2X$  É  $PG - POSITIVO GRANDE$ ,

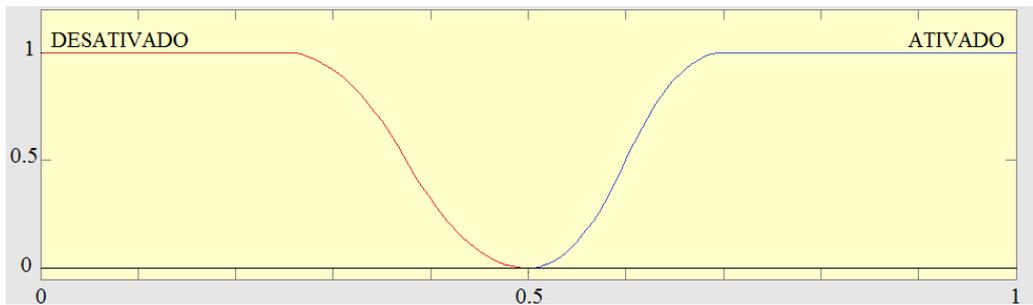


Figura 6.3: Entradas do controlador Nebuloso.

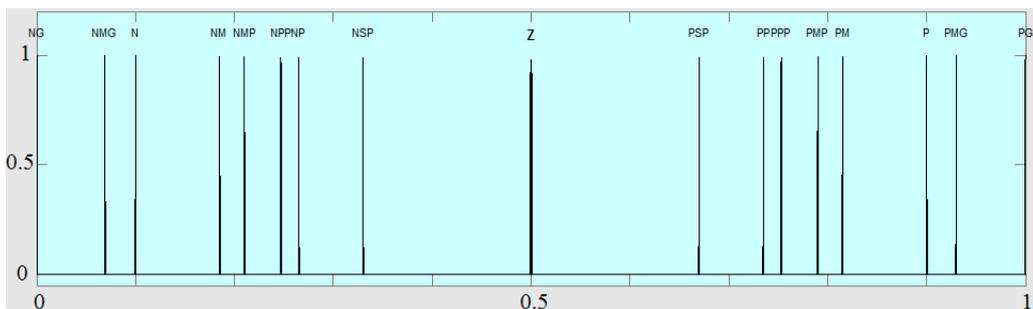


Figura 6.4: Saídas do controlador Nebuloso.

*P2Y É Z – ZERO, P2Z É PP – POSITIVO PEQUENO, P3X É Z – ZERO, P3Y É PG – POSITIVO GRANDE, P3Z É P – POSITIVO, P4X É Z – ZERO, P4Y É PG – POSITIVO GRANDE, P4Z É N – NEGATIVO*



Figura 6.5: Entrada do controle nebuloso quando não tem falta nos propulsores.

## 6.5 Regras no Caso 1

Para o caso 1 (seção 5.4.1) tem-se em consideração a ocorrência de uma só falta nos propulsores horizontais.

### 6.5.1 Falta no P1

No caso de falta no propulsor 1 (figura 6.6), a matriz de configuração gerada responde à regra:

SE *EstadoP1* É DESATIVADO E *EstadoP2* É ATIVADO E *EstadoP3* É ATIVADO E *EstadoP4* É ATIVADO ENTÃO *P1X* É Z – ZERO, *P1Y* É Z – ZERO, *P1Z* É Z – ZERO, *P2X* É PG – POSITIVO GRANDE, *P2Y* É Z – ZERO, *P2Z* É PP – POSITIVO PEQUENO, *P3X* É Z – ZERO, *P3Y* É PG – POSITIVO GRANDE, *P3Z* É P – POSITIVO, *P4X* É Z – ZERO, *P4Y* É PG – POSITIVO GRANDE, *P4Z* É N – NEGATIVO



Figura 6.6: Entrada do controle nebuloso quando P1 falta.

### 6.5.2 Falta no P2

No caso de falta no propulsor 2 (figura 6.7), a matriz de configuração gerada responde à regra: SE *EstadoP1* É ATIVADO E *EstadoP2* É DESATIVADO E *EstadoP3* É

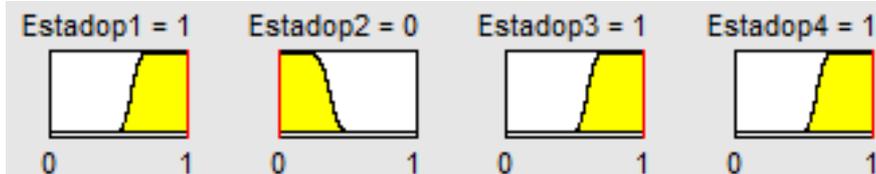


Figura 6.7: Entrada do controle nebuloso quando P2 falta.

ATIVADO E *EstadoP4* É ATIVADO ENTÃO *P1X* É PG – POSITIVO GRANDE, *P1Y* É Z – ZERO, *P1Z* É NP – NEGATIVO PEQUENO, *P2X* É Z – ZERO, *P2Y* É Z – ZERO, *P2Z* É Z – ZERO, *P3X* É Z – ZERO, *P3Y* É PG – POSITIVO GRANDE, *P3Z* É P – POSITIVO, *P4X* É Z – ZERO, *P4Y* É PG – POSITIVO GRANDE, *P4Z* É N – NEGATIVO

### 6.5.3 Falta no P3

No caso de falta no propulsor 3 (figura 6.8), a matriz de configuração gerada responde à regra: SE *EstadoP1* É ATIVADO E *EstadoP2* É ATIVADO E *EstadoP3* É DESATIVADO E *EstadoP4* É ATIVADO ENTÃO *P1X* É PG – POSITIVO GRANDE, *P1Y* É Z – ZERO, *P1Z* É NP – NEGATIVO PEQUENO, *P2X* É PG – POSITIVO GRANDE, *P2Y* É Z – ZERO, *P2Z* É PP – POSITIVO PEQUENO, *P3X* É Z – ZERO, *P3Y* É Z – ZERO, *P3Z* É Z – ZERO, *P4X* É Z – ZERO, *P4Y* É PG – POSITIVO GRANDE, *P4Z* É N – NEGATIVO



Figura 6.8: Entrada do controle nebuloso quando P3 falta.

#### 6.5.4 Falta no P4

No caso de falta no propulsor 4 (figura 6.9), a matriz de configuração gerada responde à regra: SE *EstadoP1* É ATIVADO E *EstadoP2* É ATIVADO E *EstadoP3* É ATIVADO



Figura 6.9: Entrada do controle nebuloso quando P4 falta.

E *EstadoP4* É DESATIVADO ENTÃO  $P1X$  É PG – POSITIVO GRANDE,  $P1Y$  É Z – ZERO,  $P1Z$  É NP – NEGATIVO PEQUENO,  $P2X$  É PG – POSITIVO GRANDE,  $P2Y$  É Z – ZERO,  $P2Z$  É PP – POSITIVO PEQUENO,  $P3X$  É Z – ZERO,  $P3Y$  É PG – POSITIVO GRANDE,  $P3Z$  É P – POSITIVO,  $P4X$  É Z – ZERO,  $P4Y$  É Z – ZERO,  $P4Z$  É Z – ZERO,

## 6.6 Regras no Caso 2

Para o caso 2 (seção 5.4.2) tem-se em consideração a ocorrência de duas faltas nos propulsores horizontais.

#### Se os propulsores P1 e P2 têm falta

No caso de falta nos propulsores P1 e P2 (figura 6.10), se trabalha com uma submatriz da matriz de configuração  $B$ , que responde à regra: SE *EstadoP1* É DESATIVADO E *EstadoP2* É DESATIVADO E *EstadoP3* É ATIVADO E *EstadoP4* É ATIVADO ENTÃO  $P1X$  É Z – ZERO,  $P1Y$  É Z – ZERO,  $P1Z$  É Z – ZERO,  $P2X$  É Z – ZERO,  $P2Y$  É Z – ZERO,  $P2Z$  É Z – ZERO,  $P3X$  É Z – ZERO,  $P3Y$  É PG – POSITIVO GRANDE,  $P3Z$  É P – POSITIVO,  $P4X$  É Z – ZERO,  $P4Y$  É PG – POSITIVO GRANDE,  $P4Z$  É N – NEGATIVO,

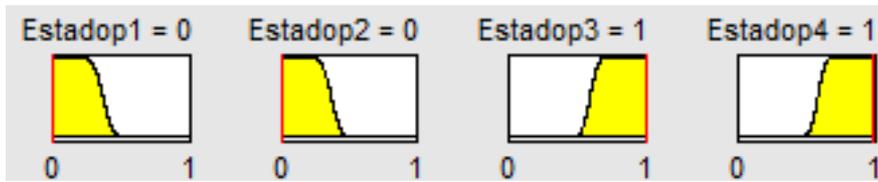


Figura 6.10: Entrada do controle nebuloso quando P1 e P2 faltam.

### Se os propulsores P3 e P4 têm falta

No caso de falta nos propulsores P3 e P4 (figura 6.11), se trabalha com uma submatriz da matriz de configuração  $B$ , que responde à regra: SE  $EstadoP1$  É ATIVADO E  $EstadoP2$



Figura 6.11: Entrada do controle nebuloso quando P3 e P4 faltam.

É ATIVADO E  $EstadoP3$  É DESATIVADO E  $EstadoP4$  É DESATIVADO ENTÃO  $P1X$  É PG – POSITIVO GRANDE,  $P1Y$  É Z – ZERO,  $P1Z$  É NP – NEGATIVO PEQUENO,  $P2X$  É PG – POSITIVO GRANDE,  $P2Y$  É Z – ZERO,  $P2Z$  É PP – POSITIVO PEQUENO,  $P3X$  É Z – ZERO,  $P3Y$  É Z – ZERO,  $P3Z$  É Z – ZERO,  $P4X$  É Z – ZERO,  $P4Y$  É Z – ZERO,  $P4Z$  É Z – ZERO,

### Se os propulsores P1 e P3 têm falta

No caso de falta nos propulsores P1 e P3 (figura 6.12), se trabalha com uma submatriz da matriz de configuração  $B$ , que responde à regra: SE  $EstadoP1$  É DESATIVADO

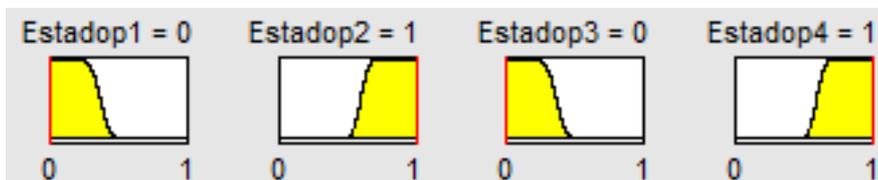


Figura 6.12: Entrada do controle nebuloso quando P1 e P3 faltam.

E  $EstadoP2$  É ATIVADO E  $EstadoP3$  É DESATIVADO E  $EstadoP4$  É ATIVADO ENTÃO  $P1X$  É Z – ZERO,  $P1Y$  É Z – ZERO,  $P1Z$  É Z – ZERO,  $P2X$  É PMP – POSITIVO MEDIO PEQUENO,  $P2Y$  É PP – POSITIVO PEQUENO,  $P2Z$  É PP – POSITIVO PEQUENO,  $P3X$  É Z – ZERO,  $P3Y$  É Z – ZERO,  $P3Z$  É Z – ZERO,  $P4X$  É PP – POSITIVO PEQUENO,  $P4Y$  É PMP – POSITIVO MEDIO PEQUENO,  $P4Z$  É N – NEGATIVO,

### Se os propulsores P1 e P4 têm falta

No caso de falta nos propulsores P1 e P4 (figura 6.13), se trabalha com uma submatriz da matriz de configuração  $B$ , que responde à regra: SE *EstadoP1* É *DESATIVADO*



Figura 6.13: Entrada do controle nebuloso quando P1 e P4 faltam.

E *EstadoP2* É *ATIVADO* E *EstadoP3* É *ATIVADO* E *EstadoP4* É *DESATIVADO* ENTÃO  $P1X$  É  $Z - ZERO$ ,  $P1Y$  É  $Z - ZERO$ ,  $P1Z$  É  $Z - ZERO$ ,  $P2X$  É  $PMP - POSITIVO MEDIO PEQUENO$ ,  $P2Y$  É  $PSP - POSITIVO SUPER PEQUENO$ ,  $P2Z$  É  $PP - POSITIVO PEQUENO$ ,  $P3X$  É  $PSP - POSITIVO SUPER PEQUENO$ ,  $P3Y$  É  $PMP - POSITIVO MEDIO PEQUENO$ ,  $P3Z$  É  $P - POSITIVO$ ,  $P4X$  É  $Z - ZERO$ ,  $P4Y$  É  $Z - ZERO$ ,  $P4Z$  É  $Z - ZERO$ ,

### Se os propulsores P2 e P3 têm falta

No caso de falta nos propulsores P2 e P3 (figura 6.14), se trabalha com uma submatriz da matriz de configuração  $B$ , que responde à regra: SE *EstadoP1* É *ATIVADO* E

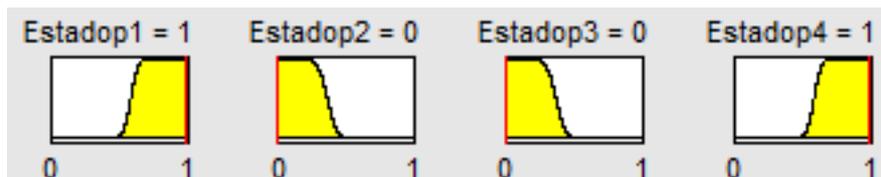


Figura 6.14: Entrada do controle nebuloso quando P2 e P3 faltam.

*EstadoP2* É *DESATIVADO* E *EstadoP3* É *DESATIVADO* E *EstadoP4* É *ATIVADO* ENTÃO  $P1X$  É  $PMG - NEGATIVO MEDIO GRANDE$ ,  $P1Y$  É  $NPP - NEGATIVO POUCO PEQUENO$ ,  $P1Z$  É  $NP - NEGATIVO PEQUENO$ ,  $P2X$  É  $Z - ZERO$ ,  $P2Y$  É  $Z - ZERO$ ,  $P2Z$  É  $Z - ZERO$ ,  $P3X$  É  $Z - ZERO$ ,  $P3Y$  É  $Z - ZERO$ ,  $P3Z$  É  $Z - ZERO$ ,  $P4X$  É  $PPP - POSITIVO POUCO PEQUENO$ ,  $P4Y$  É  $PMG - POSITIVO MEDIO GRANDE$ ,  $P4Z$  É  $N - NEGATIVO$ ,

### Se os propulsores P2 e P4 têm falta

No caso de falta nos propulsores P2 e P4 (figura 6.15), se trabalha com uma submatriz da matriz de configuração  $B$ , que responde à regra:

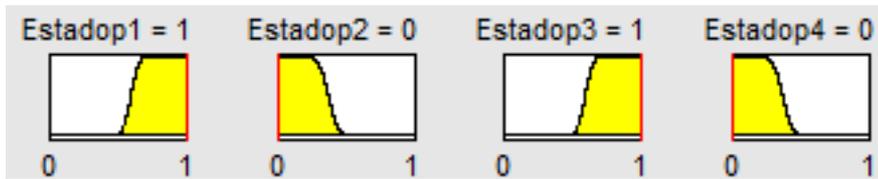


Figura 6.15: Entrada do controle nebuloso quando P2 e P4 faltam.

SE *EstadoP1* É ATIVADO E *EstadoP2* É DESATIVADO E *EstadoP3* É ATIVADO E *EstadoP4* É DESATIVADO ENTÃO *P1X* É PMP – POSITIVO MEDIO PEQUENO, *P1Y* É PP – POSITIVO PEQUENO, *P1Z* É NP – NEGATIVO PEQUENO, *P2X* É Z – ZERO, *P2Y* É Z – ZERO, *P2Z* É Z – ZERO, *P3X* É PP – POSITIVO PEQUENO, *P3Y* É PMP – POSITIVO MEDIO PEQUENO, *P3Z* É P – POSITIVO, *P4X* É Z – ZERO, *P4Y* É Z – ZERO, *P4Z* É Z – ZERO,

## 6.7 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a estrutura geral do controle do veículo e foi detalhada a estrutura do controle de alocação tolerante a faltas, a definição das regras nebulosas, os parâmetros de entrada e as saídas para cada caso de falta possível. Na tabela 6.1 pode-se observar uma síntese das regras desenvolvidas para o controle de alocação nebuloso.

Tabela 6.1: Síntese de regras do controlador nebuloso

| <i>Estados dos propulsores</i> |                 |                 |                 | <i>Saídas do Controlador Nebuloso</i> |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |  |  |  |  |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|--|--|--|
| <i>Estadop1</i>                | <i>Estadop2</i> | <i>Estadop3</i> | <i>Estadop4</i> | <i>PIX</i>                            | <i>PIY</i> | <i>PIZ</i> | <i>P2X</i> | <i>P2Y</i> | <i>P2Z</i> | <i>P3X</i> | <i>P3Y</i> | <i>P3Z</i> | <i>P4X</i> | <i>P4Y</i> | <i>P4Z</i> |  |  |  |  |
| 1                              | 1               | 1               | 1               | PG                                    | Z          | NP         | PG         | Z          | PP         | Z          | PG         | P          | Z          | PG         | N          |  |  |  |  |
| 0                              | 1               | 1               | 1               | Z                                     | Z          | Z          | PG         | Z          | PP         | Z          | PG         | P          | Z          | PG         | N          |  |  |  |  |
| 1                              | 0               | 1               | 1               | PG                                    | Z          | NP         | Z          | Z          | Z          | Z          | PG         | P          | Z          | PG         | N          |  |  |  |  |
| 1                              | 1               | 0               | 1               | PG                                    | Z          | NP         | PG         | Z          | PP         | Z          | Z          | Z          | Z          | PG         | N          |  |  |  |  |
| 1                              | 1               | 1               | 0               | PG                                    | Z          | NP         | PG         | Z          | PP         | Z          | PG         | P          | Z          | Z          | Z          |  |  |  |  |
| 0                              | 0               | 1               | 1               | Z                                     | Z          | Z          | Z          | Z          | Z          | Z          | PG         | P          | Z          | PG         | N          |  |  |  |  |
| 1                              | 1               | 0               | 0               | PG                                    | Z          | NP         | PG         | Z          | PP         | Z          | Z          | Z          | Z          | Z          | Z          |  |  |  |  |
| 0                              | 1               | 0               | 1               | Z                                     | Z          | Z          | PMP        | PP         | PP         | Z          | Z          | Z          | PP         | PMP        | N          |  |  |  |  |
| 0                              | 1               | 1               | 0               | Z                                     | Z          | Z          | PMP        | PSP        | PP         | PSP        | PMP        | P          | Z          | Z          | Z          |  |  |  |  |
| 1                              | 0               | 0               | 1               | NMG                                   | NPP        | NP         | Z          | Z          | Z          | Z          | Z          | Z          | PPP        | PMG        | N          |  |  |  |  |
| 1                              | 0               | 1               | 0               | PMP                                   | PP         | NP         | Z          | Z          | Z          | PP         | PMP        | P          | Z          | Z          | Z          |  |  |  |  |



# Capítulo 7

## Implementação e Análise dos Resultados

As simulações que serão apresentadas a seguir foram realizadas utilizando modelos desenvolvidos por Dos Santos (2012). Os modelos foram implementados a partir dos parâmetros e dados da modelagem matemática apresentados no capítulos 2 e 5. Tendo em vista a avaliação do desempenho do controle de alocação tolerante a faltas, foram utilizados dois estudos de casos sobre uma trajetória reta sobre o eixo  $x$ , e duas situações de faltas nos propulsores em determinados instantes de tempo, quando o veículo inicia a sua trajetória e quando o veículo está com a sua velocidade máxima de navegação. Os resultados destes estudos são apresentados e avaliados neste capítulo.

O escopo desta pesquisa é desenvolver um controlador de alocação tolerante a faltas dos propulsores horizontais que permita redistribuir as forças dos propulsores na ocorrência de faltas a fim de que o veículo submarino não se descontrole com a ocorrência de faltas em qualquer ponto da sua trajetória. Para implementar o controlador foi preciso criar um mecanismo automático de geração de trajetória que permite que o veículo se reoriente na posição mais adequada e continue o seguimento de trajetória de referência utilizando a nova matriz de configuração de propulsores gerada pelo controle nebuloso de alocação de propulsores.

A trajetória de referência se modifica de forma dinâmica dependendo da falta detectada e do instante de tempo em que esta ocorre. A velocidade do veículo também varia dependendo da trajetória desejada e conforme a influência que tem o propulsor para realizá-la. A velocidade de referência é controlada com a variação do tempo da simulação.

Na ocorrência de uma falta, o controle de seguimento de trajetórias verifica que ações devem ser tomadas na orientação e na velocidade do veículo. Em seguida, o veículo é reorientado para a nova trajetória desejada até chegar na posição objetivo, quando isto é possível.

As referências a serem seguidas pelo AUV estão dadas no referencial da terra ou inercial como segue:

$$\eta_{desejado}(t) = [x_d(t), yd(t), z_d(t), \phi_d(t), \theta_d(t), \psi_d(t)]$$

$$\dot{\eta}_{desejado}(t) = \frac{d}{dt}\eta_{desejado}(t)$$

$$\ddot{\eta}_{desejado}(t) = \frac{d^2}{dt^2}\eta_{desejado}(t)$$

Neste trabalho a trajetória de referência é definida por polinômios de quinta ordem, o que causa que as velocidades iniciais e finais sejam nulas, sendo o ponto de maior velocidade a metade da trajetória de referência.

É importante salientar que todos os graus de liberdade foram considerados nas gerações de trajetória, o que pode causar instabilidade pelos acoplamentos da dinâmica dos graus de liberdade.

Para a simulação foi utilizado o software *MatLab Simulink*, com o solver *ode4 (Fourth-Order Runge-Kutta Formula (RK4))* com intervalo fixo de tempo de 0.1 segundos entre os passos de simulação e aplica o método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem para resolver as equações diferenciais que representam o modelo. Para o controlador nebuloso foi utilizada a ferramenta *MatLab Fuzzy Logic Toolbox* do tipo Mandani.

A seguir serão apresentados casos de estudo que foram testados em simulação. O primeiro caso consiste em verificar que o veículo realize uma trajetória com a ocorrência de uma falta nos propulsores horizontais. O segundo caso consiste em Verificar que o veículo realize a mesma trajetória desejada com a ocorrência de duas faltas nos propulsores horizontais.

Para verificar o comportamento do veículo nos diferentes casos de falta foram assumidas duas situações. Na Situação 1, introduziu-se uma falta no início da simulação ( $t=0$  segundos), onde a velocidade inicial é zero, e portanto, a ocorrência de faltas nos propulsores pode ser controlada sem a presença dos efeitos provocados pela velocidade. Na Situação 2, introduziu-se uma falta na metade do tempo de simulação ( $t=50$  segundos), que é o ponto no qual o veículo adquire a sua maior velocidade, portanto, o momento mais crítico do percurso.

A trajetória utilizada para realizar os testes é de deslocamento no eixo  $x$ , pois é o movimento mais frequente dos veículos do tipo torpedo como o BA-1, até uma distancia de 20 metros da sua posição de origem. A velocidade máxima de translação é de 0.2 metros por segundo, portanto o tempo total de simulação é de 100 segundos quando todos os propulsores estão funcionando. Porém, dependendo da falta que ocorra, a velocidade de translação diminuirá e, se for necessário (Ver capítulo 5), uma trajetória de reposicionamento na guinada do veículo será realizada para que este seja capaz de continuar o seguimento da sua trajetória de referência.

## 7.1 Parâmetros de Simulação

Os parâmetros que são utilizados no modelo de simulação estão descritos na tabela 7.1. Estes parâmetros são necessários para a caracterização da simulação e variam dependendo do veículo e do ambiente no qual este irá se desenvolver.

## 7.2 Simulações do Caso 1

Como foi mencionado no capítulo 5, quando somente uma falta ocorre, o veículo é capaz de realizar movimentos em todos os graus de liberdade, porém a velocidade nominal do veículo é afetada dependendo da trajetória de referência e do propulsor afetado pela falta.

### 7.2.1 Falta no P1 ou no P2

Faltas nos propulsores P1 ou P2 afetam de forma semelhante no comportamento do veículo, uma vez que estes dois propulsores influenciam diretamente no movimento do veículo sobre o eixo  $x$  (Ver tabela 5.2). Portanto somente a análise da falta do P1 será apresentada na sequência.

Quando ocorre uma falta num destes propulsores o controle de alocação nebuloso recebe o vetor de faltas  $f$  e tendo em consideração o posicionamento destes propulsores, define que o propulsor horizontal operacional remanescente realize um maior torque e que os propulsores P3 e P4 realizem forças suficientes como para anular o movimento angular que é provocado pelo accionamento de somente um propulsor no eixo  $x$ .

Na figura 7.1 pode-se observar as forças geradas pelos propulsores P2, P3 e P4 quando o P1 falta. Nota-se neste gráfico que as forças do P3 e do P4 possibilitam que o movimento rotacional gerado pelo P2 seja compensado, para assim obter uma uma força resultante em  $x$ .

Nas figuras 7.2 e 7.3 nota-se como a matriz gerada pelo controlador fuzzy, permite que as forças sejam realocadas conforme ao mencionado anteriormente. Não obstante, a velocidade do veículo deve ser reduzida à metade, tendo em consideração que somente um propulsor realiza o movimento de translação  $x$ , como pode ser observado na figura 7.4 e 7.5.

