



**UNIVERSIDADE SENAI CIMATEC**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

## **OTIMIZAÇÃO DE THRUSTERS PARA TOLERÂNCIA A FALHAS EM VEÍCULOS REMOTAMENTE OPERADOS (ROVS) EM 4 DOFS**

Júlia Maria Nascimento Ribeiro<sup>1</sup>

Orientador: Msc. Rebeca Tourinho Lima<sup>2</sup>

Coorientador: Msc. Lucas Marins Batista<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Senai Cimatec, E-mail: julia.ribeiro@gmail.com;

<sup>2</sup>Universidade Senai Cimatec, E-mail: rebeca.lima@fieb.org.br;

<sup>3</sup>Universidade Senai Cimatec, E-mail: lucas.batista@fieb.org.br;

## **THRUSTER OPTIMIZATION FOR FAULT TOLERANCE IN REMOTELY OPERATED VEHICLES (ROVS) IN 4 DOFS**

**Resumo:** *A fazer* **Palavras-Chaves:** xxxxx

**Abstract:** TODO

**Keywords:** xxxxx

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo (BIAZON, 2017), os oceanos representam cerca de 70% da superfície terrestre na atualidade, mas apesar da sua vasta ocupação, somente 5% do território oceânico é conhecido pelo homem. A lacuna de conhecimento gera uma crescente demanda na indústria por recursos encontrados *offshore*, como petróleo, recursos minerais (óleos, gás e metais) e biodiversidades.

A indústria apresenta uma crescente expansão em relação ao oceano. No relatório anual de sustentabilidade (PETROBRAS, 2024) é relatado que 98% da produção do ano de 2024 veio de águas profundas ou ultraprofundas. Esse cenário de exploração crescente cria uma demanda cada vez maior por tecnologias e mão de obra especializada.

Mergulhadores são uma mão de obra especializada amplamente utilizada na indústria para trabalhos *offshore*, seja para manutenção ou instalação de equipamentos. Segundo (OSHA, 2023), a organização de trabalho americana, os perigos enfrentados por profissionais do mergulho incluem afogamento, riscos respiratórios e cardiovasculares, hipotermia e riscos físicos devido ao manuseio de equipamentos pesados embaixo d'água, além dos riscos relacionados a descompressão e possíveis acidentes causados pelo ambiente de alto risco e nível elevado de estresse.

Dessa maneira, a indústria está constantemente em busca de melhorar a segurança no trabalho. Dentro desse contexto surgem os ROVs (*Remotely Operated Vehicles*), sendo esses uma alternativa estratégica para o desafio da segurança.

ROVs são veículos subaquáticos de menor porte e possuem a capacidade de se autopropulsionar abaixo da superfície da água, podendo, em alguns casos, também operar na superfície, dependendo de seu projeto e aplicação. Por serem veículos remotamente operados, podem ser utilizados em aplicações em alta profundidade de forma mais segura por não precisarem da presença de um ser humano na área de perigo.

Ao tirar o ser humano da zona de perigo são reduzidos os riscos fatais, além de oferecer vantagens operacionais como a possibilidade de um trabalho submerso contínuo e prolongado.

Apesar da utilização de ROVs ser vantajosa e funcional, a operação desses veículos é um desafio devido à instabilidade gerada pelos oceanos, que contam com correntes marítimas imprevisíveis, baixa visibilidade, entre outras adversidades.

Assim, para lidar com as adversidades enfrentadas no ambiente subaquático, os ROVs necessitam de sistemas de controle capazes de compensar os ruídos gerados pelas perturbações ambientais, garantindo estabilidade, navegação autônoma e execução adequada das atividades para as quais foram projetados. Dessa forma, diversas técnicas de controle foram desenvolvidas, variando desde a modelagem do sistema até a utilização de inteligência artificial.

Em (XU; WANG, 2018) são citados alguns tipos de controladores, entre eles o controlador fuzzy, caracterizado por sua independência de uma modelagem matemática exata do objeto de controle, tendo sua essência em estratégias de autocontrole.

As redes neurais também são apontadas como um possível controlador para um ROV, sendo essas caracterizadas por serem capazes de aproximar qualquer função não linear na teoria. Apresentam uma alta capacidade de processamento paralelo, o que gera uma grande tolerância a falhas e eficiência no tratamento de múltiplos sinais de entrada e saída.

Apesar das inúmeras vantagens, é necessário ter cautela pois há a tendência de convergir para mínimos locais, além de sofrer com a lentidão na aprendizagem, limitação no número de camadas e riscos de overfitting.

Por último é mencionado o controlador PID. Esse controlador é caracterizado por ser um controlador simples e amplamente utilizado, é um controle de resposta de velocidade, com efeito linear. Apesar de ser amplamente utilizado, não é o ideal para processos complexos e não lineares ou variantes no tempo.

