

PROJETO DE OTIMIZAÇÃO DE CONTROLADORES DE TRAJETÓRIAS DE VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS AUTÔNOMOS POR MEIO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARALELOS

Eduardo Attuy Carvalho, engedu.carvalho@hotmail.com¹

Carlos Henrique Farias dos Santos, chf.santos@uol.com.br¹

¹ Universidade Estadual do Oeste do Paraná, PR, Brasil

Resumo: Visando o controle da trajetória de veículos subaquáticos, apesar da ocorrência de faltas e falhas dos propulsores, propôs-se combinar uma estratégia de controle tolerante a faltas com a técnica de realimentação linearizante otimizada por meio de algoritmos genéticos. Uns dos principais problemas sofridos pelos veículos submarinos autônomos, que são utilizados na pesquisa e monitoramento de ambientes subaquáticos, são a falha parcial e a falha total dos propulsores, as quais podem ocorrer durante a missão do veículo e, assim, comprometer a missão e ocasionar a perda do veículo. A vantagem dos algoritmos genéticos está no uso de conceitos da seleção natural na otimização de sistemas de controle. Assim, os parâmetros K_p , K_D e K_I foram utilizados como indivíduos e definiu-se a soma dos erros de trajetória como função custo. Criou-se uma população de 32 indivíduos e dividiu-se a mesma em 4 subpopulações de 8 indivíduos. A cinemática e dinâmica do veículo submarino *Biointeractive-1*, que possui 4 propulsores horizontais e 2 verticais, em 6 graus de liberdade, foram descritas matematicamente e, através de simulações numéricas no software Matlab® e sua ferramenta Simulink®, verificou-se quais ganhos de K_p , K_D e K_I atingiram menores somas de erros de posição, velocidade e aceleração para três trajetórias diferentes. Apesar dos distúrbios da corrente submersa e das falhas de 2 propulsores horizontais, os ganhos obtidos garantiram o controle da trajetória e o sucesso da missão.

Palavras-Chave: Controle Tolerante a Faltas, Veículo Subaquático Autônomo, Realimentação Linearizante, Algoritmos Genéticos.

1. INTRODUÇÃO

Graças aos avanços nos estudos da robótica e da mecatrônica, aumentou-se o uso de Veículos Subaquáticos (VS) para inspeção de ambientes submersos, em detrimento ao uso de mergulhadores (Carvalho, 2015). Fossen (2012) classifica os VS em Veículos Subaquáticos Remotamente Operados (VSRO) e os Veículos Subaquáticos Autônomos (VSA). Conforme Santos (2013), veículos do primeiro grupo precisam receber os comandos do operador para tomada de decisão, já os do segundo grupo, possuem a capacidade de tomada de decisão de forma autônoma.

Apesar das precauções tomadas durante fase de projeto, os VSA, objeto de estudo deste trabalho, podem sofrer a falta de seus propulsores durante a missão (Choi & Kondo, 2010). Além dos custos da manutenção do veículo, tem-se a possibilidade de perder o mesmo devido à falha parcial ou à falha completa dos propulsores.

Conforme Fossen (2011), descreveram-se as equações não lineares de cinemática e dinâmica do VSA *Biointeractive-1*, vide Fig. 1, proposto por Kondo et. al. (2010), o qual possui 6 graus de liberdade não lineares e completamente acoplados.

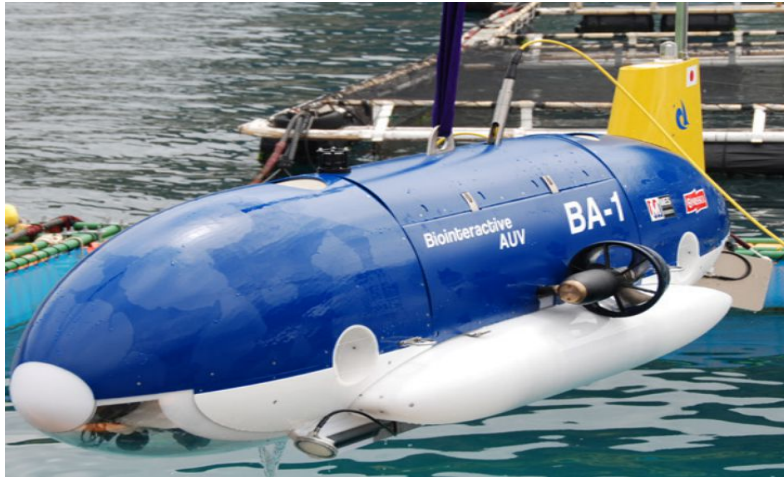


Figura 1. Veículo BioInteractive-1 (Kondo et. al., 2010)

A formulação matemática do BA-1, que possui quatro propulsores horizontais e dois propulsores verticais, segue a Eq. (1) descrita por Fossen (2011):

$$M\dot{v} + C(v, \eta)v + D(v, \eta)v + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

Em seguida, aplicou-se a técnica de Realimentação Linearizante para realizar o controle de trajetória do veículo conforme a Eq. (2):

$$K_I \ddot{\tilde{\eta}} + K_D \dot{\tilde{\eta}} + K_P \tilde{\eta} = 0 \quad (2)$$

Onde, $\tilde{\eta}$ e $\dot{\tilde{\eta}}$ são respectivamente o erro, a derivada do erro e a derivada de segunda ordem do mesmo em função do tempo, enquanto K_P , K_D e K_I são matrizes positivas e definidas.