Já nos gráficos 7.6 e 7.7 podem-ser observados os erros de trajetória nas duas situações, com erros na faixa de centésima de metros, note-se que na situação 2 (figura 7.7), os erros aumentam principalmente no instante de tempo em que a falta ocorre. Nas figuras 7.8 e 7.9 pode-se observar o deslocamento em  $x$ ,  $y$  e  $z$  nas duas situações.

Tabela 7.1: Parâmetros utilizados para as simulações do comportamento do BA-1 (Chiella, 2012).

| <i>Parâmetros</i>   | <i>Descrição</i>   |
|---|--|
| $m = 390$   | Massa [kg]   |
| $W = 3822$  | Peso [N]   |
| $x_G = 0, y_G = 0$ e $z_G = 0$  | Centro de Gravidade [m]  |
| $I_x = 26.34, I_y = 305.37$ e $I_z = 305.67$  | Momentos de Inércia [kgm <sup>2</sup> ]                            |
| $I_{xy} = 0, I_{xz} = 0, I_{yx} = 0,$<br>$I_{yz} = 0, I_{zx} = 0$ e $I_{zy} = 0$  | Produtos de Inércia<br>[kgm <sup>2</sup> ]                         |
| $A_{11} = 49.12, A_{22} = 311.52, A_{33} = 311.52,$<br>$A_{44} = 0, A_{55} = 87.63$ e $A_{66} = 87.63$  | Coefficientes de Massa Adicional<br>[kg] e [kgm <sup>2</sup> ]     |
| $\rho = 1000$   | Massa específica da água [kg/m <sup>3</sup> ]                      |
| $X_u = -20, Y_v = -200, Z_w = -200,$<br>$K_p = -10, M_q = -300$ e $N_r = -300$  | Coefficiente de Arrasto Linear<br>[kg/s] e [kgm <sup>2</sup> /s]   |
| $X_{ u u} = -30, Y_{ v v} = -300, Z_{ w w} = -300,$<br>$K_{ p p} = -10, M_{ q q} = -300$ e $N_{ r r} = -200$  | Coefficiente de Arrasto não Linear<br>[kg/m] e [kgm <sup>2</sup> ] |
| $B = W$   | Empuxo [N]   |
| $x_B = 0, y_B = 0$ e $z_B = -0.15$  | Centro de Empuxo<br>[m]  |
| $T_{ n n} = 0.42$   | Coefficiente de Empuxo do Propulsor<br>[N/rps <sup>2</sup> ]       |
| $Q_{ n n} = 0.0093$   | Coefficiente de Torque do Propulsor<br>[Nm/rps <sup>2</sup> ]      |
| $E_{x_1} = 0, E_{y_1} = 0.47, E_{z_1} = 0$<br>$E_{x_2} = 0, E_{y_2} = -0.47, E_{z_2} = 0$<br>$E_{x_3} = 0.8, E_{y_3} = 0, E_{z_3} = 0$<br>$E_{x_4} = -0.8, E_{y_4} = 0, E_{z_4} = 0$<br>$E_{x_5} = 0.63, E_{y_5} = 0, E_{z_5} = 0$<br>$E_{x_6} = -0.63, E_{y_6} = 0, E_{z_6} = 0$ | Centro de Empuxo de cada Propulsor<br>[m]                          |
| $T_{x_1} = 1, T_{y_1} = 0$ e $T_{z_1} = 0$<br>$T_{x_2} = 1, T_{y_2} = 0, T_{z_2} = 0$<br>$T_{x_3} = 0, T_{y_3} = 1, T_{z_3} = 0$<br>$T_{x_4} = 0, T_{y_4} = 1, T_{z_4} = 0$<br>$T_{x_5} = 0, T_{y_5} = 0, T_{z_5} = 1$<br>$T_{x_6} = 0, T_{y_6} = 0, T_{z_6} = 1$                 | Contribuição de Força do Propulsor                                 |
| $K_m = 0.362$   | Constante de Torque do Motor DC<br>[Nm/A]                          |
| $J_p = 0.1$   | Momentos de Inércia do Propulsor<br>[kgm <sup>2</sup> ]            |
| $R_a = 0.072$   | Resistência de Armadura<br>[Ω]                                     |
| $V_a = 24$  | Tensão Nominal do Motor<br>[V]                                     |

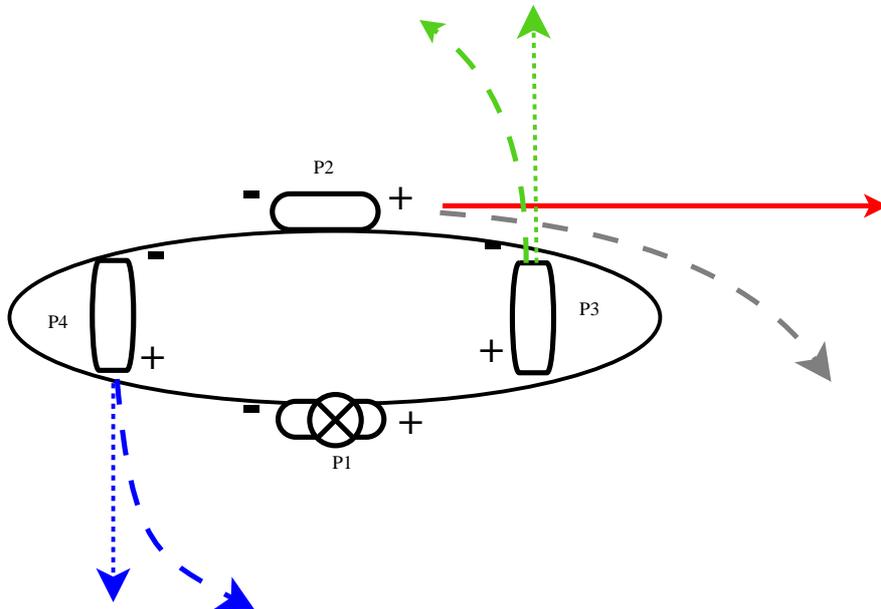


Figura 7.1: Forças do veículo quando o P1 falta.

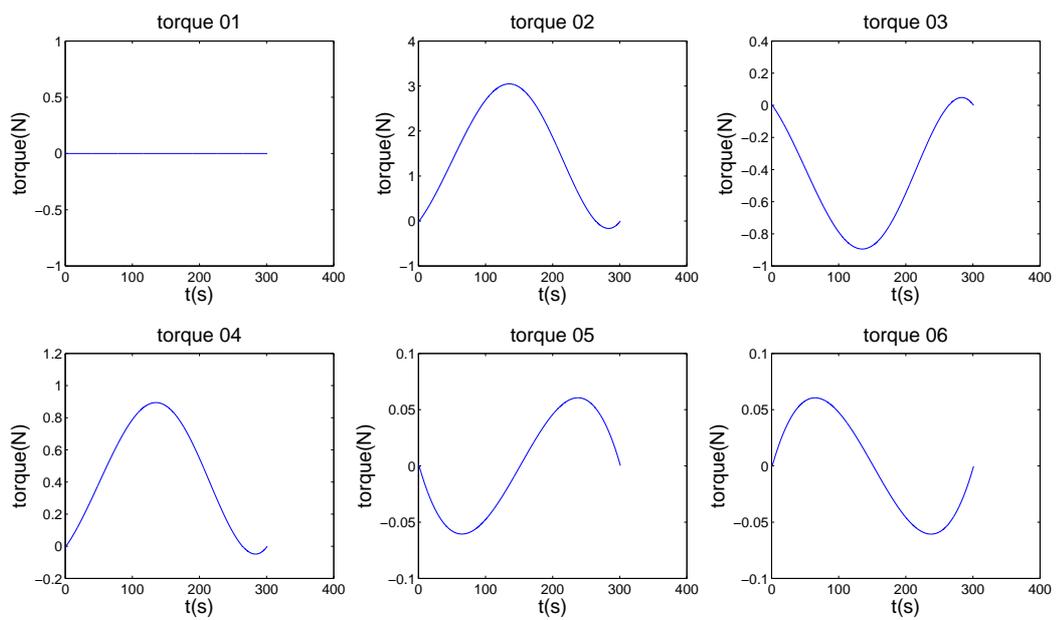


Figura 7.2: Torques do veículo quando P1 falta no início da trajetória ( $t=0$  s).

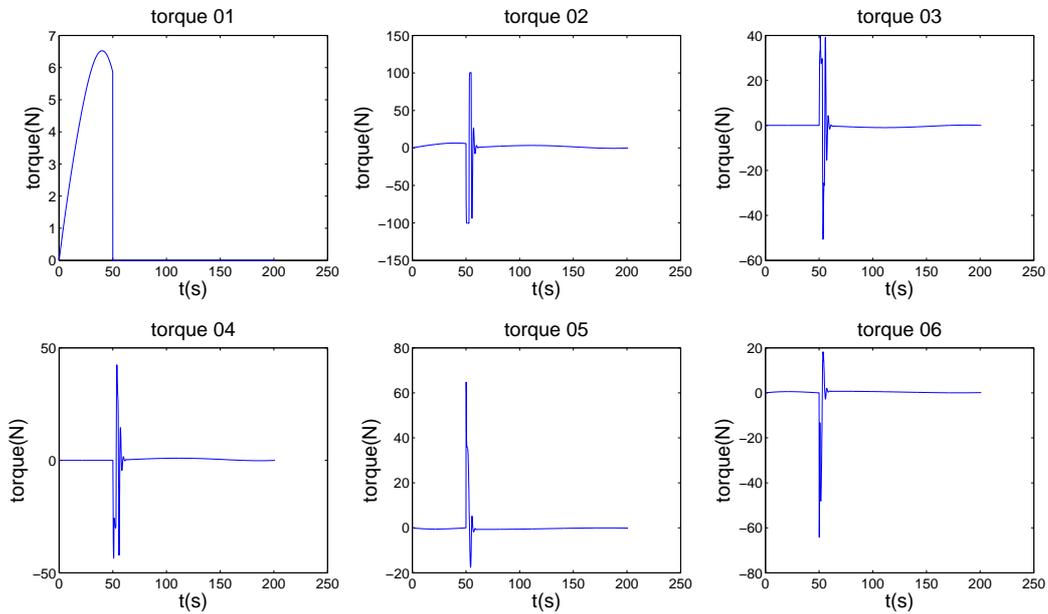


Figura 7.3: Torques do veículo quando P1 falta na metade da trajetória ( $t=50$  s).

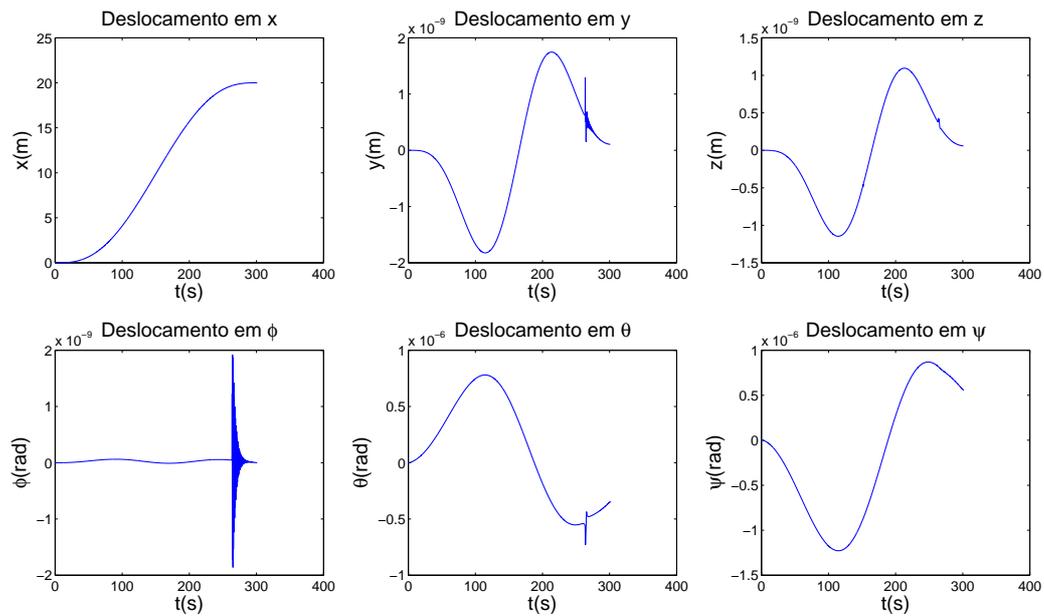


Figura 7.4: Deslocamento do veículo quando P1 falta no início da trajetória ( $t=0$  s).

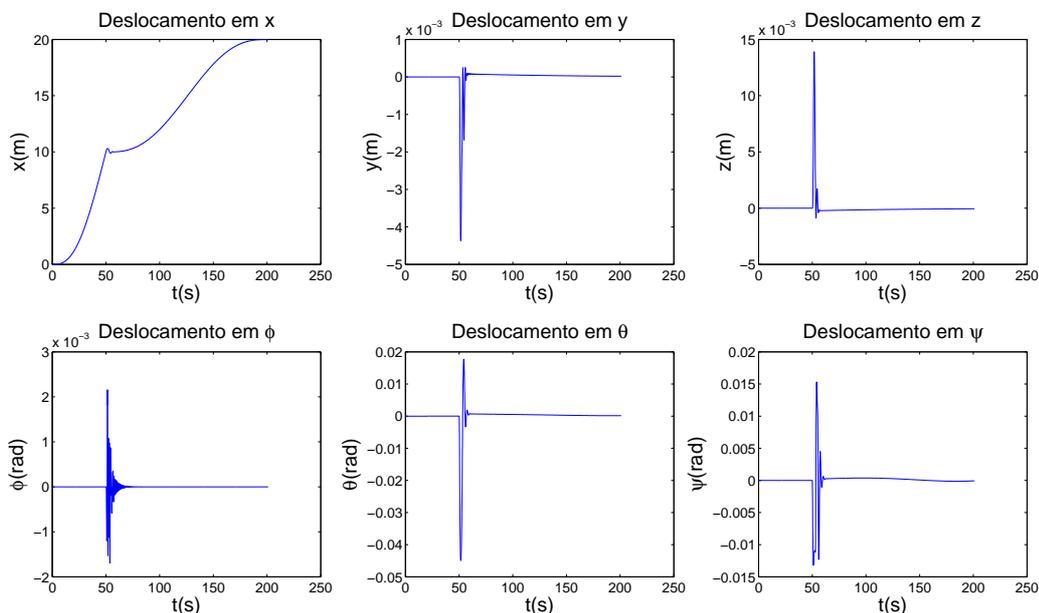


Figura 7.5: Deslocamento do veículo quando P1 falta na metade da trajetória ( $t=50$  s).

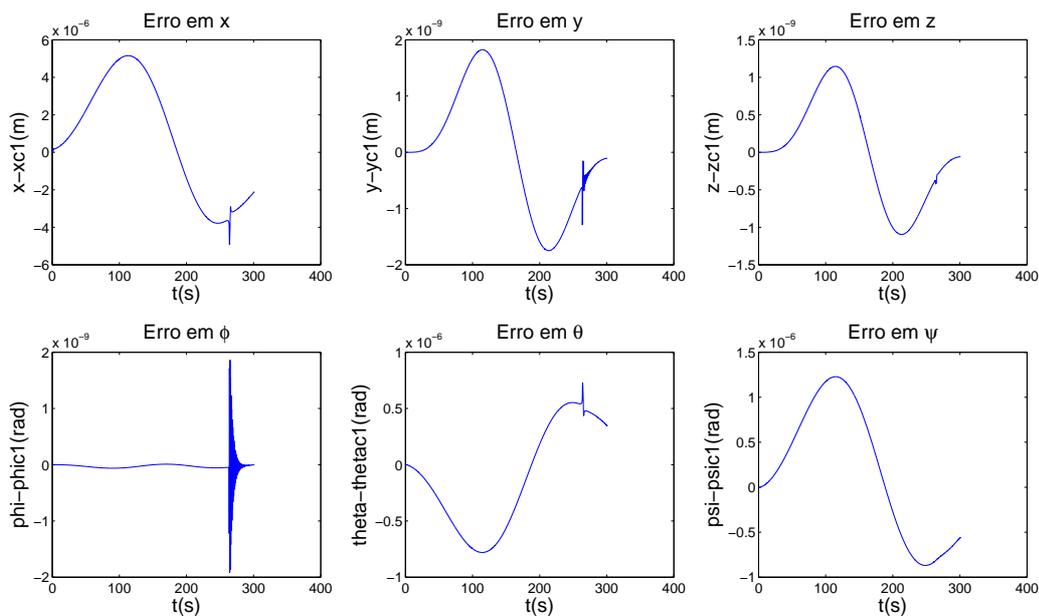


Figura 7.6: Erros do veículo quando P1 falta no início da trajetória ( $t=0$  s).

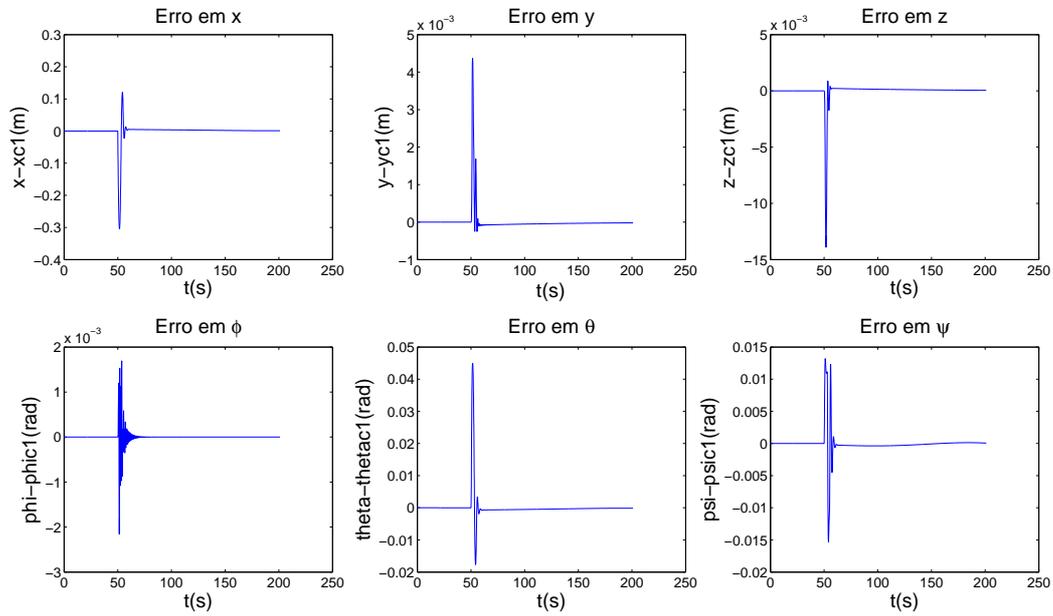


Figura 7.7: Erros do veículo quando P1 falta na metade da trajetória ( $t=50$  s).

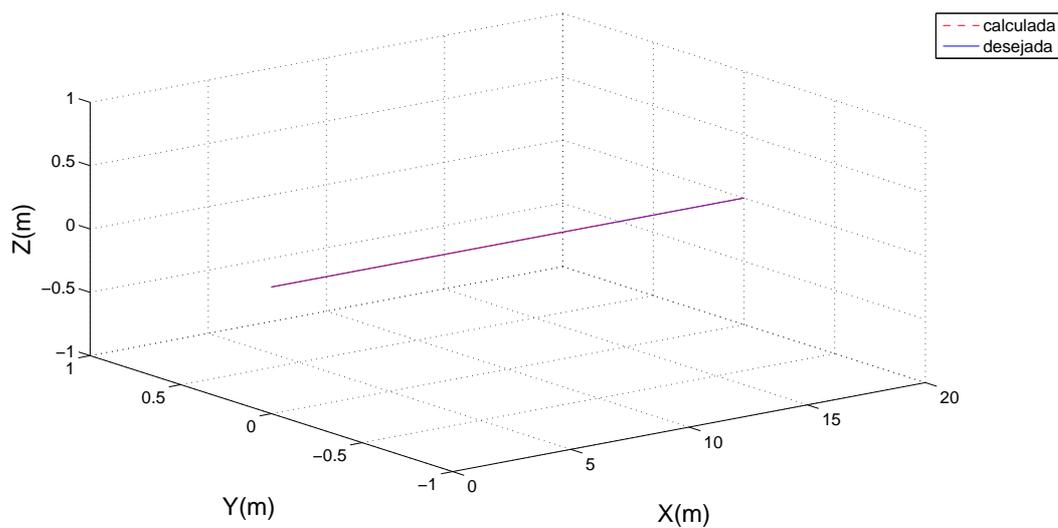


Figura 7.8: Deslocamento em  $x$ ,  $y$ ,  $z$  quando P1 falta no início da trajetória ( $t=0$  s).

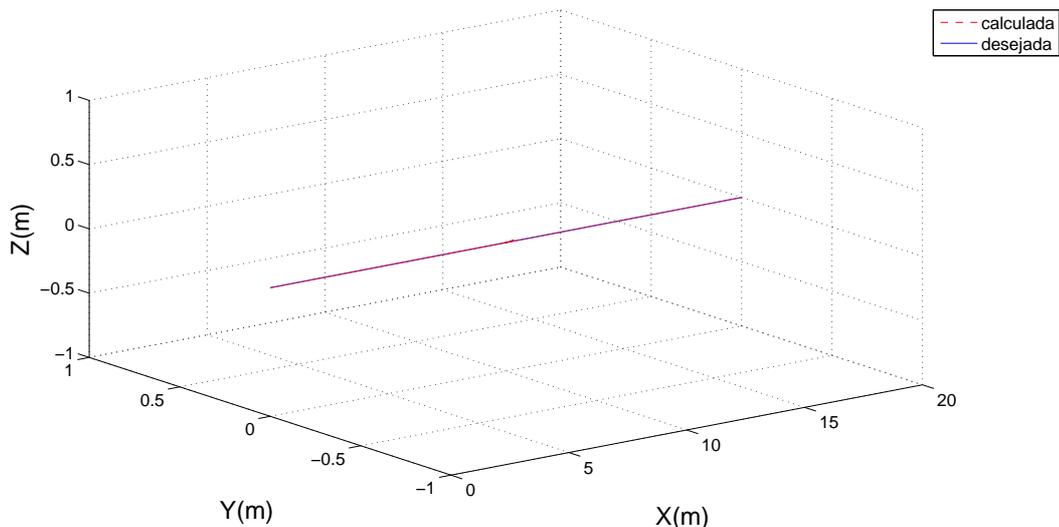


Figura 7.9: Deslocamento em  $x, y, z$  quando P1 falta na metade da trajetória ( $t=50$  s).

### 7.2.2 Falta no P3 ou no P4

P3 e P4 são propulsores que não estão relacionados à trajetória de referência utilizada para este estudo de caso (Ver tabela 5.2), assim em caso de falta em algum destes propulsores o seguimento da trajetória não é afetado. Estes propulsores têm a mesma posição geométrica com respeito ao centro de massa do BA-1 e atuam de forma semelhante no comportamento do veículo, assim sendo será abordada somente a falta no P3.

Na figura 7.10 pode ser observado que a maior parte da força é realizada por P1 e P2, o P4 somente interfere quando existe um erro de trajetória em  $y$ .

Nas figuras 7.11 e 7.12 pode-se observar o deslocamento realizado pelo veículo nas duas situações e nas figuras 7.13 e 7.14 pode-se observar as forças realizadas pelos propulsores P1, P2 e P4. Nas figuras 7.15 e 7.16 mostram-se os erros. Como pode ser percebido, os gráficos são idênticos devido à nula influência destes propulsores na realização desta trajetória em  $x$ . Nas figuras 7.17 e 7.18 pode-se observar o deslocamento em  $x, y$  e  $z$  nas duas situações.

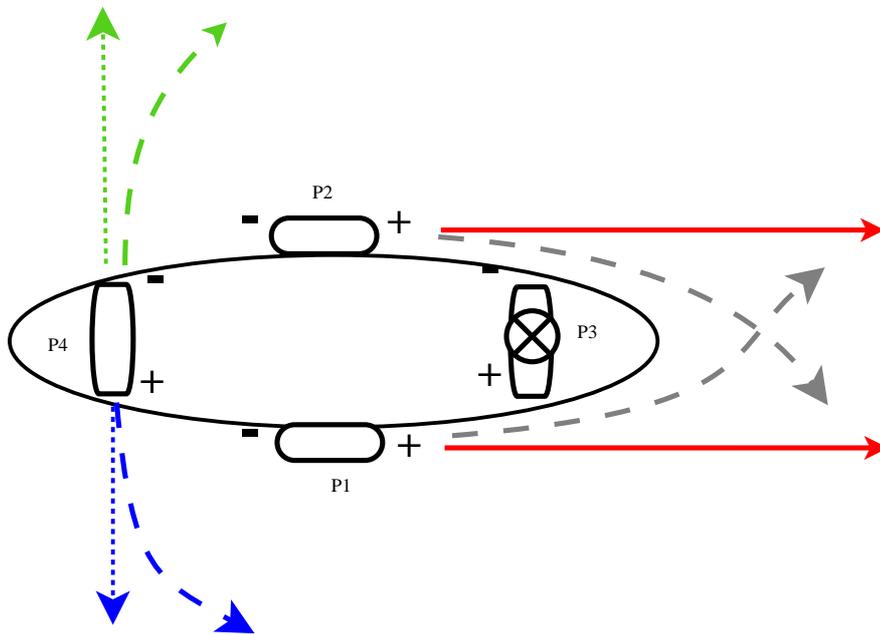


Figura 7.10: Realocação das forças do veículo quando P3 falta.