Um conceito fundamental neste contexto é o de thruster. Thrusters são dispositivos responsáveis por impulsionar a embarcação, ou seja, são os propulsores que garantem sua movimentação.

Um dos desafios enfrentados por veículos que utilizam thrusters é a possibilidade de falha em um ou mais desses dispositivos durante a operação, o que levanta a questão de como recuperar o controle do veículo ou garantir que ele continue navegando mesmo diante dessas falhas.

Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é abordar o problema da falha de thrusters por meio da aplicação de um controle adaptativo tolerante a falhas (FTC – Fault-Tolerant Control), através da otimização da redistribuição das forças restantes pós-falha, buscando manter a estabilidade e a funcionalidade do sistema mesmo em condições adversas.

Os estudos relacionados ao FTC (Fault-Tolerant Control) serão aplicados ao robô BlueROV, um veículo subaquático do tipo ROV desenvolvido pela empresa BlueRobotics. A Figura 1 apresenta uma representação visual do robô.

Figura 1: Vistas frontal, lateral, isométrica e inferior do robô BlueROV.



Fonte: Autores.

A modelagem do sistema de controle será desenvolvida levando em consideração as dimensões, características e requisitos específicos do BlueROV.

Todos os testes e simulações serão realizados em ambiente computacional, utilizando ferramentas como o Gazebo, para simular a movimentação do ROV pré e pós-falha, para a observabilidade da realocação das forças otimizadas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica fundamental para modelagem de ROV é descrita em Fossen (Fossen, 2021), onde é demonstrado o modelo matemático para uma embarcação marítima com 6 DOFs. As equações de movimento adotadas do modelo dinâmico de Fossen contam com a equação de cinemática, equação 1, e a equação de cinética, equação 2.

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (1)$$

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (2)$$

Onde:

- $J(\eta)$  – É a matriz de transformação entre Body e NED;
- $M$  – É a matriz de massa total;
- $C$  – É a matriz de Coriolis;
- $D$  – É a matriz de amortecimento hidrostático;
- $g$  – É o vetor geral de restauração de força;

A equação 1 representa a cinemática do sistema, descrevendo assim os aspectos geométricos da movimentação do ROV em relação a diferentes coordenadas, enquanto a equação 2 representa a cinética do modelo, que consiste na análise de forças e momentos incluídas no ROV durante o movimento.

Baseando-se nas equações de cinemática e cinética para 6 DOFs é possível modelar o sistema do BlueROV light, que só é capaz de se movimentar em 4 DOFs. Dessa forma, os graus de liberdade que não são acessados pelo robô são zerados nas matrizes.

### 2.1 Modelo e Alocação de Thruster

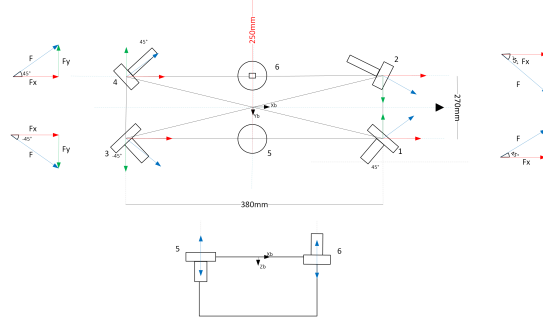
O modelo de ROV utilizado (BlueRov2 light) conta com 6 thrusters, como é possível visualizar na figura 2, sendo esses 4 horizontais e 2 verticais, tendo sua configuração ilustrada também na figura 2. Dessa forma, os thrusters dianteiros (1 e 2) giram no sentido anti-horário e os traseiros (3 e 4) giram no sentido horário.

Apesar da configuração física atípica dos thrusters, posicionados em direções opostas, a alocação de forças foi corretamente realizada graças à rotação em sentidos contrários. Caso todos os thrusters rotacionassem no mesmo sentido, essa disposição geraria forças opostas, comprometendo o controle do sistema. No entanto, como evidenciado na Figura 2, a rotação alternada dos thrusters soluciona esse problema, permitindo a geração das forças desejadas.

Conforme apresentado por (WU, 2018), o modelo de um thruster pode ser apresentado de forma linear pela equação 1. Onde a força do thruster é representada pelo vetor 4, os inputs de controle são representados por 5, e os coeficientes de thruster são representados pela matriz diagonal 6.

$$F = Ku \quad (3)$$

Figura 2: Diagrama de thruster e forças.