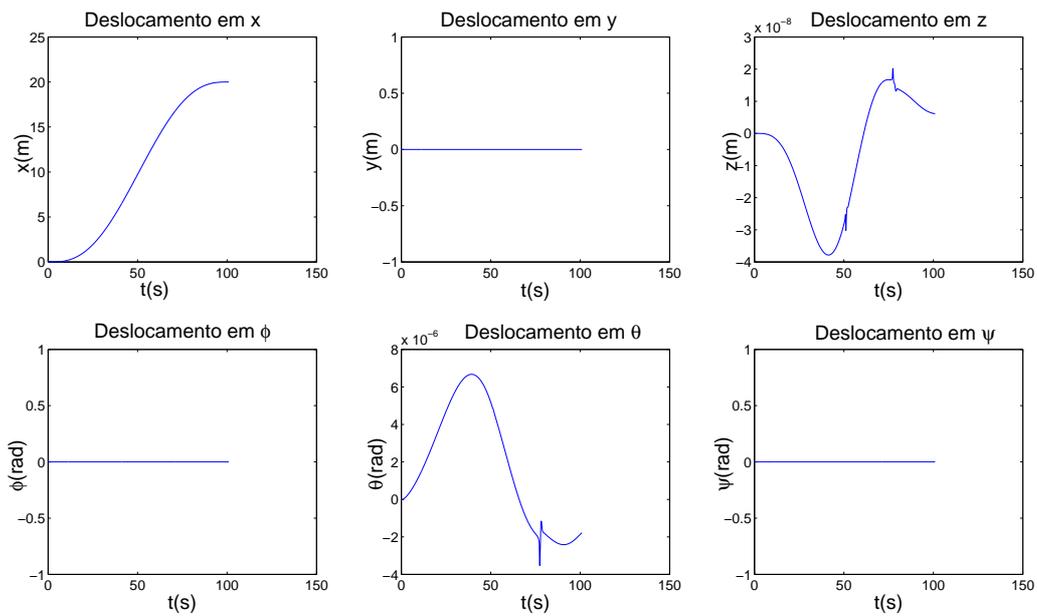


Figura 7.11: Deslocamento do veículo quando P3 falta no início da trajetória ( $t=0$  s).

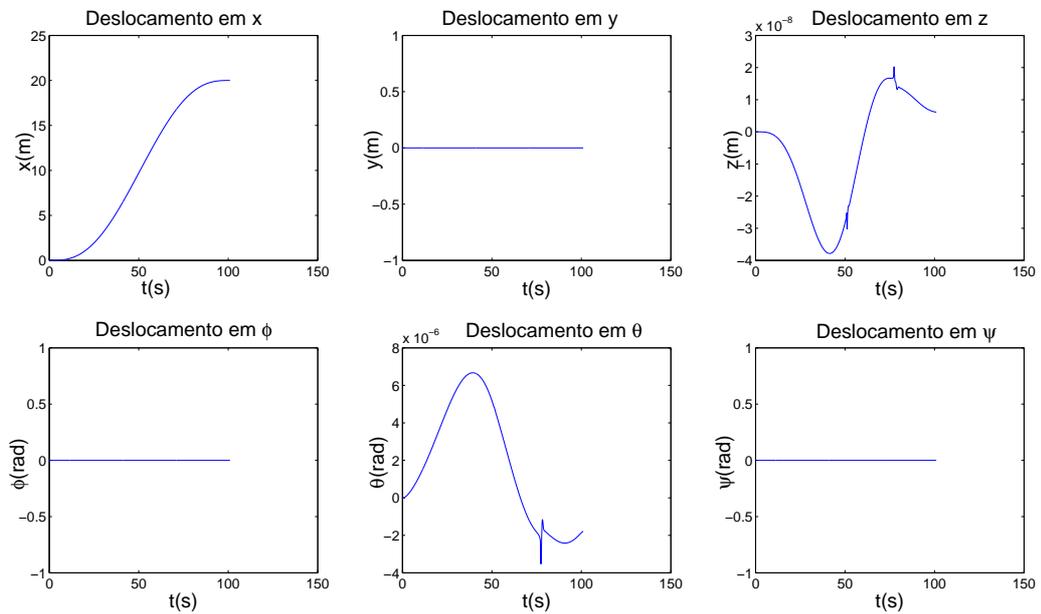


Figura 7.12: Deslocamento do veículo quando P3 falta na metade da trajetória (t=50 s).

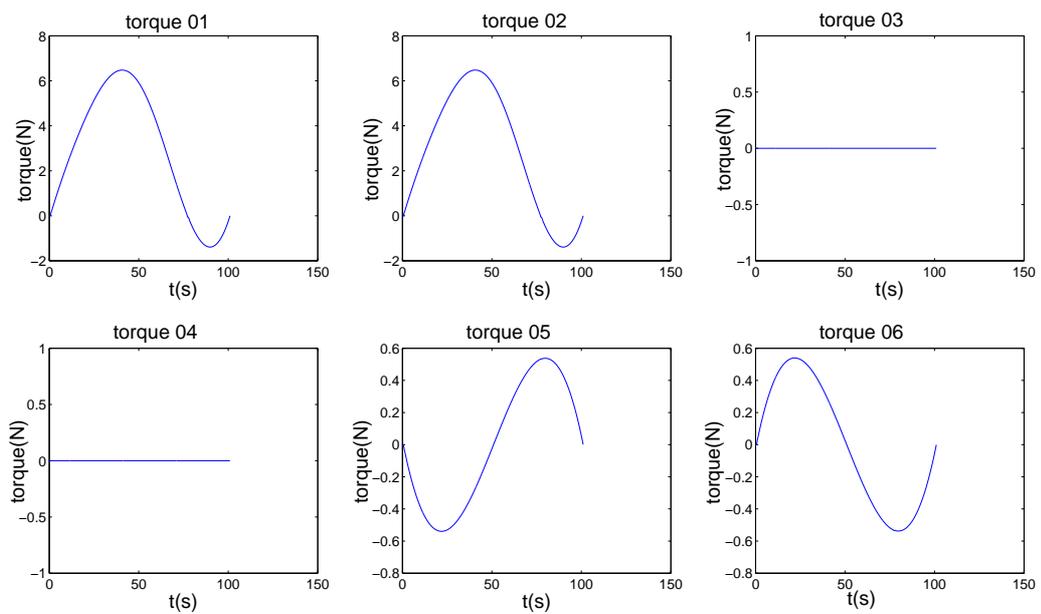


Figura 7.13: Torques do veículo quando P3 falta no início da trajetória (t=0 s).

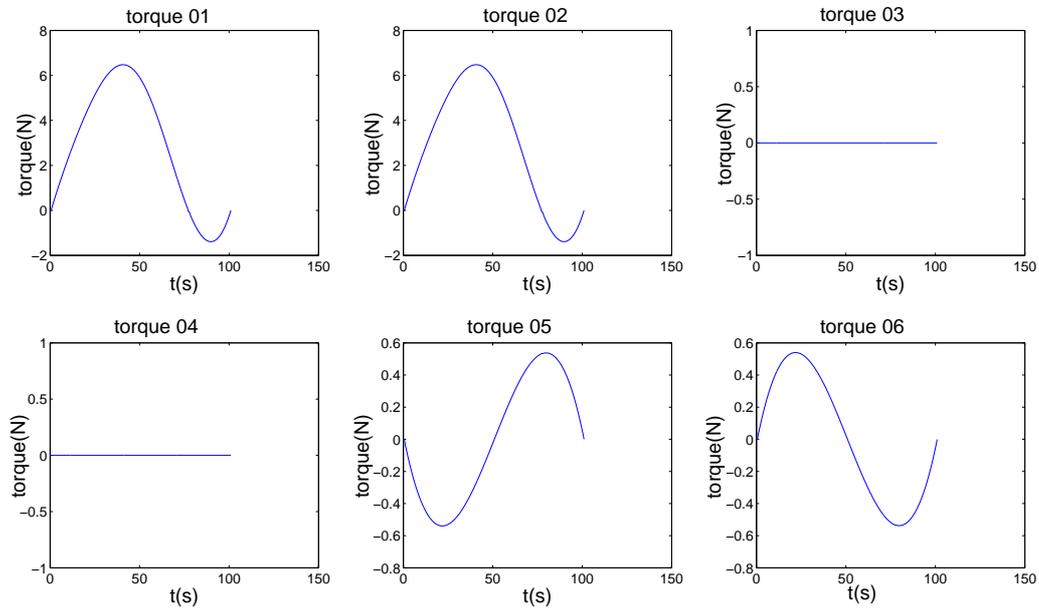


Figura 7.14: Torques do veículo quando P3 falta na metade da trajetória ( $t=50$  s).

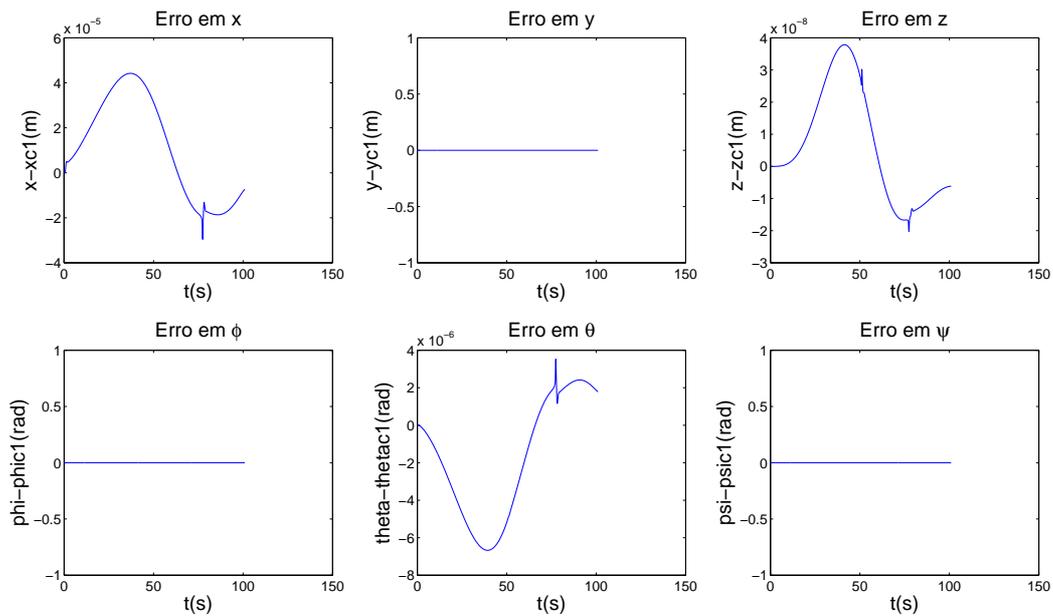


Figura 7.15: Erros do veículo quando P3 falta no início da trajetória ( $t=0$  s).

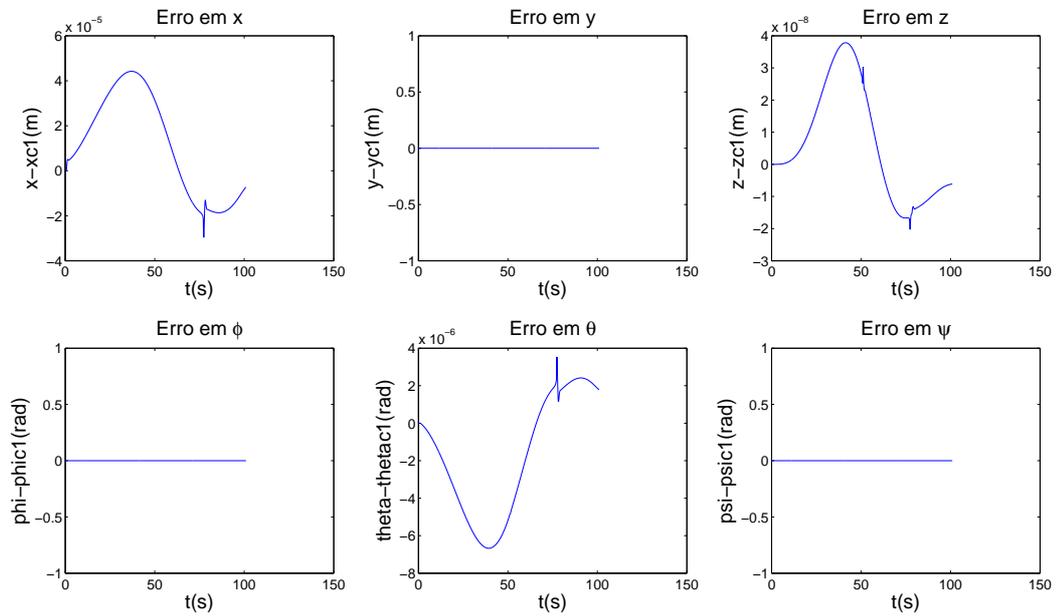


Figura 7.16: Erros do veículo quando P3 falta na metade da trajetória ( $t=50$  s).

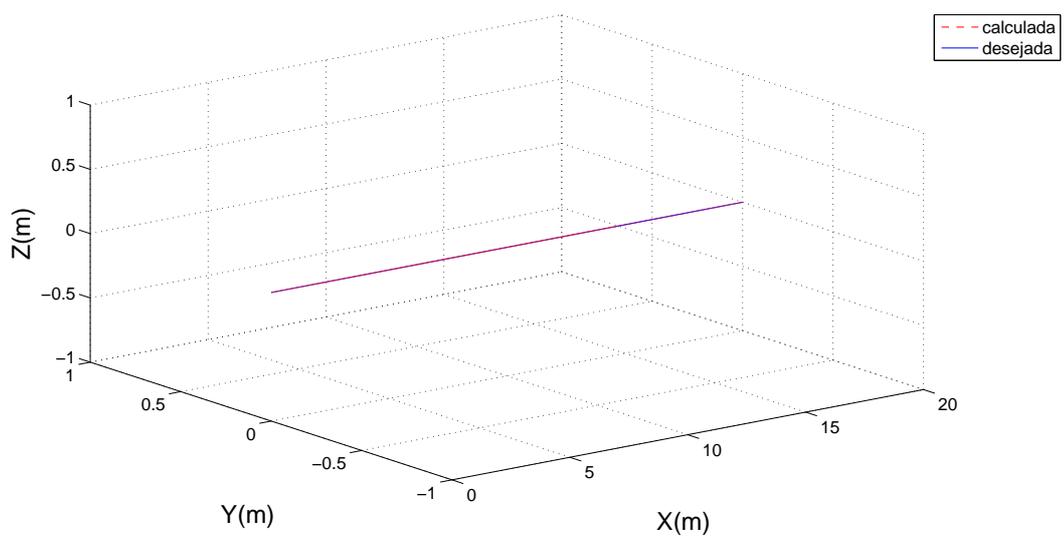


Figura 7.17: Deslocamento em  $x$ ,  $y$ ,  $z$  quando P3 falta no início da trajetória ( $t=0$  s).

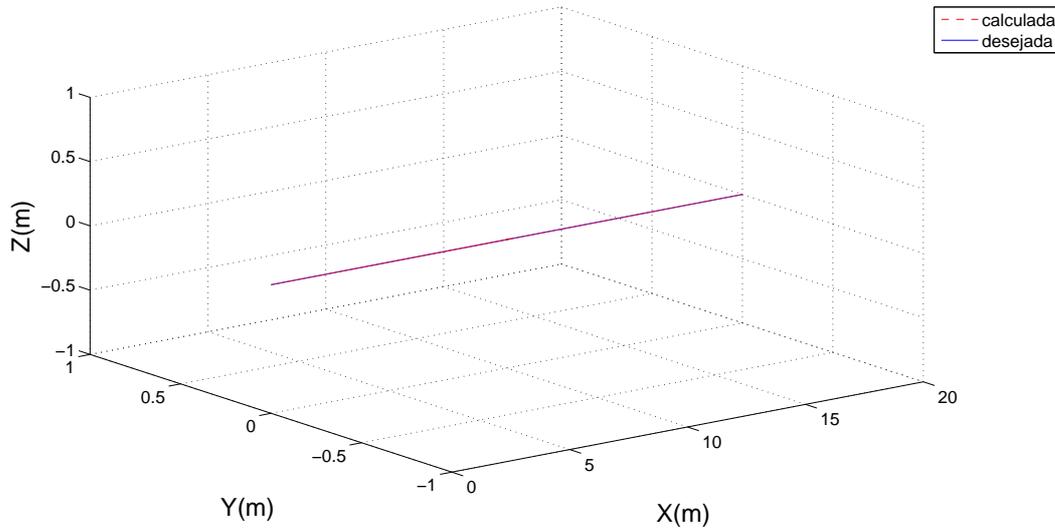


Figura 7.18: Deslocamento em  $x, y, z$  quando P3 falta na metade da trajetória ( $t=50$  s).

## 7.3 Simulações do Caso 2

### 7.3.1 Falta nos propulsores P1 e P2

Faltas nos propulsores P1 e P2, produzem a perda do grau de liberdade em  $x$  do veículo (Ver capítulo 5). Desta forma, para que o veículo possa seguir a trajetória de referência este precisa realizar um movimento de  $90^\circ$  no seu eixo  $\psi$ , de forma a permitir que o veículo possa utilizar os propulsores P3 e P4 para cumprir a trajetória requerida. Porém um esforço maior dos propulsores é necessário para vencer o empuxo hidrodinâmico que um veículo tipo torpedo provoca ao andar rotacionado em  $90^\circ$  na sua guinada.

Na figura 7.19 pode-se observar como o veículo é capaz de seguir a trajetória desejada quando as faltas acontecem no início da trajetória ( $t=0$  segundos). Entretanto, quando as faltas ocorrem na metade da trajetória o veículo se desvia mais de 8 metros do trajeto no eixo  $y$ , devido a que ao utilizar os propulsores P3 e P4 para realizar o movimento em  $x$ , o veículo perde o controle sobre o grau de liberdade em  $y$  e a ação da velocidade do veículo neste instante ( $t=50$  segundos) faz com que o este se desvie da trajetória em  $y$  sem que seja capaz de corrigir o erro de trajeto neste grau de liberdade (Ver figura 7.20).

Na figura 7.21 observa-se que os torques dos propulsores P3 e P4 realizam um maior esforço no início da trajetória, onde o veículo rotaciona  $90^\circ$ , em seguida estes propulsores realizam um torque uniforme, e P5 e P6 precisam realizar esforços contínuos para manter a profundidade desejada. Na figura 7.22 quando ocorre a falta no P1 e P2, P3 e P4 se saturam para seguir o trajeto desejado. P5 e P6 realizam um esforço grande tentando compensar os empuxos hidrodinâmicos.

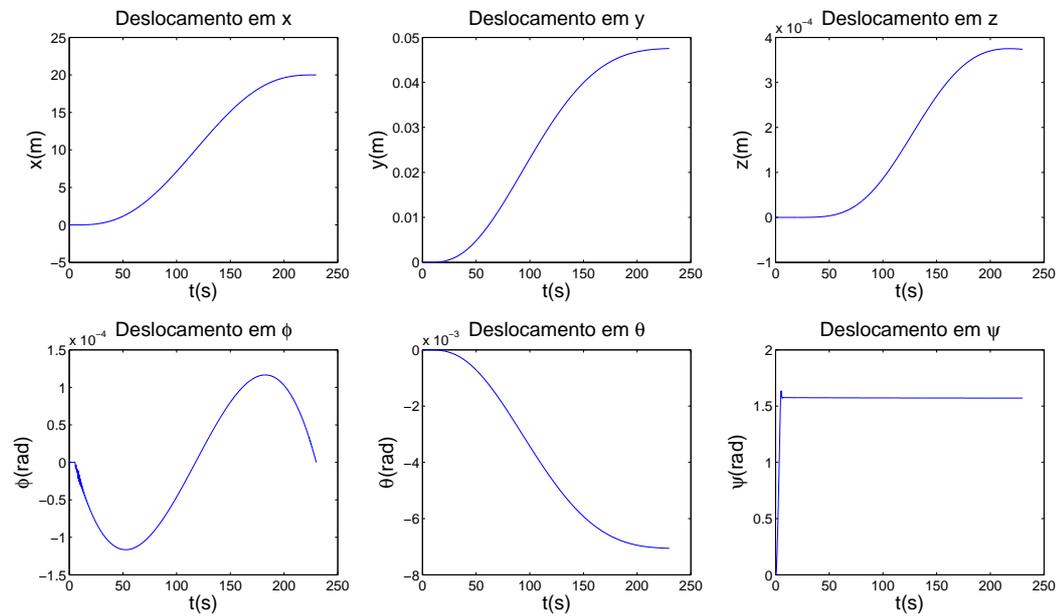


Figura 7.19: Deslocamento do veículo quando P1 e P2 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

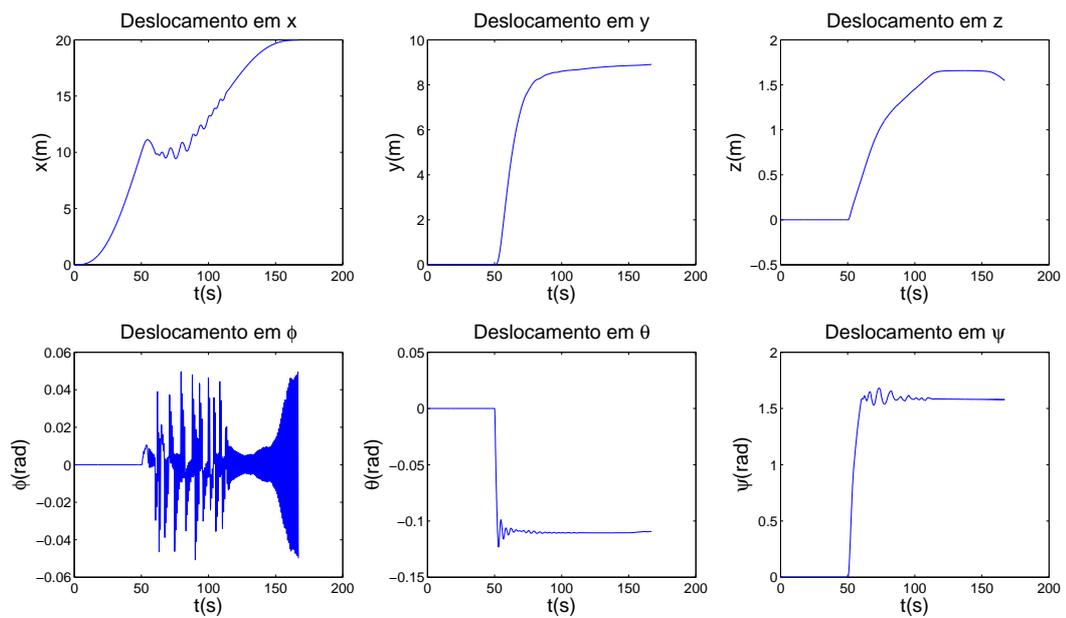


Figura 7.20: Deslocamento do veículo quando P1 e P2 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

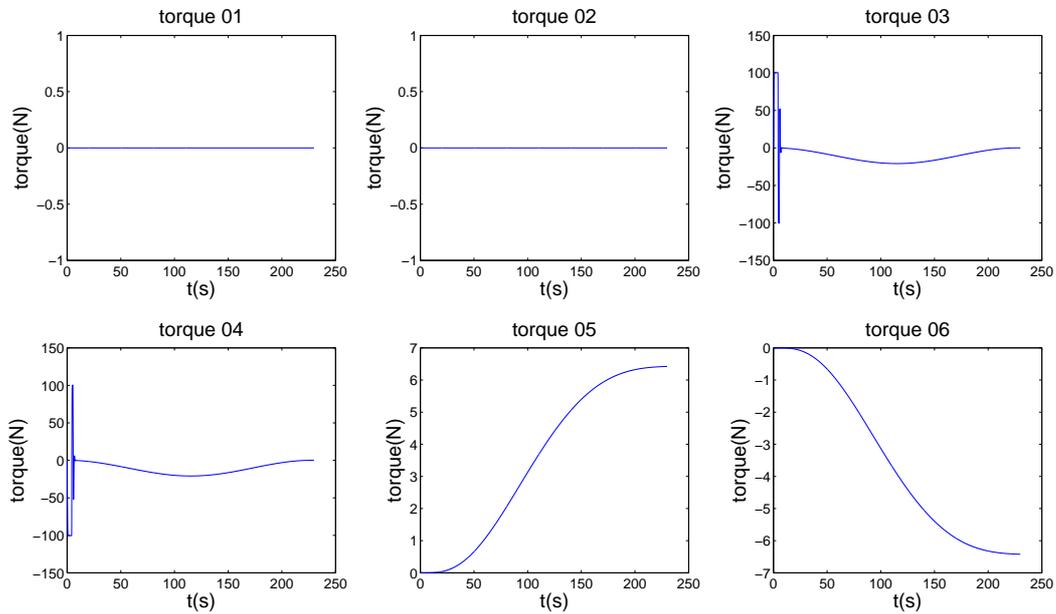


Figura 7.21: Torques do veículo quando P1 e P2 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

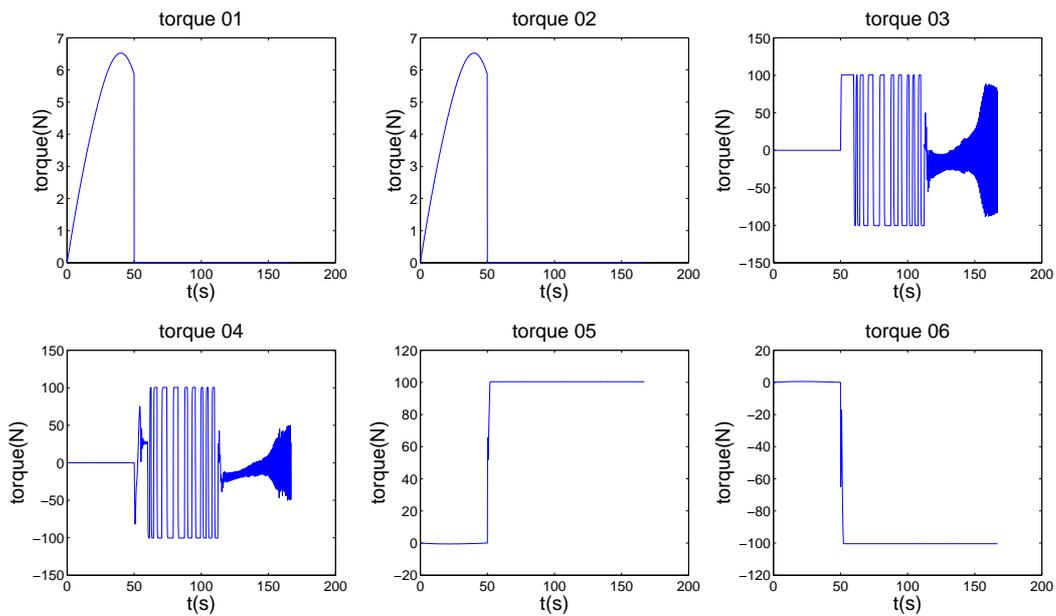


Figura 7.22: Torques do veículo quando P1 e P2 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

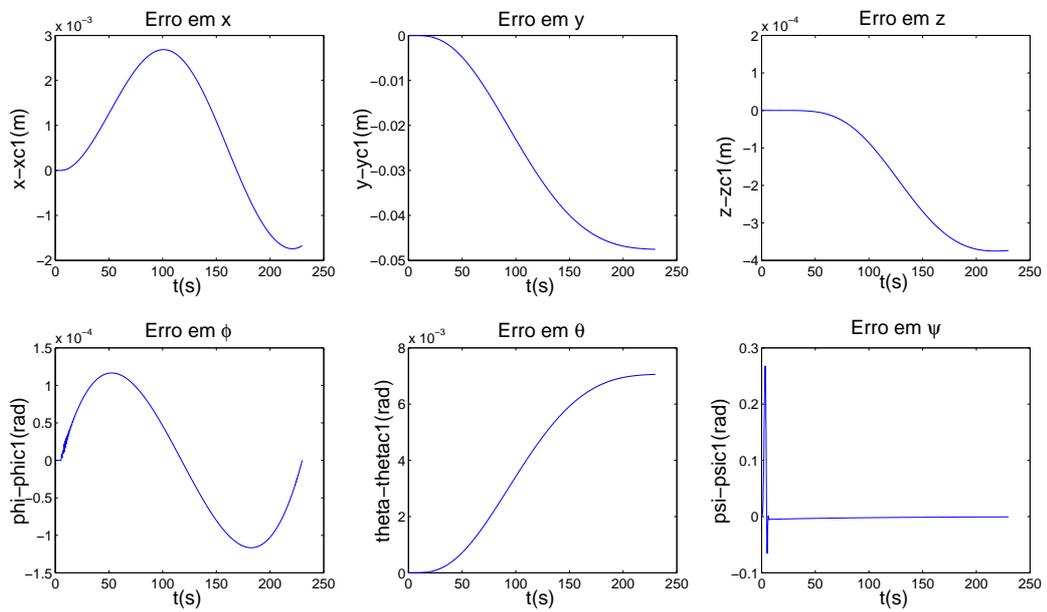


Figura 7.23: Erros do veículo quando P1 e P2 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

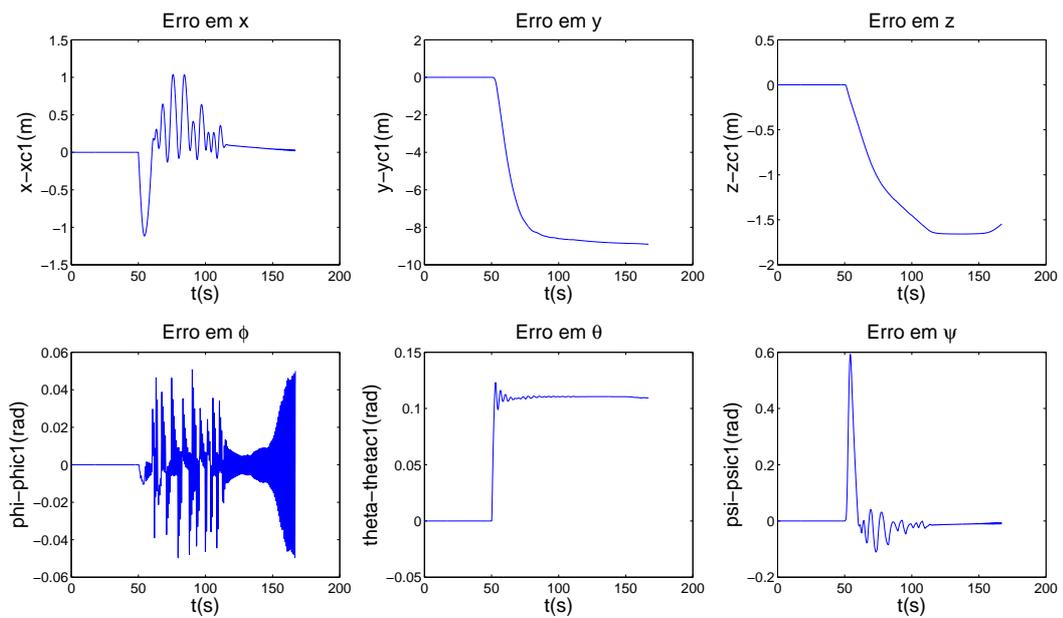


Figura 7.24: Erros do veículo quando P1 e P2 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

Na figura 7.23 pode-se observar o erro de trajetória em  $x$  é controlado e mantém-se na faixa dos milímetros. Também o erro em  $\psi$  é controlado e na faixa dos centésimos de radiano. Entretanto o erro em  $y$  é pequeno, mas crescente, similarmente aos erros em  $z$  e  $\theta$ . O erro em  $\phi$  é controlado automaticamente (como foi mencionado no capítulo 5).

Na figura 7.24 pode ser observado que no instante da falta (t=50 segundos) o veículo consegue permanecer na trajetória em  $x$  com erros na faixa de 1 metro, mas perde o controle no eixo  $y$  e  $z$  o que provoca que o veículo não consiga diminuir o erro nestes eixos. Nas figuras 7.25 e 7.26 pode-se observar o deslocamento em  $x$ ,  $y$  e  $z$  nas duas situações.

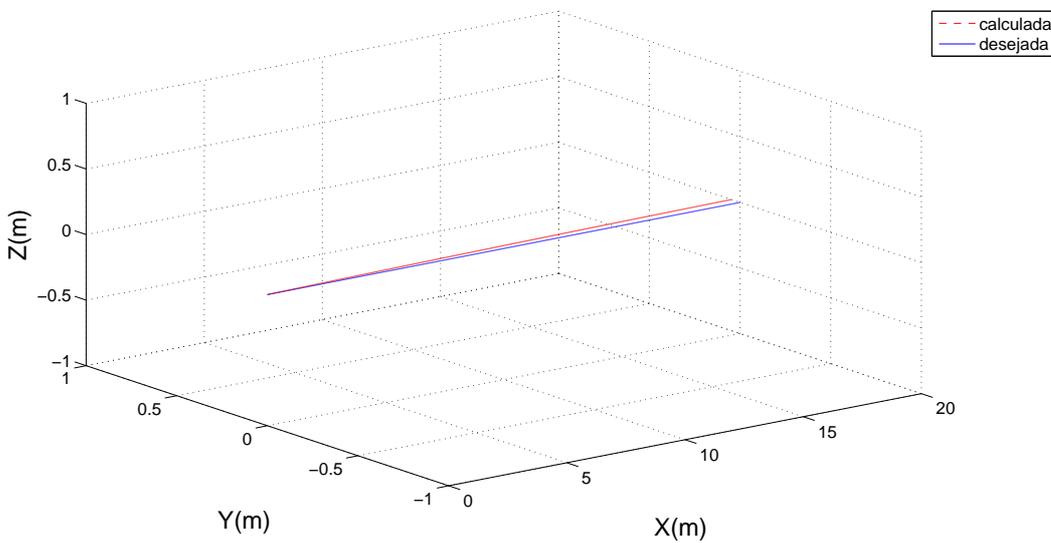


Figura 7.25: Deslocamento em  $x$ ,  $y$ ,  $z$  quando P1 e P2 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

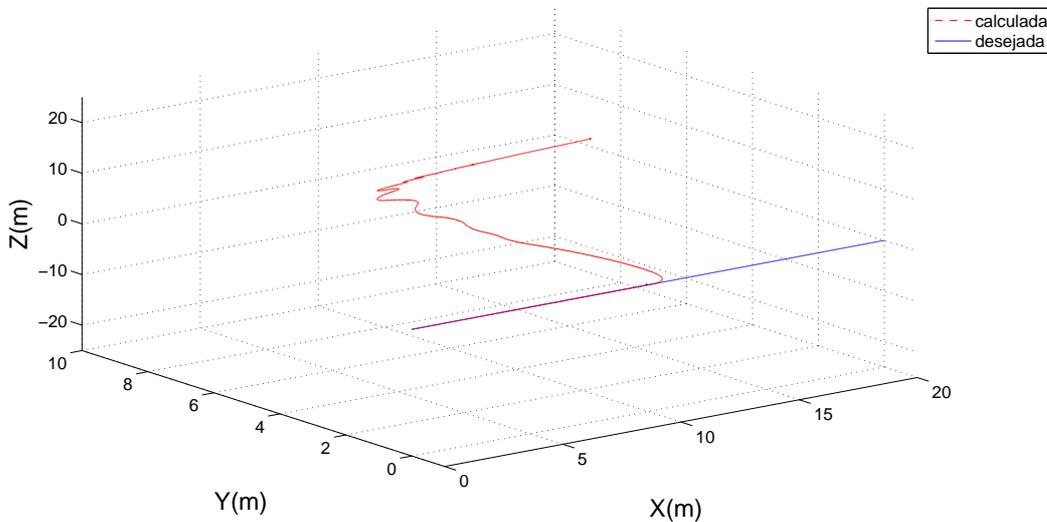


Figura 7.26: Deslocamento em  $x$ ,  $y$ ,  $z$  quando P1 e P2 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

### 7.3.2 Falta nos propulsores P3 e P4

Os propulsores P3 e P4 não estão vinculados de forma direta para o seguimento da trajetória requerida. Porém a perda destes propulsores ocasiona que o veículo já não possa ter controle sobre a sua deriva quando realiza uma trajetória em  $x$ .

Na figuras 7.27 e 7.28 pode-se observar o deslocamento do veículo com faltas desde  $t=0$  segundos e desde  $t=50$  segundos, respectivamente. Note-se que o deslocamento desejado em  $x$  é alcançado em ambos casos.

Nos gráficos 7.29 e 7.30 pode ser observado que os erros são menores a 1 centímetro para as duas situações. Com respeito as forças de propulsão, como já foi mencionado, tanto na situação 1 (figura 7.31) como na situação 2 (figura 7.32) as faltas não afetam o desempenho do veículo. Nas figuras 7.33 e 7.34 pode-se observar o deslocamento em  $x, y$  e  $z$  nas duas situações.

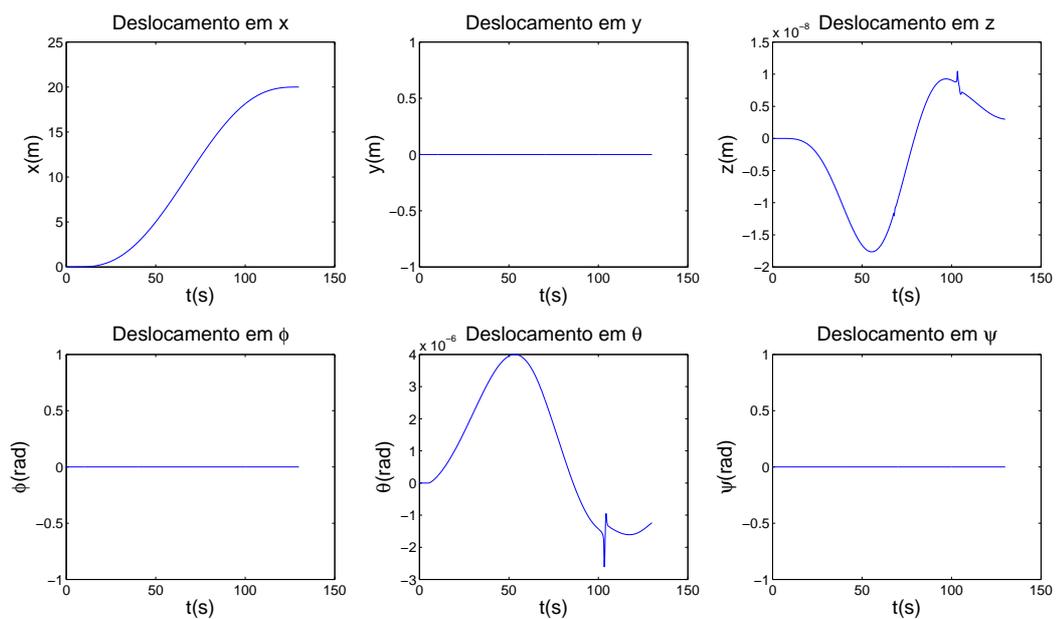


Figura 7.27: Deslocamento do veículo quando P3 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

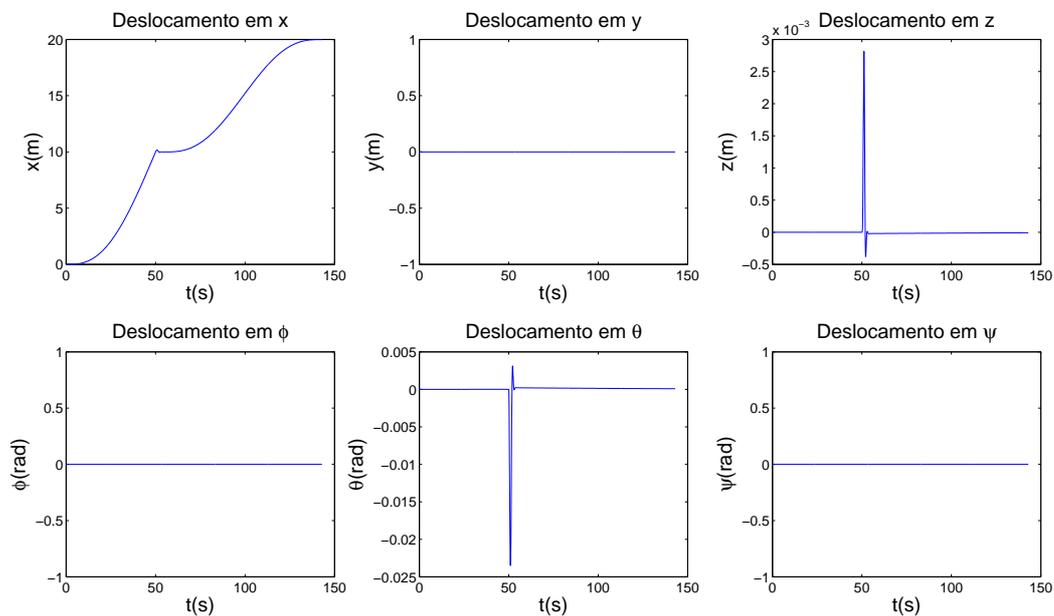


Figura 7.28: Deslocamento do veículo quando P3 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

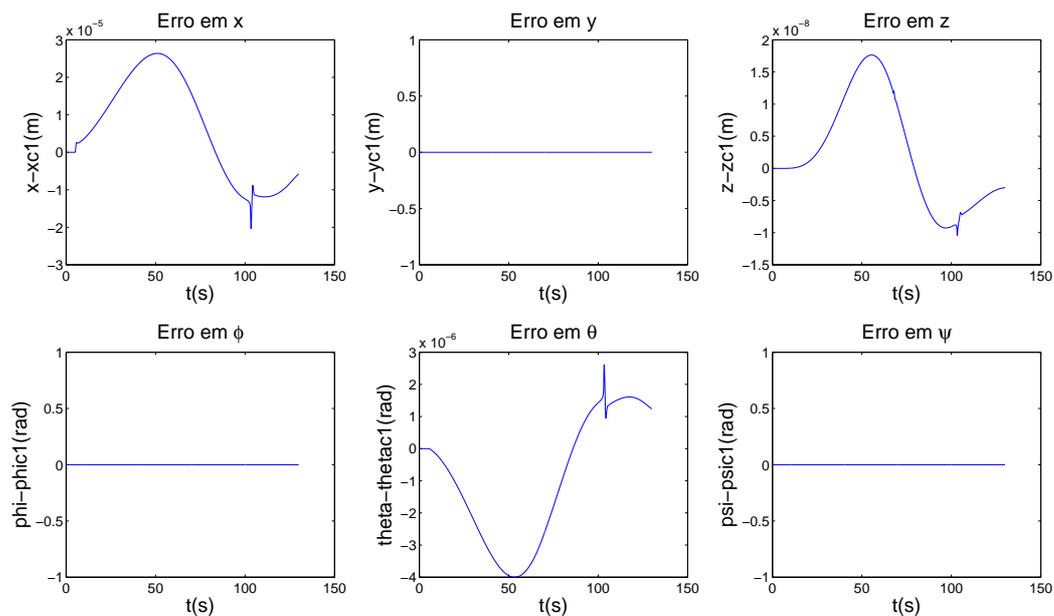


Figura 7.29: Erro do veículo quando P3 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

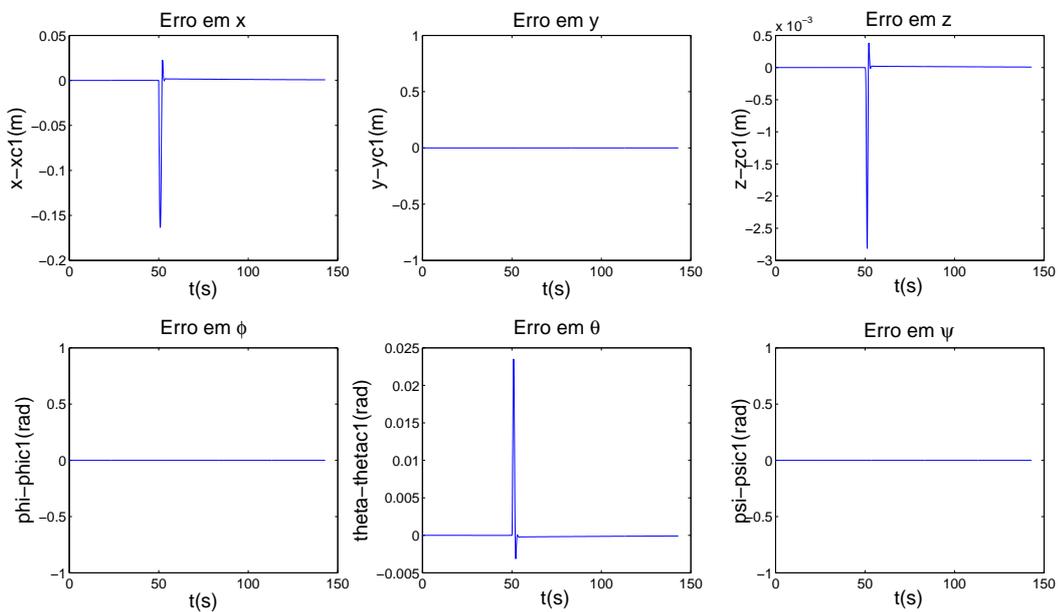


Figura 7.30: Erro do veículo quando P3 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

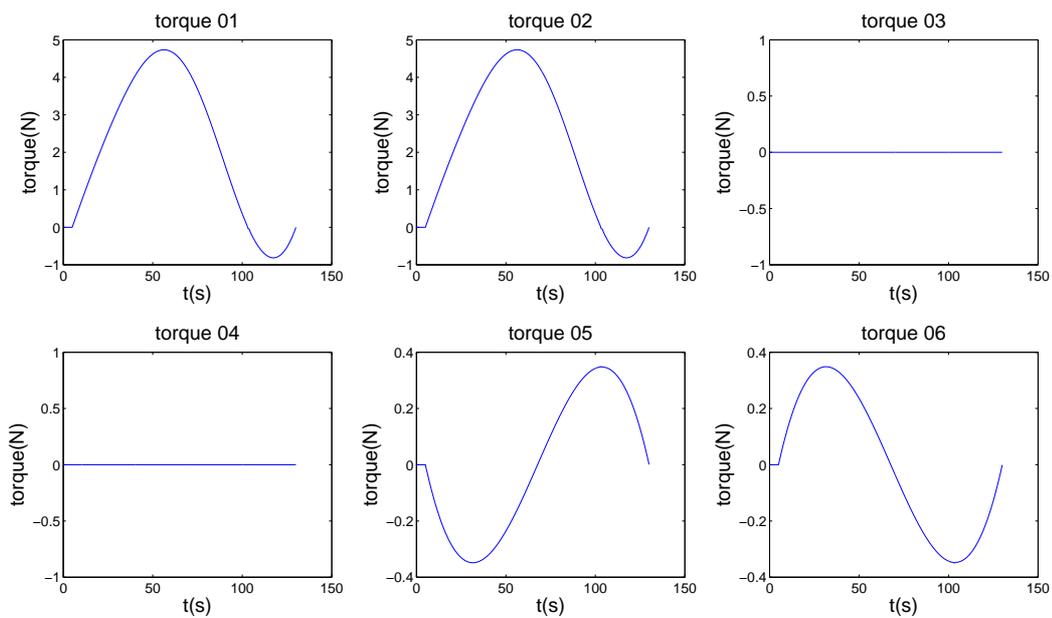


Figura 7.31: Torque do veículo quando P3 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

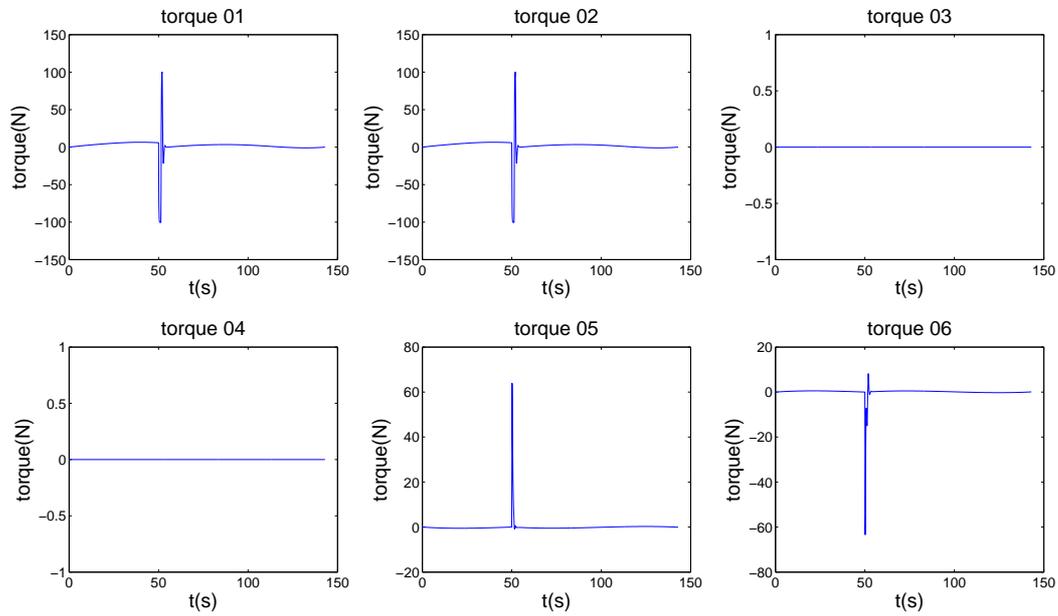


Figura 7.32: Torque do veículo quando P3 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

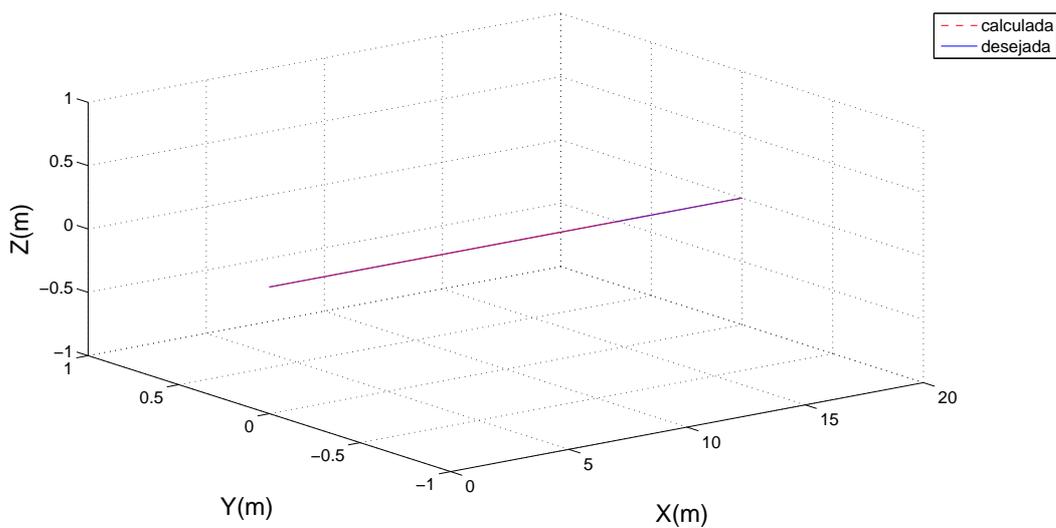


Figura 7.33: Deslocamento em  $x, y, z$  quando P3 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

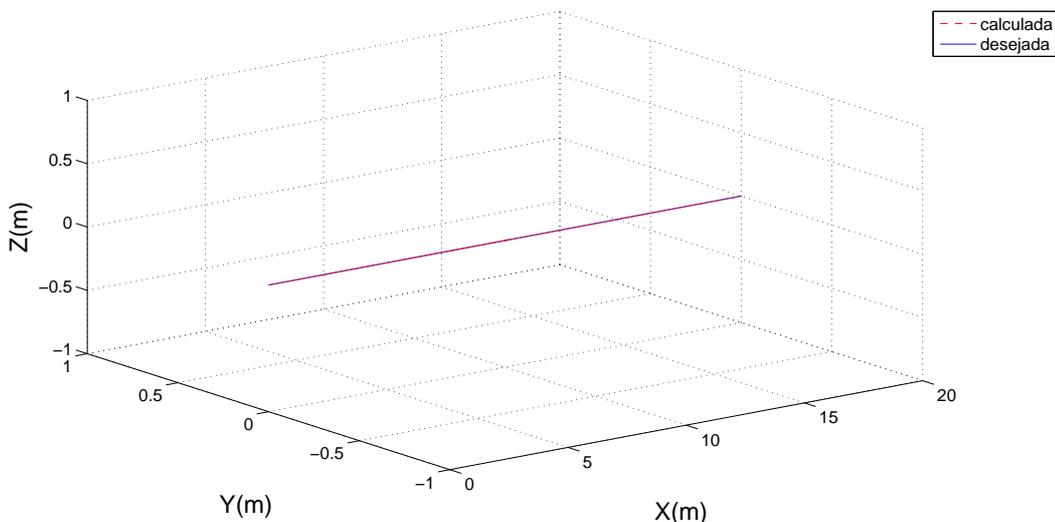


Figura 7.34: Deslocamento em  $x$ ,  $y$ ,  $z$  quando P3 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

### 7.3.3 Falta nos propulsores P1 e P3

Quando faltas no P1 e P3 ocorrem o veículo deve se reposicionar de tal forma que os propulsores P1 e P3 possam gerar uma força resultante no eixo  $x$  desejado (Ver capítulo 5), então o veículo segue a trajetória com um ângulo não nulo.