Fonte: Autores.

$$F = [F_1 \ F_2 \ \dots \ F_n]^T \quad (4)$$

$$u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n]^T \quad (5)$$

$$K = [K_1 \ K_2 \ \dots \ K_n] \quad (6)$$

Considerando o vetor de força  $f$  em 7 e o vetor de momentos  $r$  em 8, podemos calcular as forças e momentos em 6 DOFs pela seguinte fórmula:

$$f = [f_x \ f_y \ f_z]^T \quad (7)$$

$$r = [l_x \ l_y \ l_z]^T \quad (8)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} f \\ r \times f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ F_z l_y - F_y l_z \\ F_x l_z - F_z l_x \\ F_y l_x - F_x l_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

Considerando a limitação do BlueROV para somente 4 DOFs, é possível ajustar as equações 8 e 9 para obter as forças em 4 DOFs como desejado. Sendo necessário zerar os momentos que não serão aplicados ao ROV, tendo como resultado então:

$$r = [0 \ 0 \ l_z]^T \quad (10)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} f \\ r \times f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ F_y l_x - F_x l_y \end{bmatrix} \quad (11)$$

A alocação de controle é então modelada por:

$$\tau = T(\alpha)F = T(\alpha)Ku \quad (12)$$

Onde  $T$  é a matriz de alocação, onde  $T \in \mathbb{R}^{4 \times 6}$  e  $\alpha$  é o vetor de ângulos de rotação dos thrusters, onde  $\alpha \in \mathbb{R}^6$ . Como consequência, a matriz de configuração de thruster  $T$  pode ser calculada usando a equação 11. Uma vez determinadas as forças e momentos dos thrusters, é possível formalizar o problema da alocação, cujo objetivo é distribuir corretamente os esforços para os propulsores, para realizar a ação de controle desejada.

## 2.2 Alocação de controle

(WU, 2018) define a alocação de controle como o processo que computa o sinal de entrada do controle  $u$  e o aplica nos thrusters, de forma que o controle geral de forças  $\tau$  possa ser gerado. Partindo da equação 11, é possível calcular o vetor de entradas de controle através da seguinte equação:

$$u = K^{-1}T^{-1}\tau \quad (13)$$

Contudo, levando em conta que a matriz  $T$  é uma matriz não quadrática, é aplicada a Moore-Penrose pseudo-inversa  $T^+$ , dada por:

$$T^+ = T^T(TT^T)^{-1} \quad (14)$$

Assim, podemos obter o vetor de entradas do controle por:

$$u = K^{-1}T^+\tau \quad (15)$$

## 2.3 Formulação da Otimização

Em (JOHANSEN; FOSSEN; TØNDEL, 2005) é sugerida uma formulação de otimização para o problema de alocação de controle. É considerado então o seguinte problema de otimização:

$$\min_{u,s,\tilde{u}} (s^T Q s + u^T W u + \beta \tilde{u}) \quad (16)$$

A equação 16 está sujeita ao seguinte:

$$Tu = \tau + s \quad (17)$$

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (18)$$

$$-\tilde{u} \leq u_1, u_2, \dots, u_N \leq \tilde{u} \quad (19)$$

A variável  $s$  é o termo que garante a restrição proposta em 18, que faz com que o resultado da força generalizada  $Bu$  desvie das especificações de  $\tau$  caso seja necessário. O segundo termo do critério corresponde ao critério de mínimos quadrados, enquanto o terceiro termo minimiza a maior força entre os atuadores, devido a 19. O parâmetro  $\beta \geq 0$  controla a ponderação relativa desses dois critérios, permitindo que sejam tratados os compromissos entre o uso médio e o pior caso do controle.

## 3 METODOLOGIA

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

## AGRADECIMENTOS

## REFERÊNCIAS

BIAZON, Tássia. Nas profundezas dos oceanos. **Revista Marítima Brasileira**, v. 137, n. 0709, p. 66–82, 2017.

JOHANSEN, Tor A; FOSSEN, Thor I; TØNDEL, Petter. Efficient optimal constrained control allocation via multiparametric programming. **Journal of guidance, control, and dynamics**, v. 28, n. 3, p. 506–515, 2005.

OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. **Commercial Diving: Hazards and Solutions**. [S.l.: s.n.], 2023. Acesso em: 18 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.osha.gov/commercial-diving/hazards-solutions>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

PETROBRAS. **Relatório de Sustentabilidade Petrobras 2024**. [S.l.], 2024. acessado em 18 de agosto de 2025. Disponível em: <[https://issuu.com/estantepeetrobras/docs/relat\\_rio\\_de\\_sustentabilidade\\_petrobras\\_-\\_2024](https://issuu.com/estantepeetrobras/docs/relat_rio_de_sustentabilidade_petrobras_-_2024)>.

WU, Chu-Jou. **6-dof modelling and control of a remotely operated vehicle**. 2018. Tese (Doutorado) – Flinders University, College of Science e Engineering.

XU, Jiankang; WANG, Nan. Optimization of ROV Control Based on Genetic Algorithm. In: 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4. DOI: 10.1109/OCEANSKOB.2018.8559384.