Na figura 7.35 pode-se observar que o veículo consegue seguir a trajetória desejada em  $x$  com desvios de trajetória na faixa de meio centímetro no eixo  $y$ .

Na situação de falta na metade do trajeto, como pode-se observar na figura 7.36, o veículo também consegue realizar o trajeto em  $x$ , entretanto o desvio em  $y$  no momento da falta é maior a 1.5 metros devido às forças inerciais remanentes provocadas pela locomoção com ângulo de guinada não nulo.

Nas figuras 7.37 e 7.38 pode-se observar os esforços do P3, P4, P5 e P6 nesta situação de falta. Além disso, nas figuras 7.39 e 7.40 podem-se observar que os erros de trajetória em  $x$  estão na faixa dos 0.4 metros em ambas situações. Nas figuras 7.41 e 7.42 pode-se observar o deslocamento em  $x$ ,  $y$  e  $z$  nas duas situações.

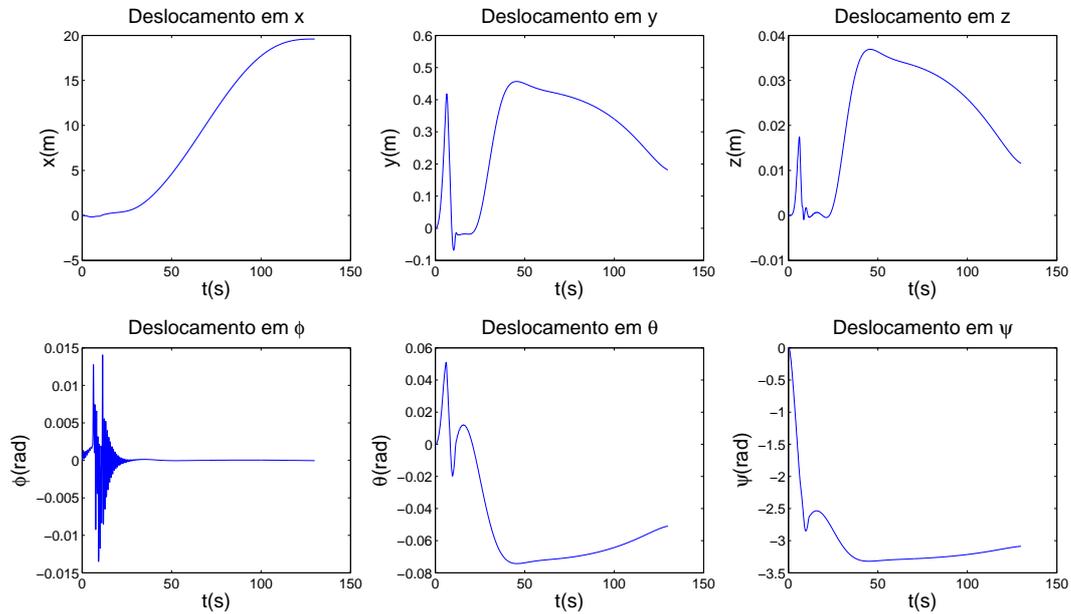


Figura 7.35: Deslocamento do veículo quando P1 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

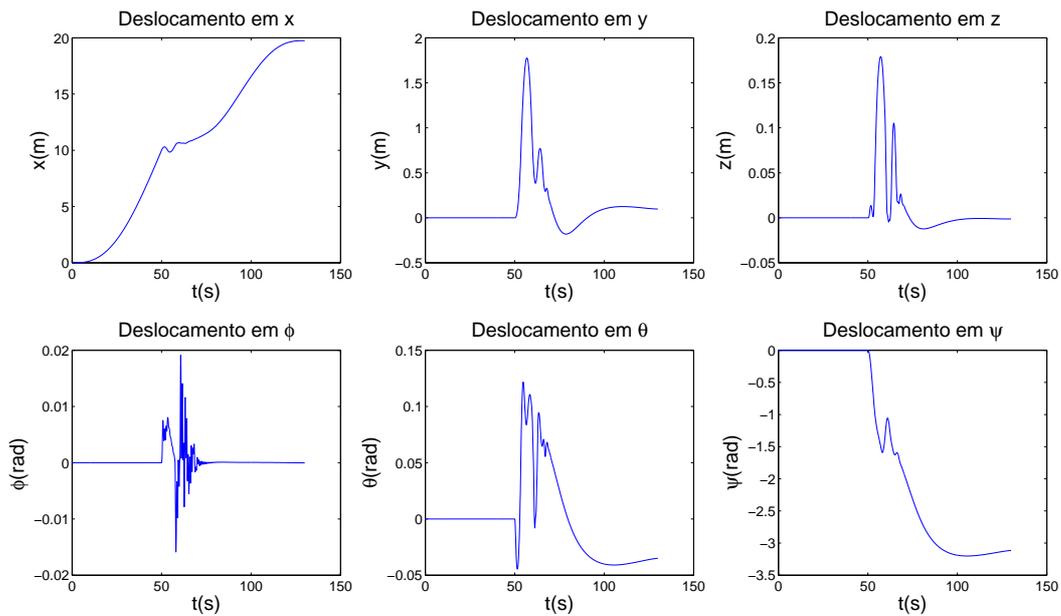


Figura 7.36: Deslocamento do veículo quando P1 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

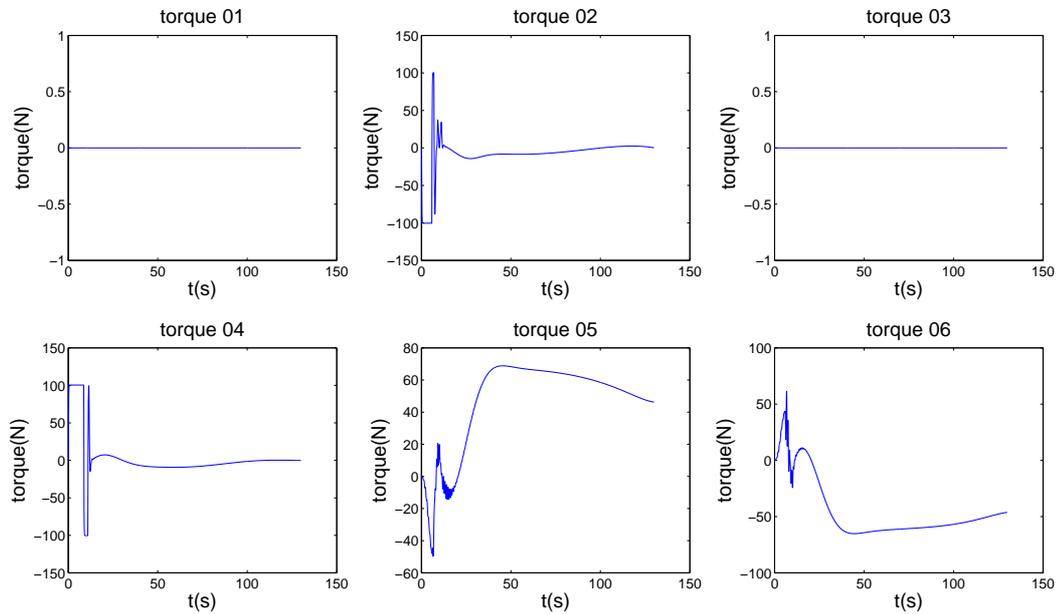


Figura 7.37: Torque do veículo quando P1 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

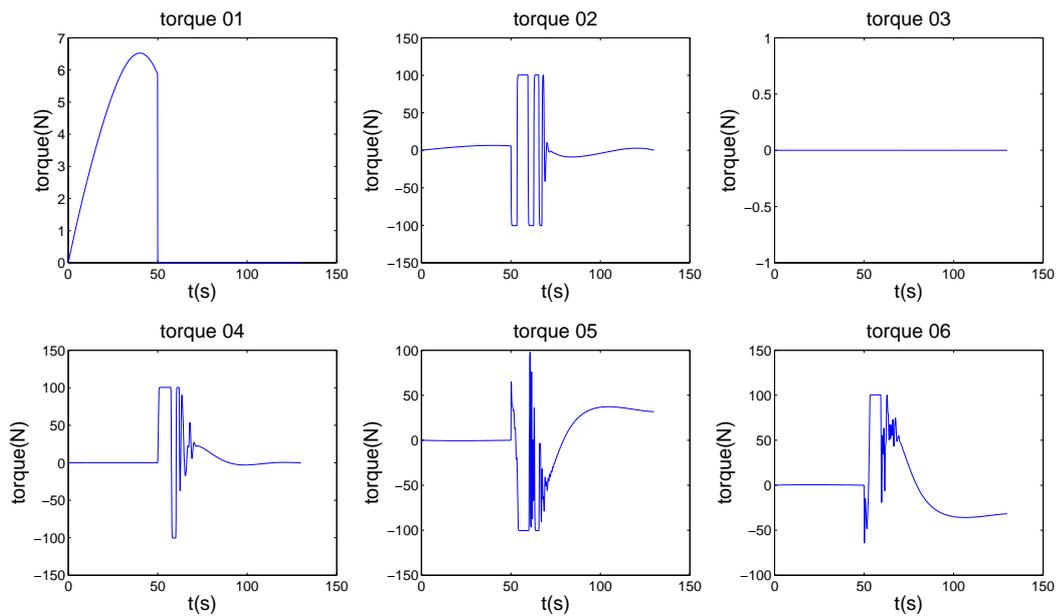


Figura 7.38: Torque do veículo quando P1 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

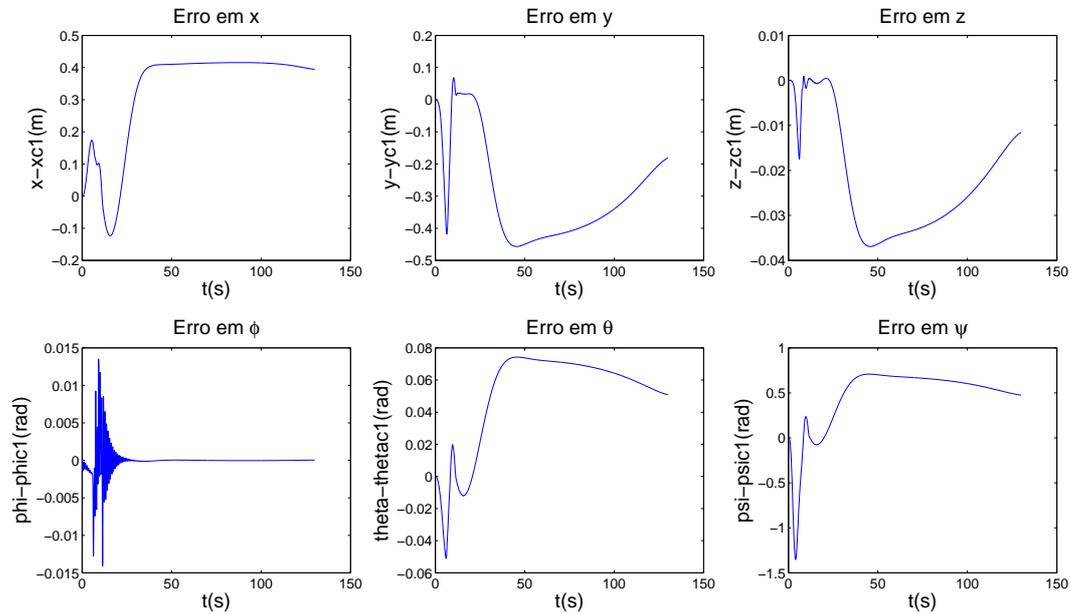


Figura 7.39: Erros do veículo quando P1 e P3 faltam no início da trajetória (t=0 s).

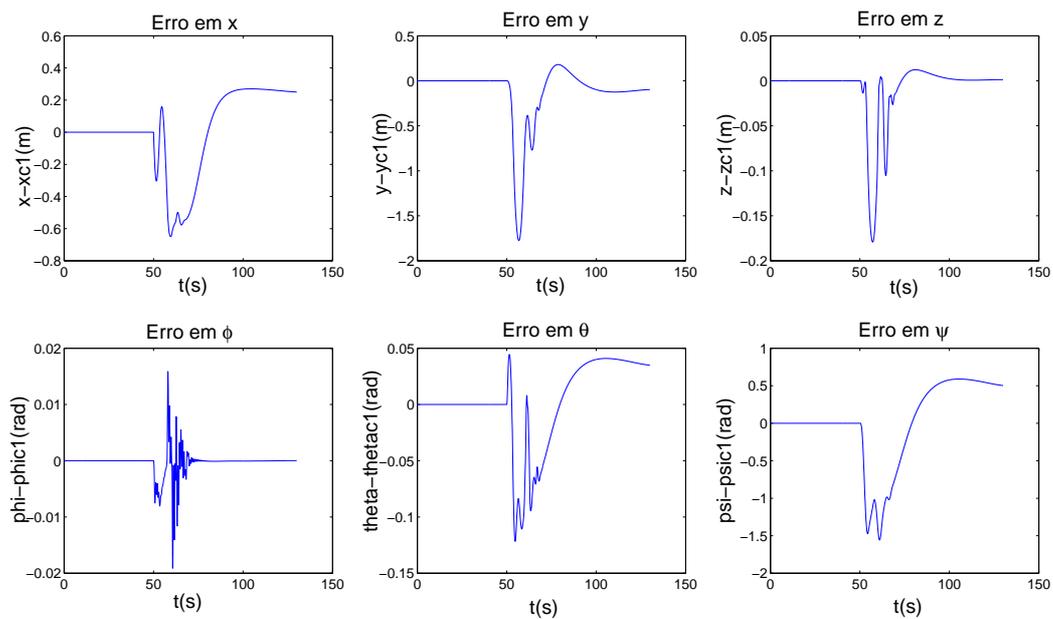


Figura 7.40: Erros do veículo quando P1 e P3 faltam na metade da trajetória (t=50 s).

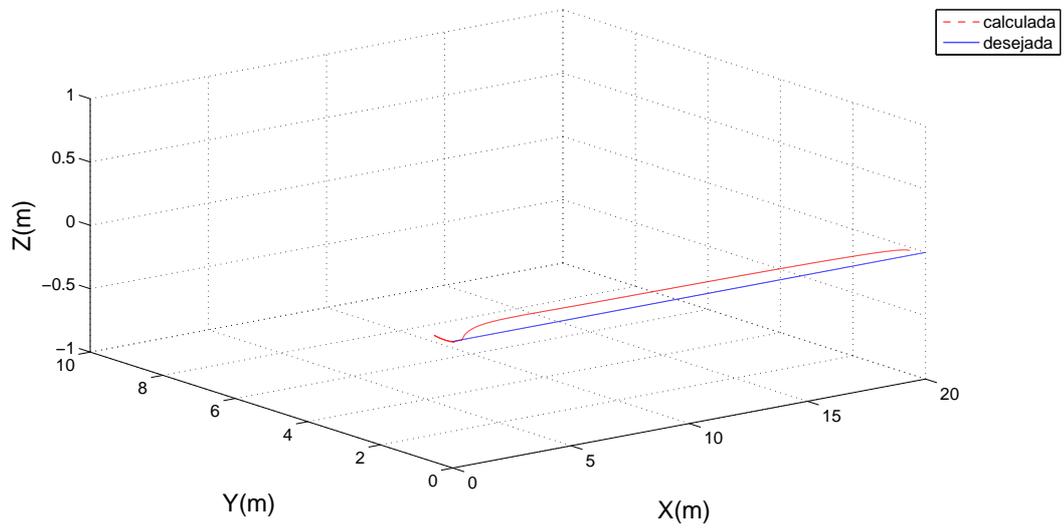


Figura 7.41: Deslocamento em  $x$ ,  $y$ ,  $z$  quando P1 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

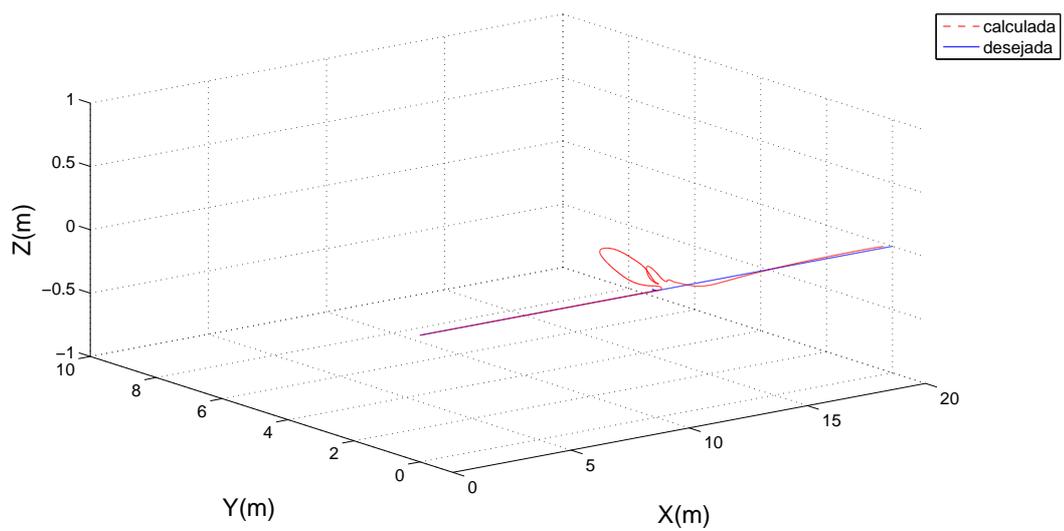


Figura 7.42: Deslocamento em  $x$ ,  $y$ ,  $z$  quando P1 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

### 7.3.4 Falta nos propulsores P1 e P4

Quando faltas no P1 e P4 ocorrem o veículo deve se reposicionar para gerar uma força resultante no eixo  $x$  desejado (Ver capítulo 5). Então o veículo segue a trajetória com um ângulo não nulo.

Nas figuras 7.43 e 7.44 pode-se observar que o veículo consegue seguir a trajetória desejada em  $x$  com desvios de trajetória no eixo  $y$  menores a 0.4 metros.

Nas figuras 7.45 e 7.46 pode-se observar os esforços do P3, P4, P5 e P6 nesta situação de falta. Por outro lado, os erros de trajetória em  $x$  gerados por faltas no início da trajetória estão na faixa de 0.15 metros, e os erros gerados por faltas na metade da trajetória estão na faixa dos 0.3 metros, como pode ser observado nas figuras 7.47 e 7.48, respectivamente. Nas figuras 7.49 e 7.50 pode-se observar o deslocamento em  $x$ ,  $y$  e  $z$  nas duas situações.

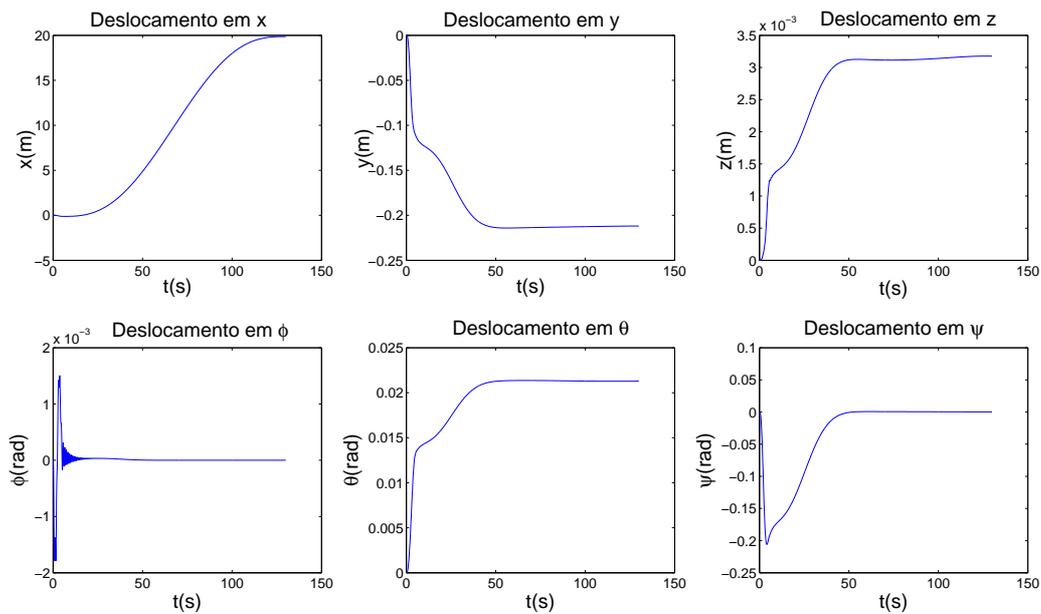


Figura 7.43: Deslocamento do veículo quando P1 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

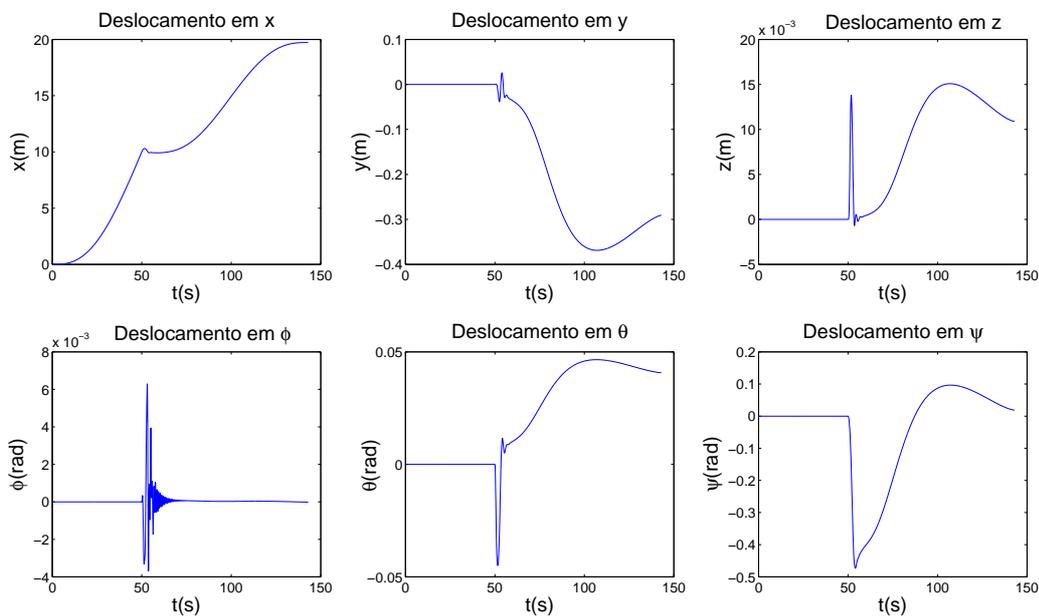


Figura 7.44: Deslocamento do veículo quando P1 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

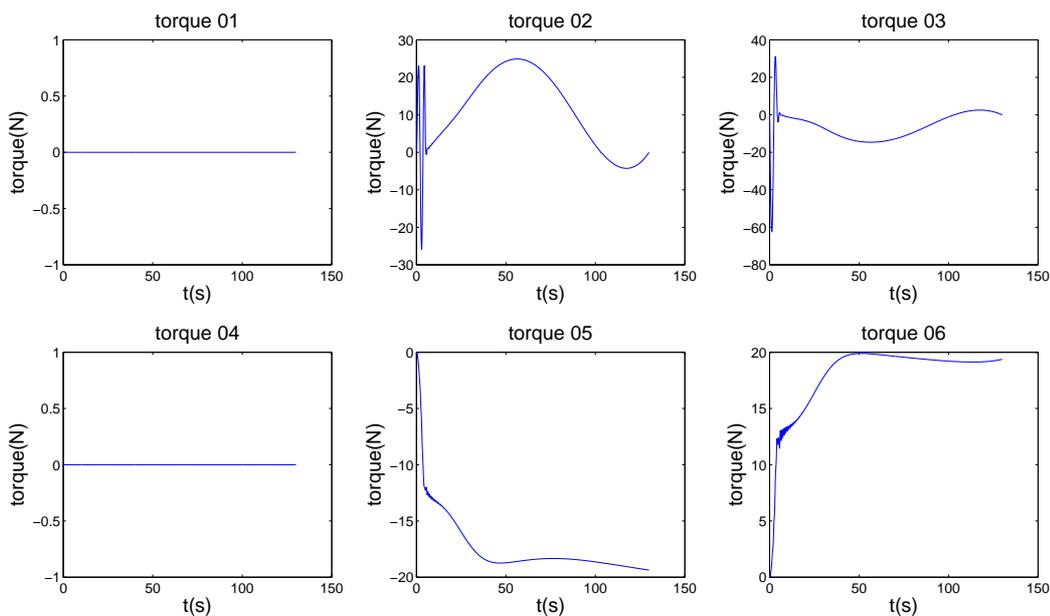


Figura 7.45: Torque do veículo quando P1 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

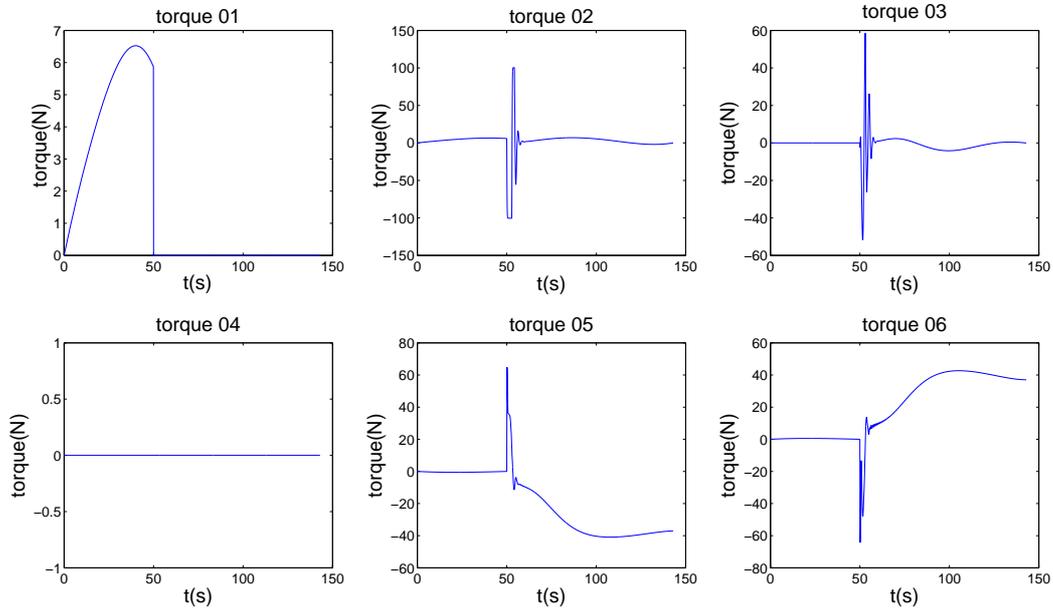


Figura 7.46: Torque do veículo quando P1 e P4 faltam na metade da trajetória (t=50 s).

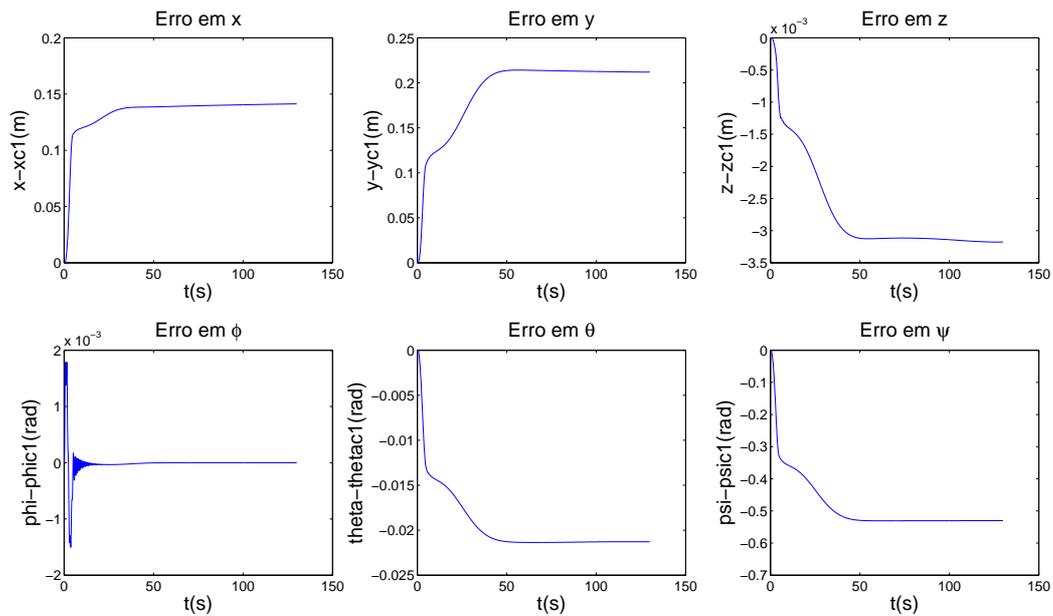


Figura 7.47: Erros do veículo quando P1 e P4 faltam no início da trajetória (t=0 s).

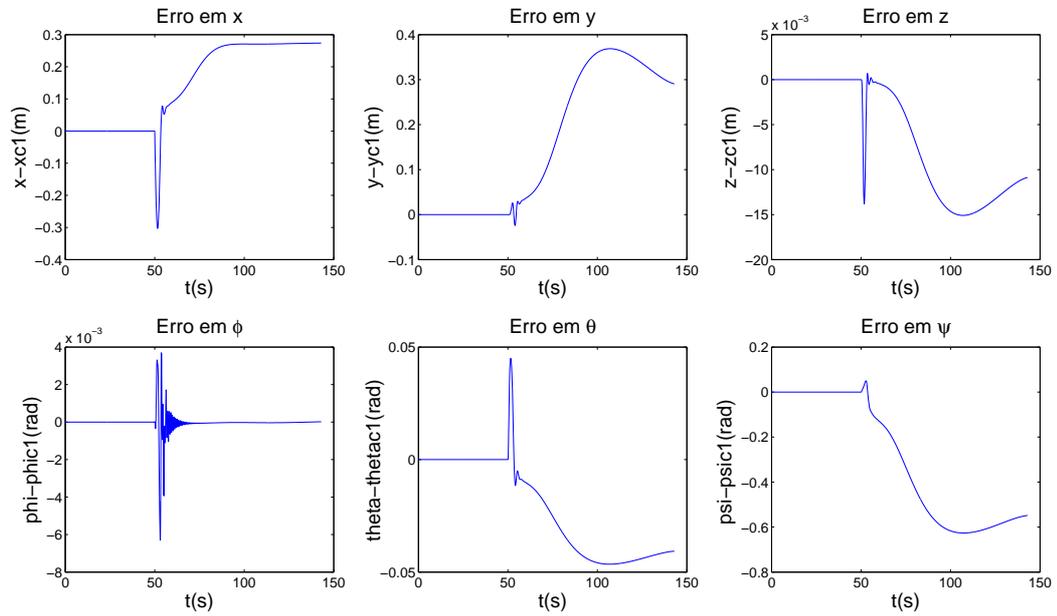


Figura 7.48: Erros do veículo quando P1 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

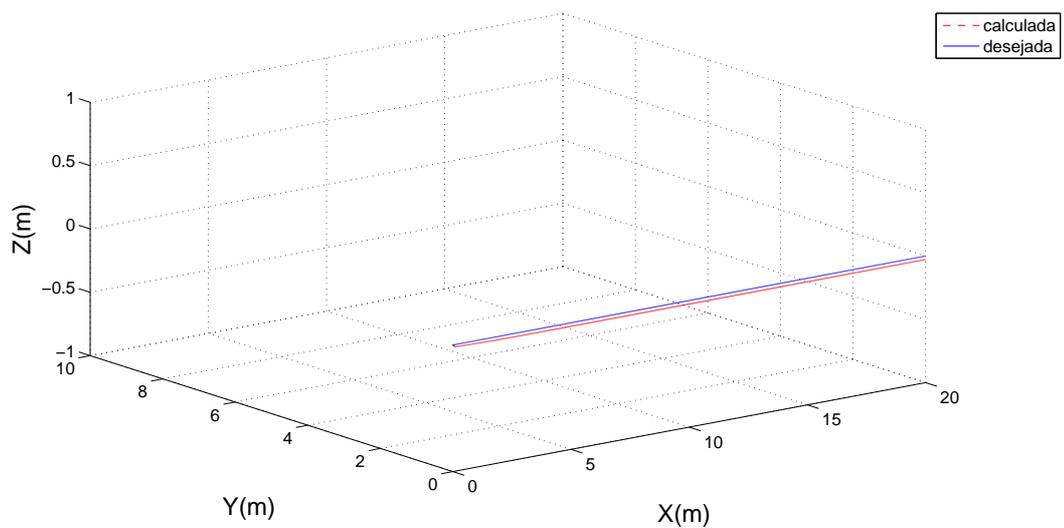


Figura 7.49: Deslocamento em  $x$ ,  $y$ ,  $z$  quando P1 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

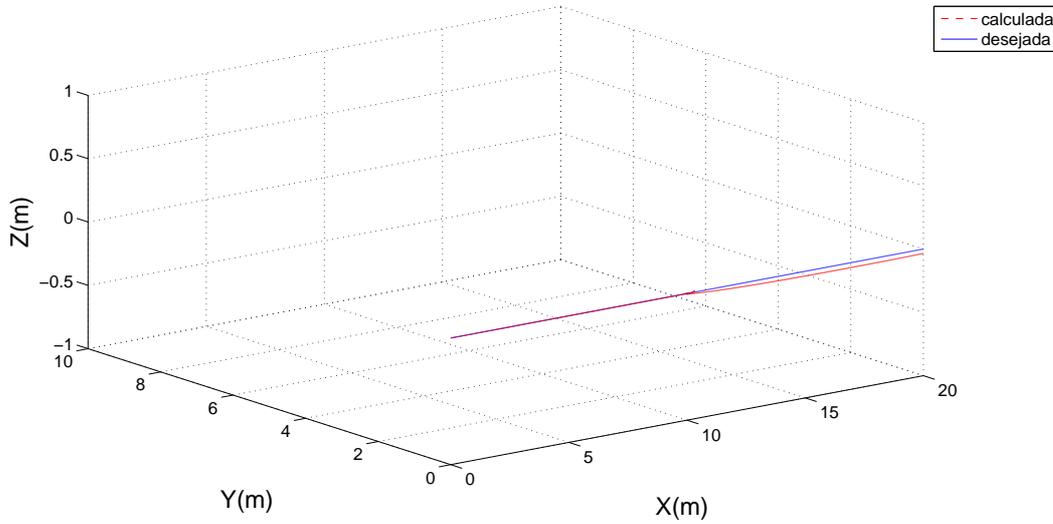


Figura 7.50: Deslocamento em  $x, y, z$  quando P1 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

### 7.3.5 Falta nos propulsores P2 e P3

Quando faltas no P2 e P3 o veículo segue a trajetória com um ângulo não nulo (Ver capítulo 5).

Nas figuras 7.51 e 7.52 pode-se observar que o veículo consegue seguir a trajetória desejada em  $x$  com desvios de trajetória na faixa de 0.5 metros no eixo  $y$ .

Nas figuras 7.53 e 7.54 pode-se observar os esforços do P1, P4, P5 e P6 nesta situação de falta. Além disso, nas figuras 7.55 e 7.56 podem-se observar que os erros de trajetória em  $x$  estão na faixa dos 0.4 metros em ambas situações. Nas figuras 7.57 e 7.58 pode-se observar o deslocamento em  $x, y$  e  $z$  nas duas situações.

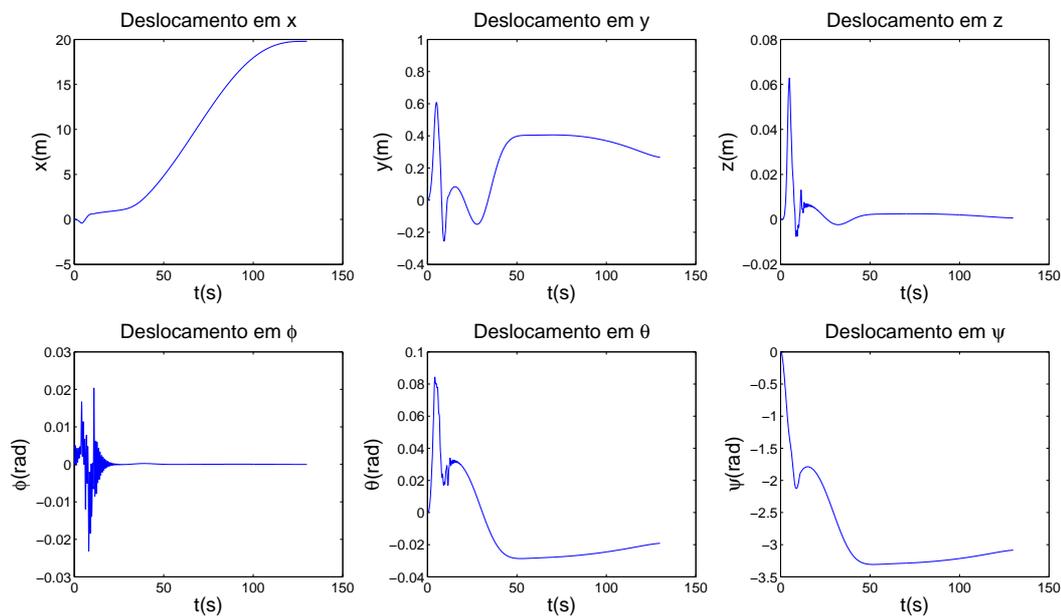


Figura 7.51: Deslocamento do veículo quando P2 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

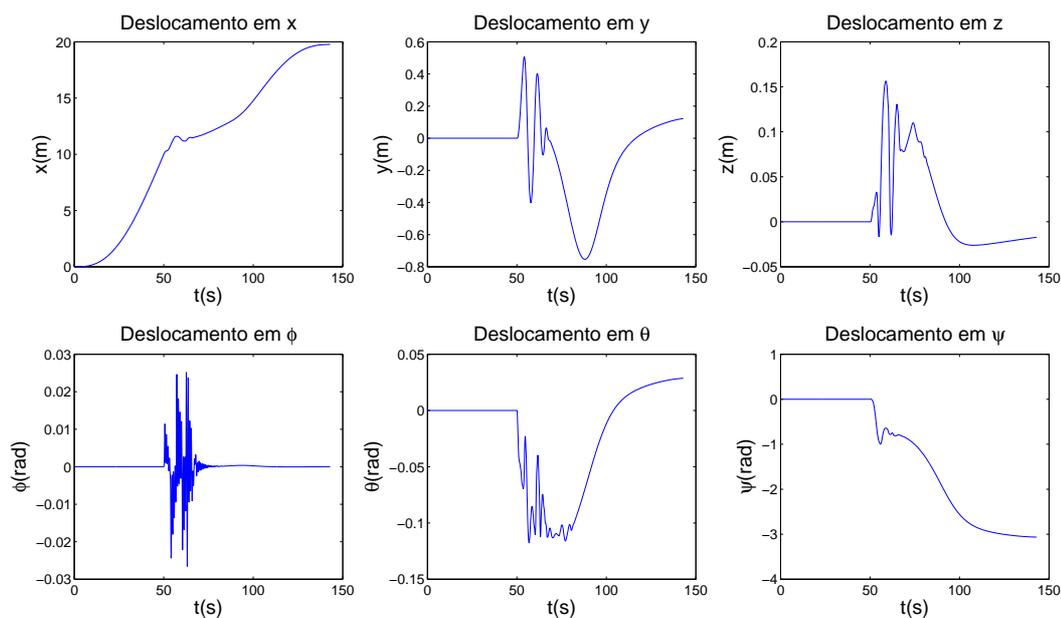


Figura 7.52: Deslocamento do veículo quando P2 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

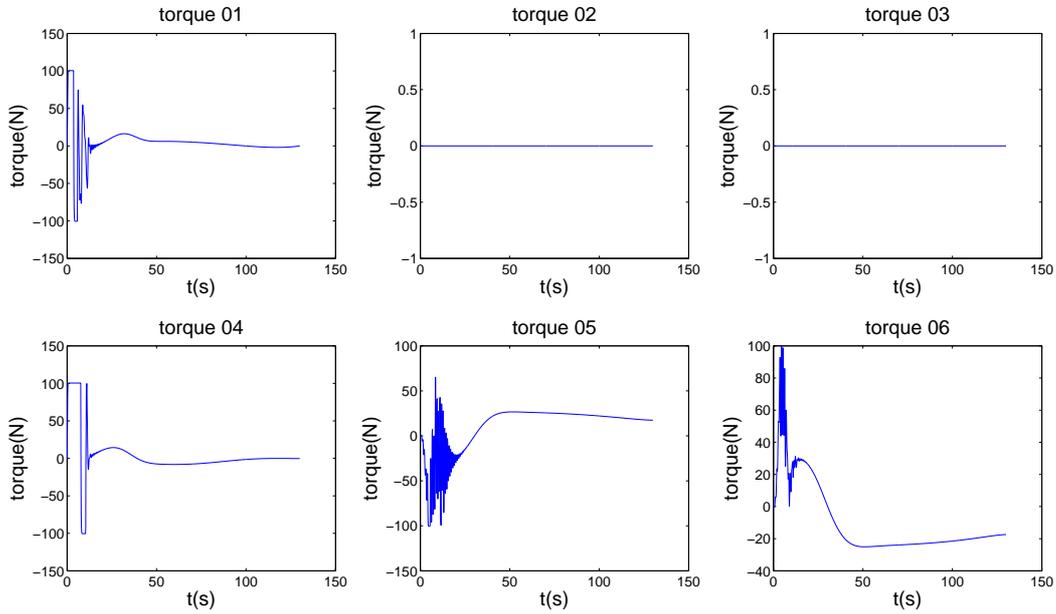


Figura 7.53: Torques do veículo quando P2 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

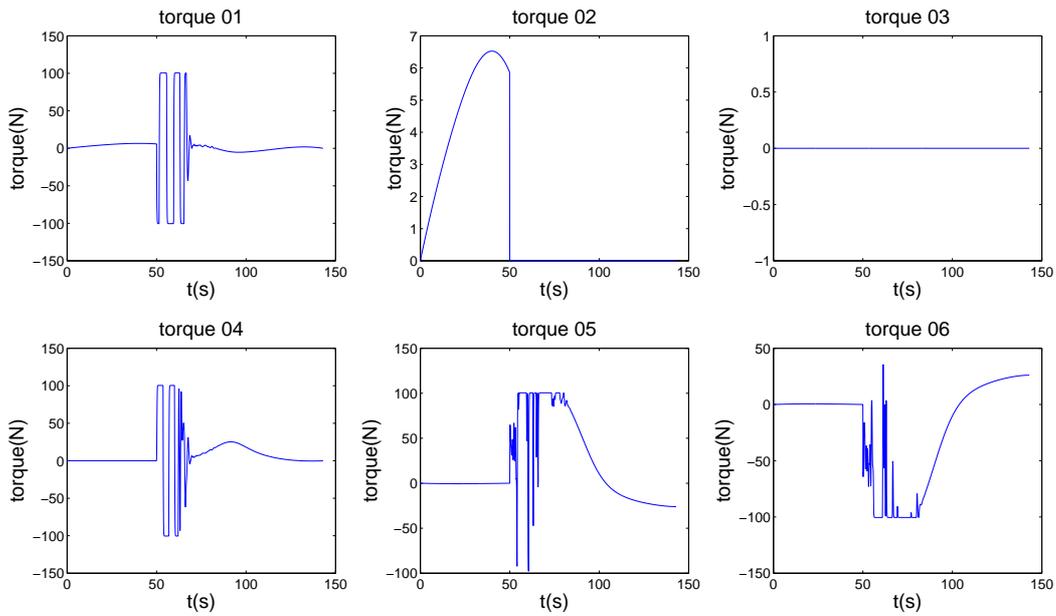


Figura 7.54: Torques do veículo quando P2 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

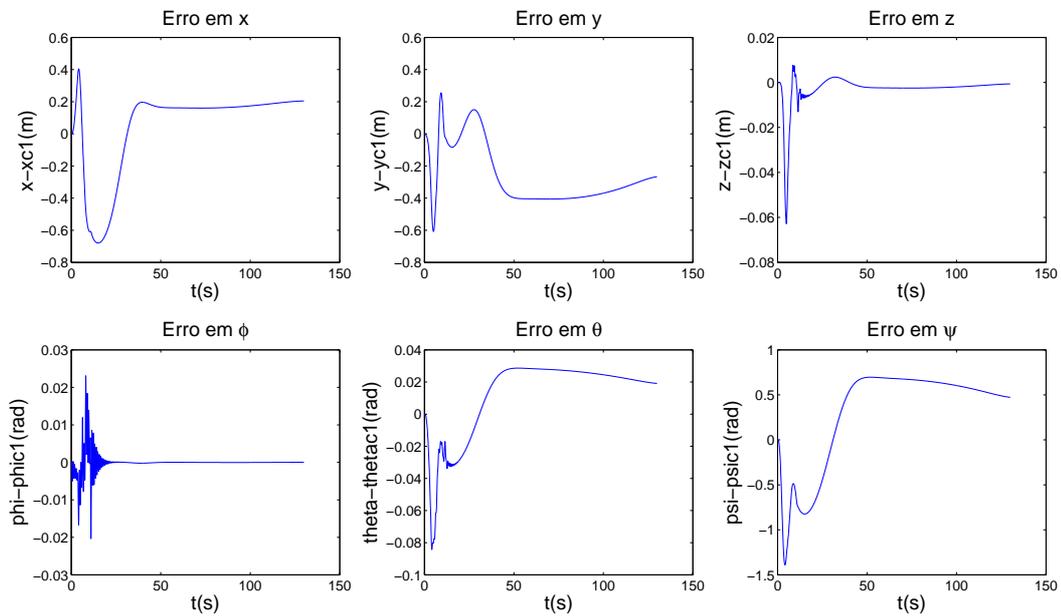


Figura 7.55: Erros do veículo quando P2 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

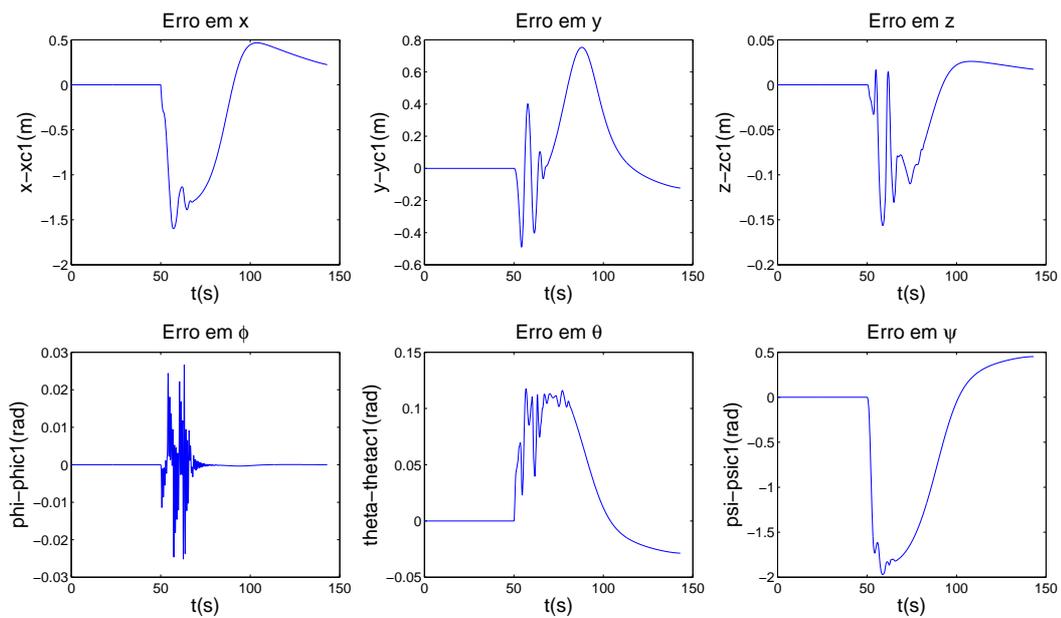


Figura 7.56: Erros do veículo quando P2 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

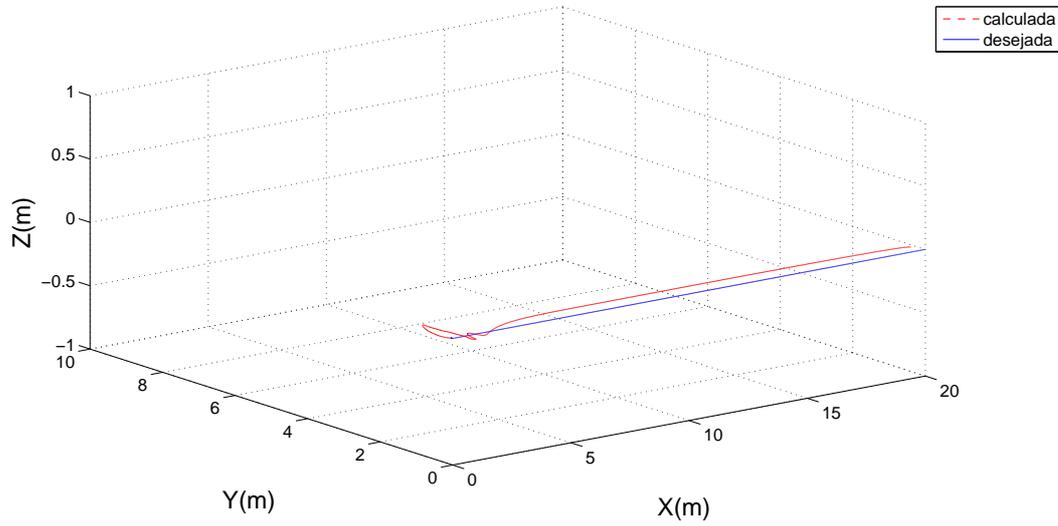


Figura 7.57: Deslocamento em  $x, y, z$  quando P2 e P3 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

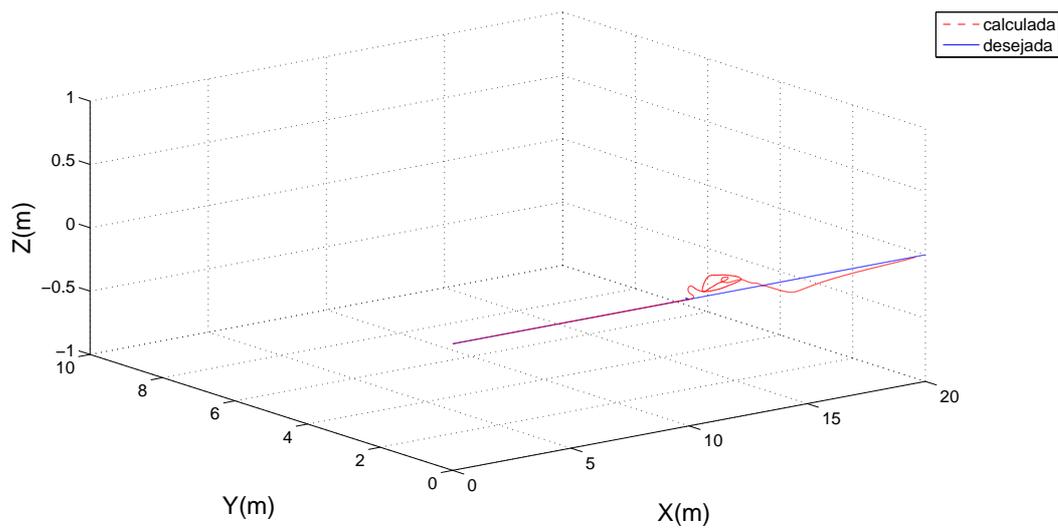


Figura 7.58: Deslocamento em  $x, y, z$  quando P2 e P3 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

### 7.3.6 Falta nos propulsores P2 e P4

Quando ocorrem faltas no P2 e P4 o veículo segue a trajetória com um ângulo não nulo, igual ao mencionado na seção anterior (Ver capítulo 5).

Na figura 7.59 pode-se observar que o veículo consegue seguir a trajetória desejada em  $x$  com desvios de trajetória na faixa de 0.4 metros no eixo  $y$ .

Na situação de falta no início do trajeto, como pode-se observar na figura 7.59, o veículo consegue realizar o trajeto em  $x$ , entretanto o desvio em  $y$  está na faixa dos 1.5 metros devido às forças inerciais remanentes provocadas pela locomoção com ângulo de guinada não nulo.

Nas figuras 7.61 e 7.62 pode-se observar os esforços do P1, P3, P5 e P6 nesta situação de falta. Além disso, nas figuras 7.63 e 7.64 podem-se observar que os erros de trajetória em  $x$  estão na faixa dos 0.4 metros em ambas situações. Nas figuras 7.65 e 7.66 pode-se observar o deslocamento em  $x$ ,  $y$  e  $z$  nas duas situações.

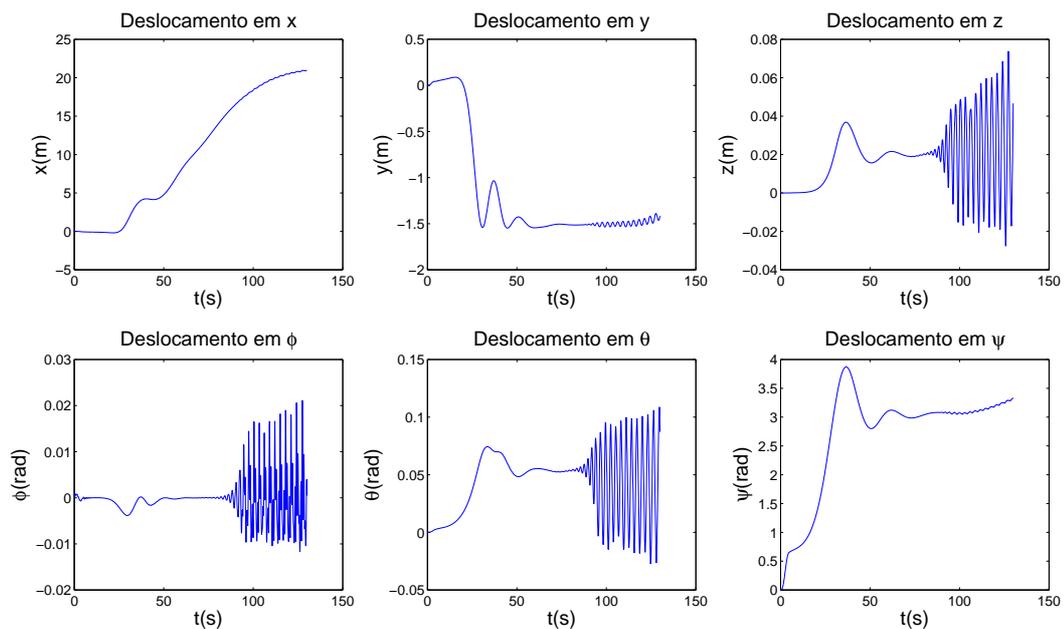


Figura 7.59: Deslocamento do veículo quando P2 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

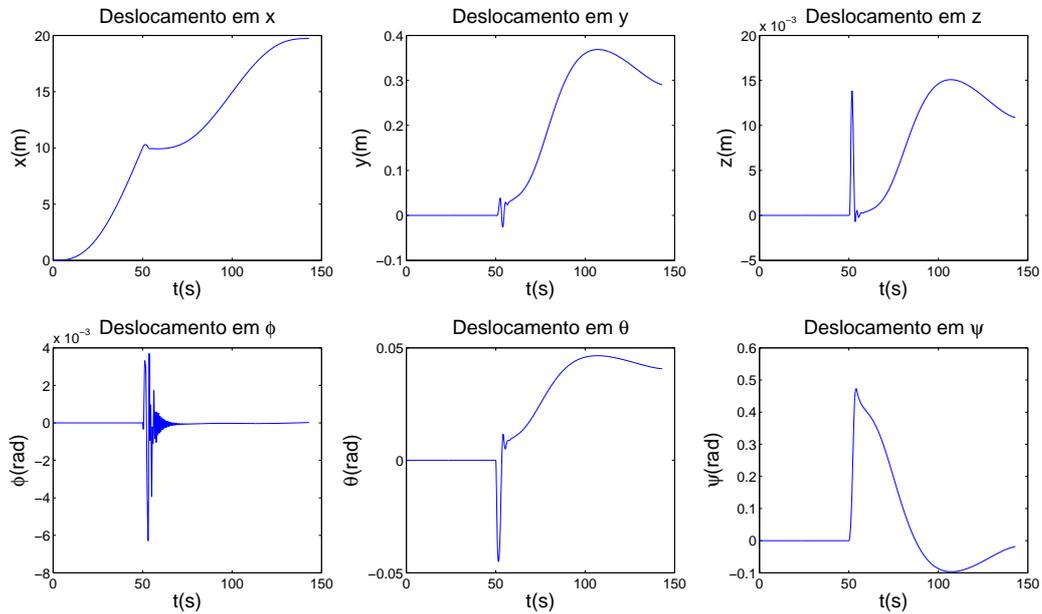


Figura 7.60: Deslocamento do veículo quando P2 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

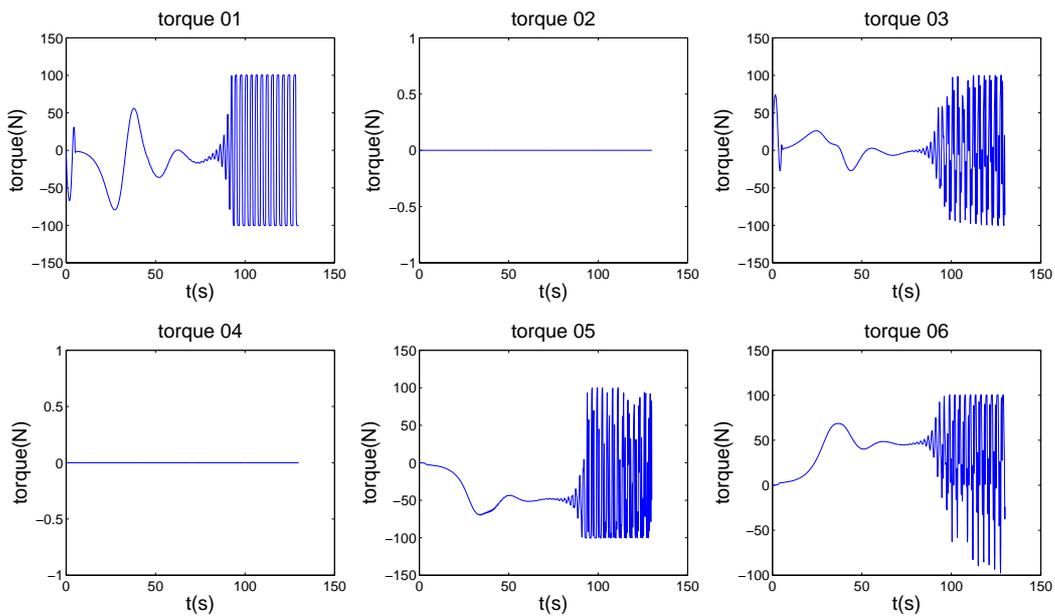


Figura 7.61: Torques do veículo quando P2 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

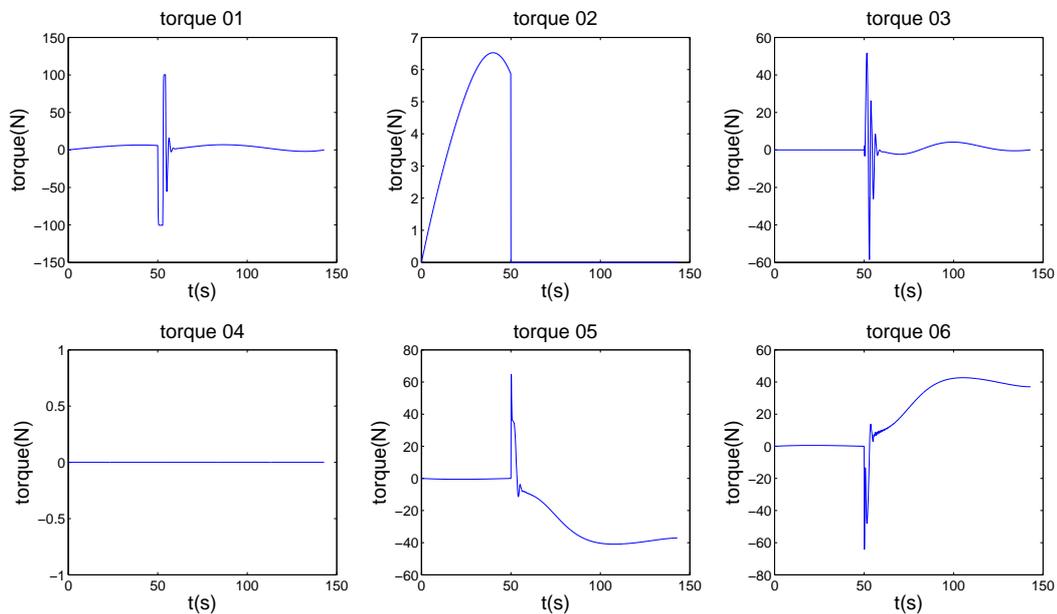


Figura 7.62: Torques do veículo quando P2 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

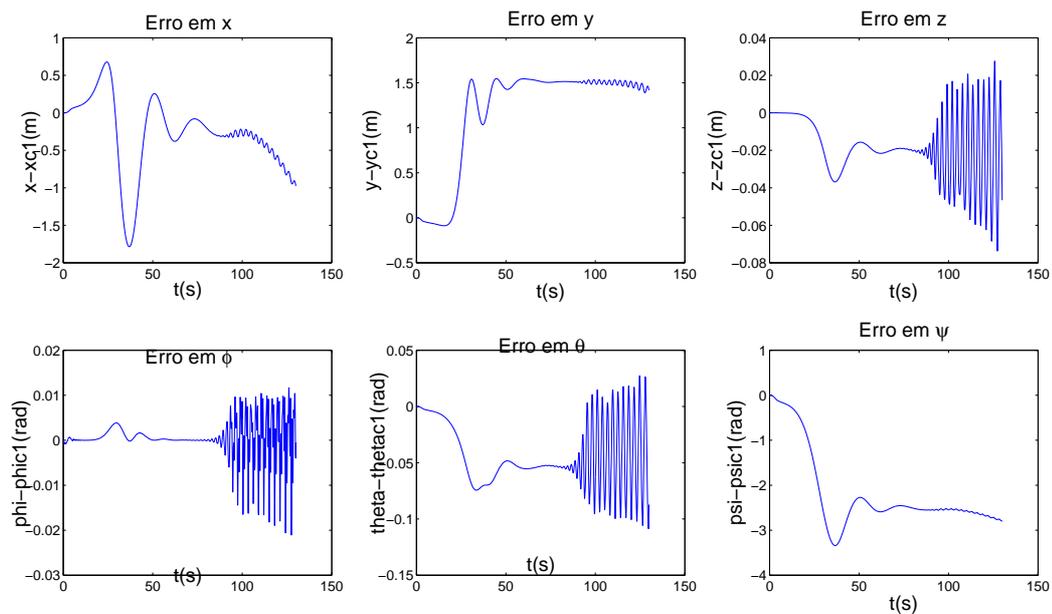


Figura 7.63: Erros do veículo quando P2 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

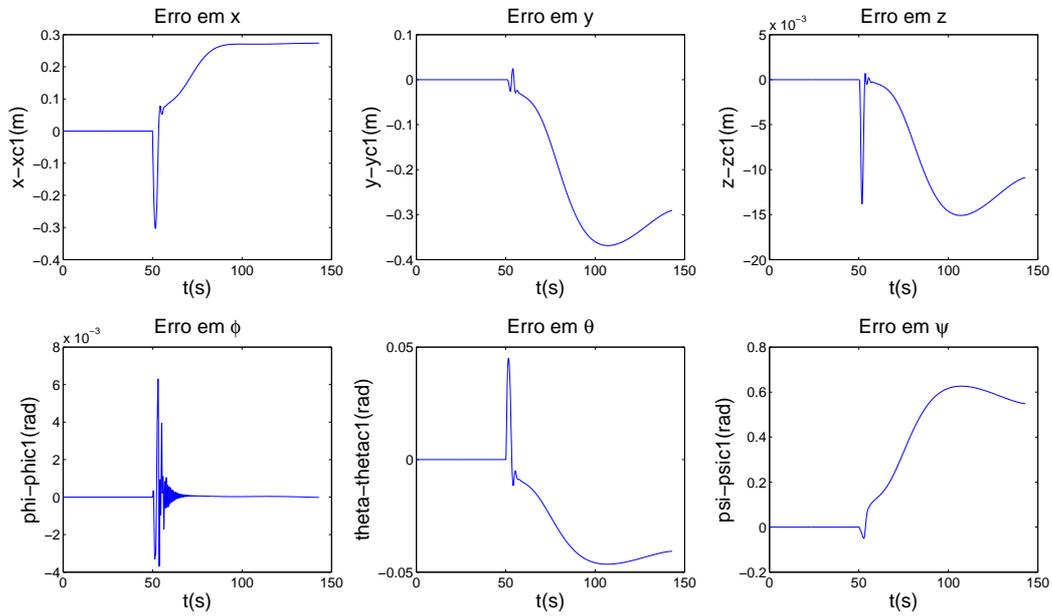


Figura 7.64: Erros do veículo quando P2 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

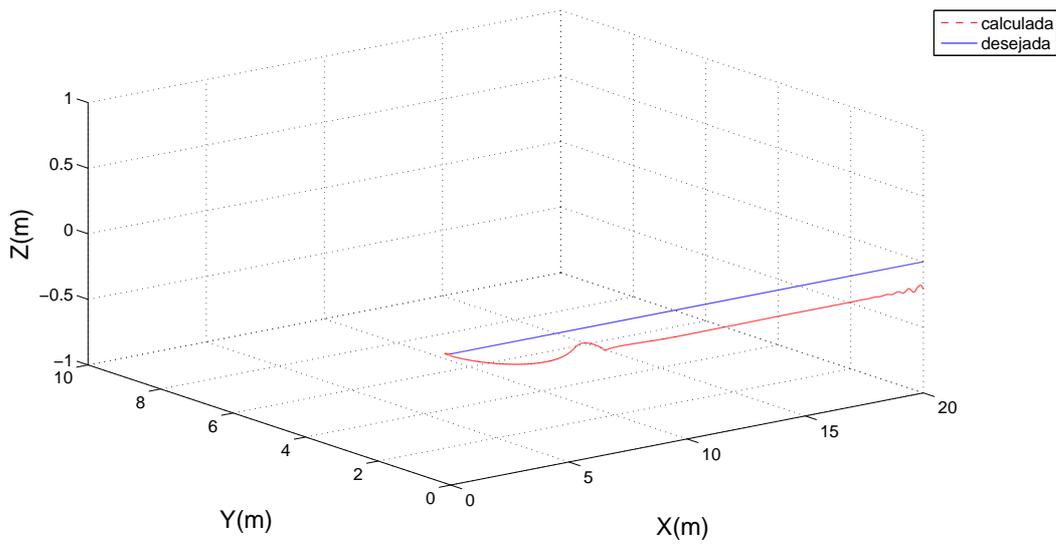


Figura 7.65: Deslocamento em  $x, y, z$  quando P2 e P4 faltam no início da trajetória ( $t=0$  s).

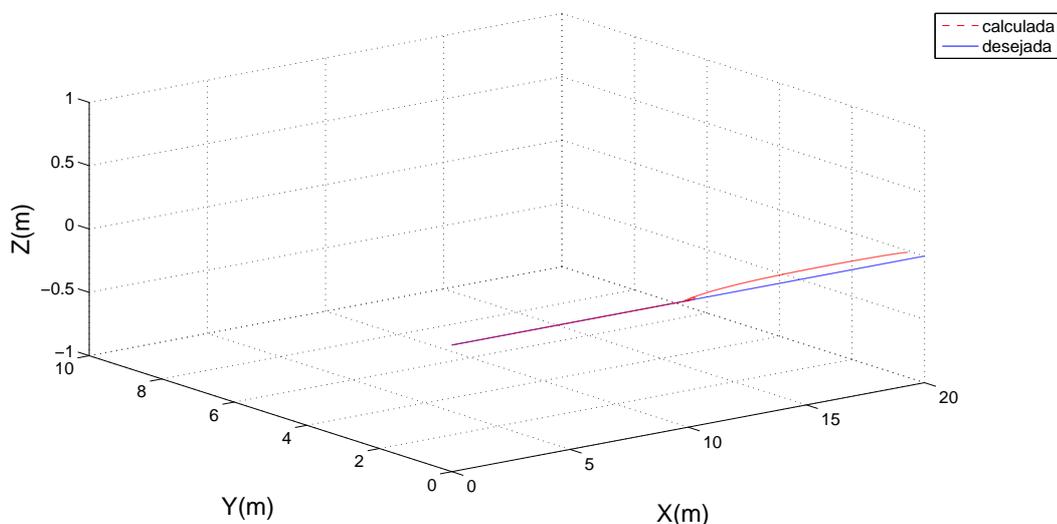


Figura 7.66: Deslocamento em  $x$ ,  $y$ ,  $z$  quando P2 e P4 faltam na metade da trajetória ( $t=50$  s).

## 7.4 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os resultados da implementação do controle de alocação nebuloso no modelo do veículo BA-1 para uma trajetória de referência no eixo  $x$ . Os casos de falta considerados foram: faltas de um propulsor (Caso 1), e faltas de dois propulsores (Caso 2). No Caso 1, pode-se observar que a situação mais crítica é quando ocorre uma falta no P1 ou no P2 na metade da trajetória de referência, onde as forças inerciais remanescentes causam erros no seguimento da trajetória. No Caso 2, percebe-se que o caso mais crítico é quando P1 e P2 faltam na metade da trajetória, onde ocorre um erro na faixa dos 8 m no eixo  $y$ . Uma solução possível para reduzir este erro é parar os propulsores desde o momento da falta até que a velocidade do veículo seja muito próxima de zero, desta forma, uma vez que a velocidade é muito baixa o veículo pode reposicionar-se ( $\psi = 90^\circ$ ) e continuar a trajetória desejada com os propulsores P3 e P4, reduzindo o efeito das forças inerciais. Outro aspecto importante a ser mencionado é a presença de *chattering*<sup>1</sup> nas simulações realizadas, o qual pode ter sido provocado pelo passo de integração utilizado ou por imprecisões no modelo.

---

<sup>1</sup>Oscilação do sistema



# Capítulo 8

## Considerações Finais

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais obtidas durante a realização da pesquisa e do desenvolvimento do controle de alocação tolerante a faltas. Na sequência são sugeridos possíveis trabalhos de aperfeiçoamento e novas pesquisas, que estenderiam o estudo e desenvolvimento realizados.

### 8.1 Conclusão

Nesta dissertação apresenta-se um controle de alocação de propulsores horizontais do veículo autônomo subaquático BA-1 baseado na teoria da lógica nebulosa de um veículo autônomo subaquático em caso de faltas dos propulsores.

O controlador nebuloso desenvolvido realiza a realocação do controle efetivo entre os propulsores operacionais numa situação de falta de propulsores. Desta forma, o objetivo de controle é a apreciação adequada de uma determinada situação de falta e o fornecimento de uma resposta automática ao sistema num tempo estabelecido, tendo em consideração a minimização da quantidade de regras para o tempo de resposta desejado.

Para alcançar estes objetivos, efetuou-se um longo trabalho de pesquisa envolvendo os métodos de controle tolerante a faltas em sistemas dinâmicos, sistemas de controle nebuloso, controles de alocação e algoritmos de controle. O resultado deste estudo foi a formulação e proposta de um projeto de controlador nebuloso para reconfigurar a matriz de alocação dos propulsores na ocorrência de faltas.

O modelo de Dos Santos (2012) foi estudado para adquirir um conhecimento aprofundado do funcionamento e da estimação da resposta da dinâmica do sistema analisado, o que possibilitou entender com maior facilidade o comportamento do veículo sob os efeitos hidrostáticos e hidrodinâmicos e, por conseguinte a obtenção das regras que possibilitem uma distribuição adequada das forças dos propulsores em caso de faltas. Estas regras para o algoritmo nebuloso foram desenvolvidas heurísticamente, por meio do conhecimento do sistema e do objetivo de

controle desejado.

Depois disso, o modelo foi adaptado para a implementação da estratégia de controle de alocação. Os resultados desta proposta de controle, testado no modelo matemático do BA-1, mostram o bom desempenho do controlador nebuloso, frente às faltas a que foi submetido o veículo. Uma vantagem, é que a utilização de controladores nebulosos permite que os processos decisórios possam ser realizados com sinais provenientes de sensores e que as regras podem ser incrementadas sem muita dificuldade.

Por fim, para verificar o desempenho do simulador desenvolvido foram criadas duas situações de teste. A primeira situação foi criada para analisar o comportamento do veículo com faltas desde o início da sua trajetória, força inercial remanescente zero. A segunda situação foi desenvolvida para visualizar o comportamento do veículo com a ocorrência de faltas no ponto de maior velocidade da sua trajetória. Os resultados obtidos mostram que o veículo tem um comportamento aceitável em todas as situações excetuando no caso de falta dos propulsores P1 e P2 na metade da trajetória, onde o veículo gera um erro muito grande em  $y$  o que poderia ser solucionado modificando a trajetória desejada na ocorrência dessa falta.

O modelo desenvolvido apresenta rapidez nas respostas e desempenho degradado aceitável. Entretanto, pode ser observado que este controle nebuloso só poderá ser plenamente aproveitado quando sejam implementadas situações de falhas nos propulsores.

Por outro lado, importante salientar a presença de *chattering* nas simulações realizadas, o qual pode ter sido provocado pelo passo de integração utilizado ou por imprecisões no modelo.

## 8.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Na sequência apresentam-se sugestões para melhorar e continuar com o trabalho nesta linha de pesquisa, com base nos resultados obtidos no sistema de controle do BA-1

- Implementação e testes num protótipo, para o qual deve-se adaptar o software desenvolvido com o sistema de gerenciamento do protótipo;
- Ampliar o controle desenvolvido para que este possa tratar com situações de falhas nos propulsores;
- Desenvolver maior quantidade de trajetórias de referência de geração automática em caso da ocorrência de falhas, para posicionar o veículo dependendo da situação de falha;
- Utilizar um mecanismo de *tunning* para manipular os tipos, a quantidade e abrangência das funções de pertinência, o que permitiria obter um controlador mais eficiente;
- Adicionar um mecanismo de diagnóstico de faltas e falhas;

- Analisar as causas do *chattering* podem ser observados em alguns gráficos de simulação do capítulo 7.



# Referências Bibliográficas

- Akmal, M., Yusoff, M. and Arshad, M. (2012). Active fault tolerant control of a remotely operated vehicle propulsion system, *Procedia Engineering* **41**: 622–628.
- Alessandri, A. (1999). Fault detection of actuator faults in unmanned underwater vehicles, *Control Engineering Practice* **7**(3): 357–368.  
Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S09670666198001695>
- Alwi, H., Edwards, C. and Tan, C. P. (2011). *Fault detection and fault-tolerant control using sliding modes*, Springer.
- Antonelli, G. (2004). Open control problems in underwater robotics, *Robot Motion and Control, 2004. RoMoCo'04. Proceedings of the Fourth International Workshop on*, pp. 219 – 229.
- Antonelli, G. (2006). *Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems (Springer Tracts in Advanced Robotics)*, Springer-Verlag New York, Inc.
- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J. and Staroswiecki, M. (2003). *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*, Springer.
- Bordignon, K. A. (1996). *Constrained control allocation for systems with redundant control effectors*, Tese de doutorado, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Chiella, A. (2012). *Desenvolvimento de um simulador de veículos subaquáticos utilizando realidade virtual*, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Choi, J.-K. and Kondo, H. (2010). On fault-tolerant control of a hovering auv with four horizontal and two vertical thrusters, *OCEANS 2010 IEEE - Sydney*, pp. 1 –6.
- Corradini, M. L., Monteriu, A. and Orlando, G. (2011). An actuator failure tolerant control scheme for an underwater remotely operated vehicle, *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* **19**(5): 1036–1046.
- Cox, E., O'Hagan, M., Taber, R. and O'Hagen, M. (1998). *The Fuzzy Systems Handbook with Cdrom*, Academic Press, Inc.
- Dos Santos, C. (2012). *Simulador de veículos subaquáticos*, Relatório técnico, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Grupo de Pesquisas em Robótica GPR, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Eterno, J. S., Weiss, J. L., Looze, D. P. and Willsky, A. (1985). Design issues for fault tolerant-restructurable aircraft control, *Decision and Control, 1985 24th IEEE Conference on*, Vol. 24, IEEE, pp. 900–905.
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and control of ocean vehicles*, Vol. 199, Wiley New York.

- Fossen, T. and Johansen, T. (2006). A survey of control allocation methods for ships and underwater vehicles, *Proceedings of MED2006 - 14th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pp. 1–6.
- Goulart, C. (2007). *Modelagem, simulação e controle de um veículo submarino e operação remota*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- Guerra, R. (1998). *Projeto e simulação do controle de atitude autônomo de satélites usando lógica nebulosa*, Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, São José dos Campos-SP.
- Gustafsson, F. (2001). Fault detection terminology, *Adaptive Filtering and Change Detection*, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, UK, pp. 475–476.  
Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0470841613.app2/pdf>
- Härkegård, O. (2002). Efficient active set algorithms for solving constrained least squares problems in aircraft control allocation, *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 2, pp. 1295 – 1300.
- Härkegård, O. (2003). *Backstepping and control allocation with applications to flight control*, Tese de doutorado, Linköping University, Suécia.
- Härkegård, O. and Glad, S. T. (2005). Resolving actuator redundancy – optimal control vs. control allocation, *Automatica* **41**(1): 137–144.
- Hsu, L., Costa, R. R., Lizarralde, F. and da Cunha, J. P. V. S. (2000). Avaliação experimental da modelagem e simulação da dinâmica de um veículo submarino de operação remota, *Revista Controle e Automação* **11**(2): 82–93.
- Isermann, R. (2006). *Fault-diagnosis Systems: An Introduction From Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer.
- Jiang, J. and Yu, X. (2012). Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches, *Annual Reviews in Control* .
- Kanti Podder, T. and Sarkar, N. (1999). Fault tolerant decomposition of thruster forces of an autonomous underwater vehicle, *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, Vol. 1, IEEE, pp. 84–89.
- Kondo, H., Shimizu, E., Choi, J.-K., Nakane, K., Matsushima, M., Nagahashi, K., Nishida, Y. and Matsui, R. (2010). Biointeractive autonomous underwater vehicle “ba-1”, *Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2010 IEEE/OES*, IEEE, pp. 1–7.
- Kwong, W. A., Passino, K. M., Laukonen, E. G. and Yurkovich, S. (1995). Expert supervision of fuzzy learning systems for fault tolerant aircraft control, *Proceedings of the IEEE* **83**(3): 466–483.
- Lee, C.-C. (1990). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. i, *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* **20**(2): 404–418.
- Omerdic, E. (ed.) (2009). *Thruster Fault-Tolerant Control: Thruster Fault Diagnosis and Accommodation System for Underwater Vehicles*, VDM Verlag Dr. Müller.

- Omerdic, E. and Roberts, G. (2004). Thruster fault diagnosis and accommodation for open-frame underwater vehicles, *Control Engineering Practice* **12**(12): 1575–1598.  
Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967066103002892>
- Passino, K. and Yurkovich, S. (eds) (1998). *Fuzzy Control*, Addison-Wesley.
- Patton, R. J. (1997). Fault-tolerant control systems: The 1997 situation, *IFAC symposium on fault detection supervision and safety for technical processes*, Vol. 3, pp. 1033–1054.
- Podder, T., Antonelli, G. and Sarkar, N. (2000). Fault tolerant control of an autonomous underwater vehicle under thruster redundancy: simulations and experiments, *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, Vol. 2, pp. 1251–1256 vol.2.
- Podder, T. K., Antonelli, G. and Sarkar, N. (2001). An experimental investigation into the fault-tolerant control of an autonomous underwater vehicle, *Advanced Robotics* **15**(5): 501–520.
- Ren, Y.-Q., Duan, X.-G., Li, H.-X. and Chen, C. P. (2013). Multi-variable fuzzy logic control for a class of distributed parameter systems, *Journal of Process Control* **23**(3): 351–358.  
Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152412002788>
- Sandri, S. and Corrêa, C. (1999). Lógica nebulosa, *V Escola de redes neurais: Conselho Nacional de Redes Neurais ITA* pp. 73–90.
- Sarkar, N., Podder, T. and Antonelli, G. (2002). Fault-accommodating thruster force allocation of an auv considering thruster redundancy and saturation, *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* **18**(2): 223–233.
- Smith, S., Rae, G., Anderson, D. and Shein, A. (1994). Fuzzy logic control of an autonomous underwater vehicle, *Control Engineering Practice* **2**(2): 321–331.
- Sokal, G. J. (2010). *Posicionamento dinâmico utilizando controle a estrutura variável e servo-visão*, Dissertação de mestrado, Universidade do Estado de Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
- Soylu, S., Buckham, B. J. and Podhorodeski, R. P. (2008). A chattering-free sliding-mode controller for underwater vehicles with fault-tolerant infinity-norm thrust allocation, *Ocean Engineering* **35**(16): 1647–1659.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets, *Information and Control* **8**(3): 338–353.  
Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X>
- Zhang, Y. and Jiang, J. (2008). Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems, *Annual Reviews in Control* **32**(2): 229–252.  
Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578808000345>



# Apêndice A

## LEI DE CONTROLE

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento da lei de controle por Realimentação Linearizante (em inglês *Feedback Linearization* ou *Nonlinear Dynamic Inversion* - NDI) que foi utilizada neste trabalho de pesquisa.

### A.1 Controle por Realimentação Linearizante

Esta lei de controle tem o principal objetivo de transformar a dinâmica não linear de um sistema, em uma linear. Então, considerando as dinâmicas não lineares de um veículo subaquático (equação 2.16), obtemos:

$$M\dot{\nu} + n(\nu, \eta) = \tau \quad (\text{A.1})$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu \quad (\text{A.2})$$

Aqui assume-se que  $\nu$  e  $\eta$  sejam variáveis mensuradas, e  $n(\nu, \eta)$  é o vetor de não linearidades, dado por:

$$n(\nu, \eta) = C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) \quad (\text{A.3})$$

Para se cancelar as não linearidade pode ser escolhida a seguinte lei de controle (Fossen, 1994):

$$\tau = Ma_v + n(\nu, \eta) \quad (\text{A.4})$$

onde  $a_v$  é a aceleração comandada. Substituindo (A.4) em (A.1), obtêm-se:

$$M(\dot{\nu} - a_v) = 0 \quad (\text{A.5})$$

De fato, não é possível ter um sistema perfeitamente linearizado, isto é devido a imperfeita previsão de distúrbios ambientais, além das discrepâncias entre o modelo matemático da dinâmica do veículo e o modelo físico real.

Parte-se do princípio que deseja-se posicionar o veículo com relação ao referencial inercial, logo a aceleração comandada no referencial do corpo ( $\mathbf{a}_\nu$ ) não é inicialmente conhecida, neste caso, deve-se encontrar a aceleração comandada no referencial inercial ( $\mathbf{a}_\eta$ ), e então transforma-la para o referencial do corpo.

Derivando-se (A.2) em relação ao tempo, e isolando a aceleração ( $\dot{\boldsymbol{\nu}}$ ), obtêm-se:

$$\dot{\boldsymbol{\nu}} = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \left[ \ddot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu} \right] \quad (\text{A.6})$$

Substituindo (A.6) em (A.5) e pré-multiplicando por  $\mathbf{J}^{-T}$  :

$$\mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{M}\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \left[ \ddot{\boldsymbol{\eta}} - \left( \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{a}_\nu \right) \right] = 0, \quad (\text{A.7})$$

de forma geral (A.7) pode ser escrita como:

$$\mathbf{M}_\eta [\ddot{\boldsymbol{\eta}} - \mathbf{a}_\eta] = 0 \quad (\text{A.8})$$

onde

$$\mathbf{M}_\eta = \mathbf{J}^{-T}\mathbf{M}\mathbf{J}^{-1} \quad (\text{A.9})$$

$$\mathbf{a}_\eta = \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{a}_\nu \quad (\text{A.10})$$

Sendo:

$\mathbf{M}_\eta$  a matriz de inércia no referencial inercial;

$\mathbf{a}_\eta$  a aceleração comandada no referencial inercial.

### A.1.1 Controle PID (Proporcional, integral e derivativo)

Seja o erro de rastreamento de trajetória ( $\tilde{\boldsymbol{\eta}}$ ) definido como:

$$\tilde{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_d \quad (\text{A.11})$$

Para (A.8) ser verdadeira, a aceleração do veículo no referencial inercial deve ser igual a aceleração comandada no referencial inercial ( $\ddot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{a}_\eta$ ), ou pelo menos é o que se deseja. Desta forma, a partir de (A.11) conclui-se que:

$$\mathbf{a}_\eta = \ddot{\boldsymbol{\eta}}_d + \ddot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}} \quad (\text{A.12})$$

Escolhendo-se uma ação do tipo proporcional, integral e derivativa (Proporcional, integral

e derivativo - PID) para controlar a dinâmica do erro, assim temos:

$$\ddot{\tilde{\eta}} = - \left( \mathbf{K}_d \dot{\tilde{\eta}} + \mathbf{K}_p \tilde{\eta} + \mathbf{K}_i \int \tilde{\eta} \right) \quad (\text{A.13})$$

onde:

$\mathbf{K}_d$  matriz diagonal de ganho derivativo;

$\mathbf{K}_p$  matriz diagonal de ganho proporcional;

$\mathbf{K}_i$  matriz diagonal de ganho integral.

Substituindo (A.13) em (A.12), têm-se:

$$\mathbf{a}_\eta = \ddot{\eta}_d - \left( \mathbf{K}_d \dot{\tilde{\eta}} + \mathbf{K}_p \tilde{\eta} + \mathbf{K}_i \int \tilde{\eta} \right) \quad (\text{A.14})$$

A aceleração comandada ( $\mathbf{a}_\eta$ ) está expressa no referencial inercial, como o modelo dinâmico do veículo está expresso no referencial do corpo, deve-se efetuar a transformação entre os referenciais, esta transformação resulta em:

$$\mathbf{a}_\nu = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \left[ \mathbf{a}_\eta - \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\eta}) \boldsymbol{\nu} \right] \quad (\text{A.15})$$

A Figura A.1 mostra em diagrama de blocos a forma esquemática da lei de controle.

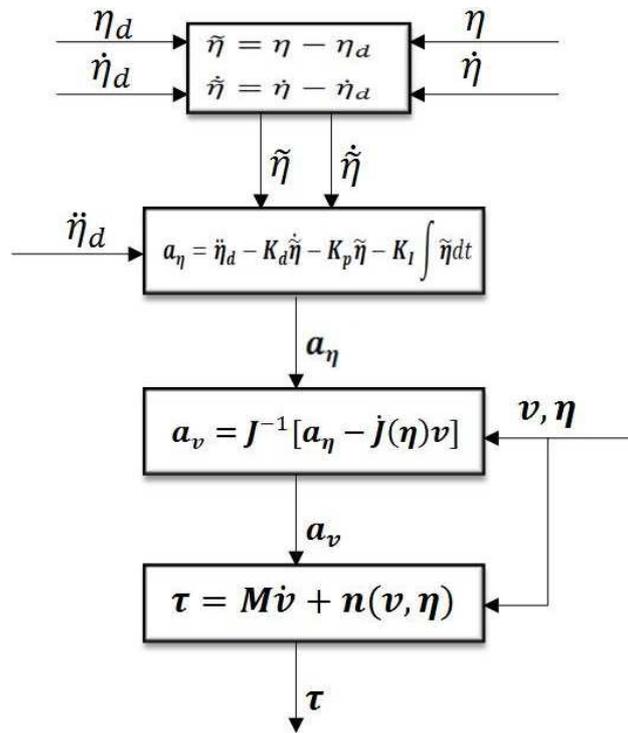


Figura A.1: Diagrama de blocos da lei CRL ( (Chiella, 2012))

## Apêndice B

# VISÃO GERAL DO SIMULADOR DE VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS

Neste capítulo é descrita a implementação do simulador de veículos subaquáticos em ambiente MATLAB/SIMULINK, sendo este feito com base nas equações apresentadas nos capítulos 2, 5 e 7. Os componentes principais deste simulador, assim como os parâmetros necessários para sua configuração serão apresentados a seguir.

A programação em MATLAB/SIMULINK é feita através da lógica de blocos em conjunto com *scripts*, como pode ser observado na figura B.1, estes executam de forma cronológica funções que descrevem o comportamento do sistema.

Os blocos funcionais contém todas as operações lógicas da programação do simulador. A forma como estes blocos foram organizados corresponde à arquitetura mostrada na figura (6.1).

A estrutura geral do simulador pode ser descrita com base nos blocos da figura B.1 da seguinte forma:

- **Trajétoria de referência ou desejada:** Este bloco é responsável por criar uma trajetória de referência, sendo que esta deve ser seguida pelo veículo subaquático. Este contém os polinômios de quinta ordem que definem a trajetória de referência.

Além disso, contém um conjunto de regras heurísticas que determinam a trajetória de adaptação (movimento de reposicionamento necessário para que o veículo possa seguir a trajetória) que deve ser realizada pelo veículo no caso de faltas (ver capítulo 5).

- **Lei de Controle:** Este bloco contém a lei de controle, que por sua vez é responsável por gerar referências de torque que façam o veículo seguir a trajetória desejada (Ver Apêndice A).
- **Lei de Alocação:** Este bloco contém as regras para realizar o controle de alocação híbrido explicado no capítulo 6.
- **Propulsores:** Contém a dinâmica dos atuadores, nele está presente a Equação 2.36. Além de transformar os sinais de controle desejado para cada propulsor em sinais de tensão

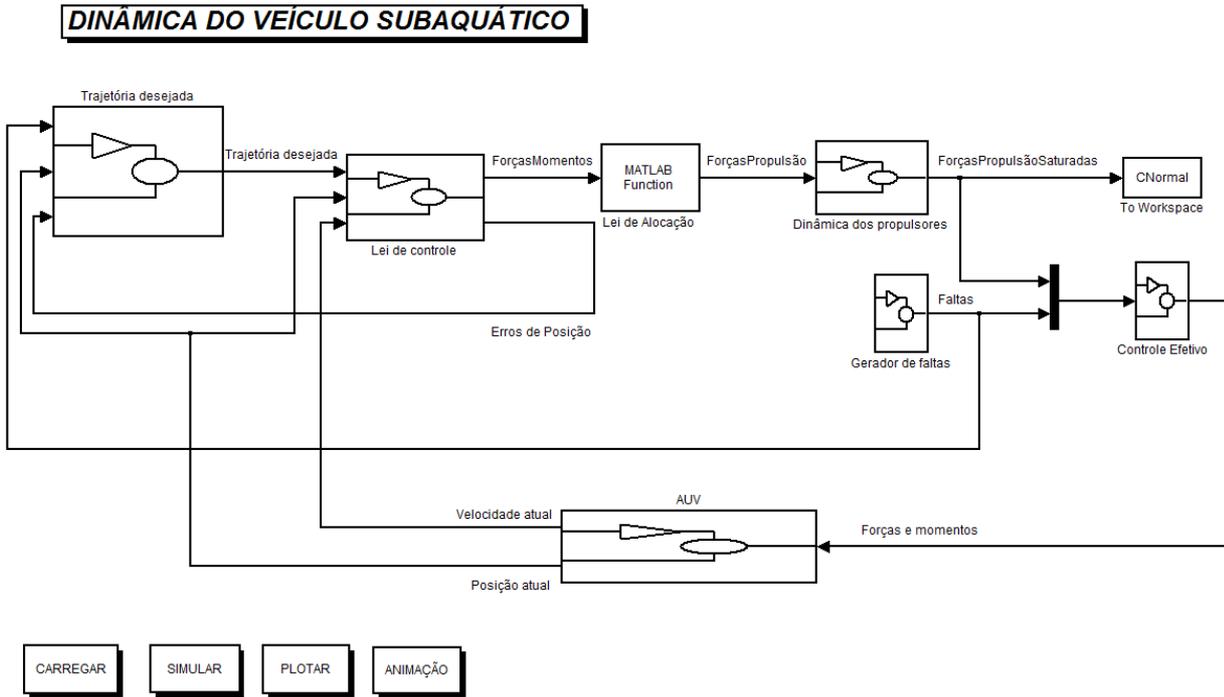


Figura B.1: Esquema do controlador nebuloso.

factíveis.

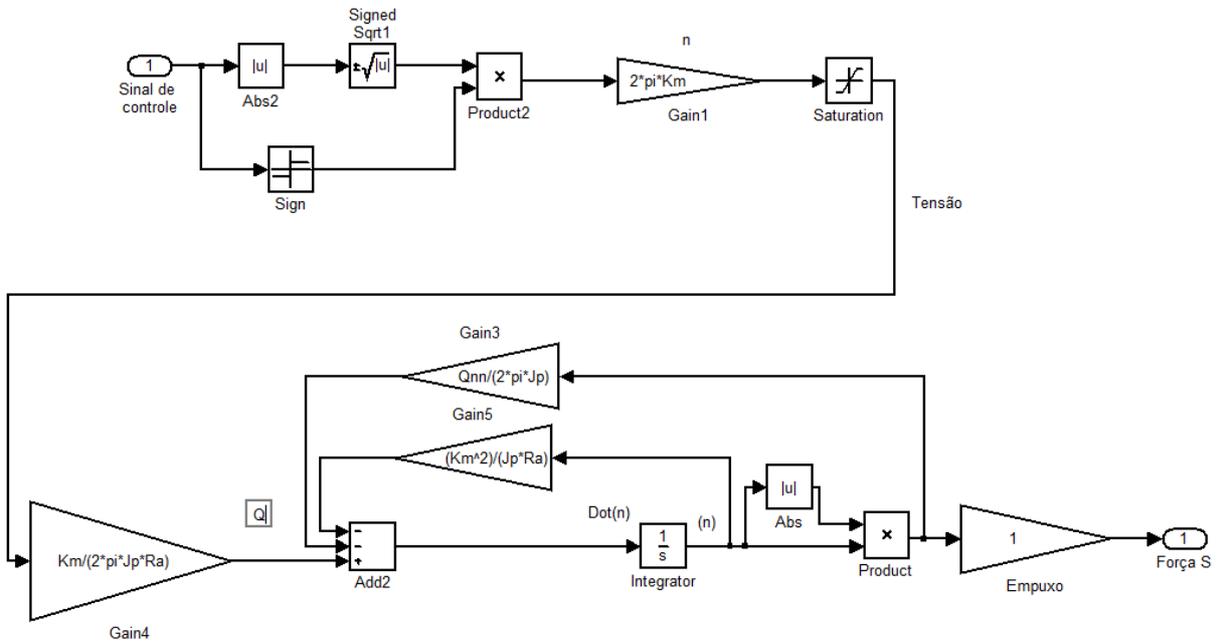


Figura B.2: Esquema do bloco Propulsores.

- **AUV:** Contém todas as equações de cinemática 2.25 e dinâmica do corpo rígido 2.24. Este bloco caracteriza o veículo subaquático.

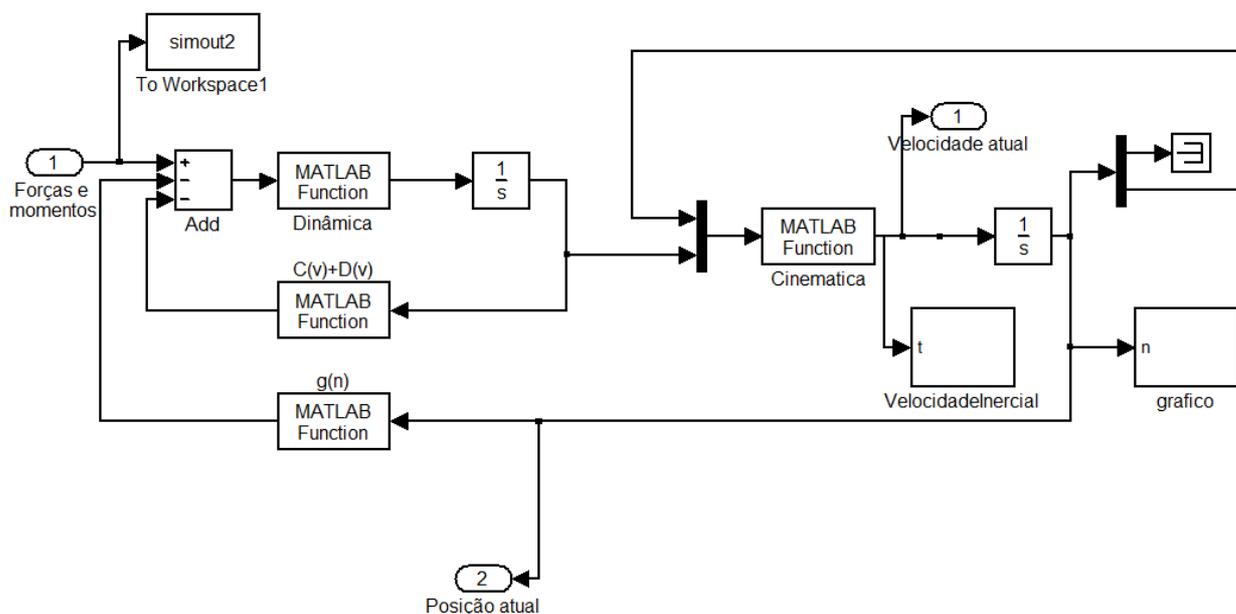


Figura B.3: Esquema do bloco AUV.

- **Gerador de faltas:** Contém os indicadores de falta 0 para propulsor ativo ou sem falta, ou 1 para propulsor com falta. Estes valores devem ser configurados antes de cada simulação.

## B.1 Parâmetros de simulação

São os que permitem a configuração da trajetória de referência, as condições iniciais, o tempo de simulação, a lei de controle e os parâmetros dinâmicos do veículo subaquático selecionado. Sendo assim, cada vez que se deseja simular um veículo subaquático diferente, ou diferentes tipos de missões, perturbações, etc, estes parâmetros devem ser alterados.

A configuração dos parâmetros do simulador são feitos através do arquivo **carrega.m** que é executado mediante o botão **CARREGAR** que pode ser observado na figura B.1.

A Tabela 7.1 mostra os parâmetros que devem ser configurados no simulador para o veículo BA-1.