No controle por AG utilizou-se leis baseadas na teoria da evolução de Darwin, para encontrar os melhores ganhos dos valores de entrada de forças e momentos no veículo subaquático (Iyoda, 2010). O desempenho do controle foi avaliado por meio de simulações numéricas do veículo BA-1, ocorrendo falhas parciais em dois propulsores horizontais em intervalos de tempo específicos durante a simulação.

Na Figura 2 exibe-se a estrutura do simulador numérico, que possui um gerador de trajetória pré-definida, cabendo ao controlador utilizar os erros realimentados para definir as forças e momentos necessários nos propulsores para garantir o controle da trajetória. Visando simular uma condição real de falta, desenvolveu-se um simulador de faltas dos propulsores horizontais 1 e 4, portanto, utilizou-se também um controle tolerante a faltas seguindo os trabalhos de Choi e Kondo (2010) de forma a isolar falta e garantir a estabilidade do veículo.

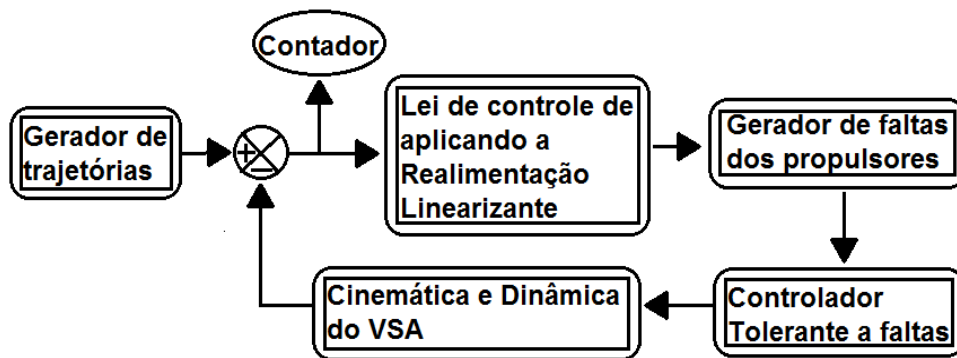


Figura 2. Estrutura do simulador numérico

Para realizar a otimização via Algoritmos Genéticos, estabeleceu-se a função custo como o somatório dos erros $\tilde{\eta}$, $\dot{\tilde{\eta}}$ e $\ddot{\tilde{\eta}}$ a cada intervalo de simulação. Portanto, os indivíduos mais aptos possuem uma menor função custo e, consequentemente, possuem maior probabilidade de se reproduzirem.

A população de 32 indivíduos foi dividida em 4 subpopulações de 8 indivíduos, vide Fig. 3, e a cada 4 gerações ocorreu a permuta aleatória dos 2 indivíduos mais aptos de uma subpopulação para outra adjacente, de forma a evitar a convergência prematura.

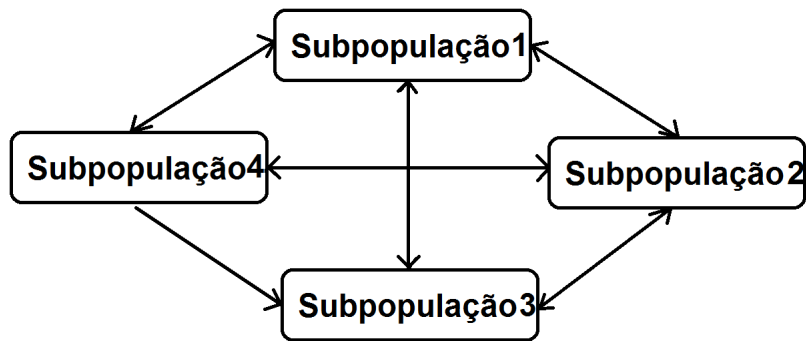


Figura 3. Divisão da população em 4 subpopulações

Os parâmetros dos AG proposto são exibidos na Tab. 1:

Tabela 1. Parâmetros dos AG

Número de indivíduos	32
Subpopulações	4
Taxa de migração entre as subpopulações	25%
Taxa de mutação	15%
Critério de parada	20 gerações
Taxa de substituição	50%

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Utilizou-se o software Matlab® junto ao pacote Simulink® para realizar as simulações numéricas do VSA. Em seguida, determinaram-se três trajetórias com duração de 500 segundos por meio de uma função de quinta ordem, a qual faz com que as velocidades iniciais e finais sejam nulas. O simulador desenvolvido pode ser visto na Fig. 4.

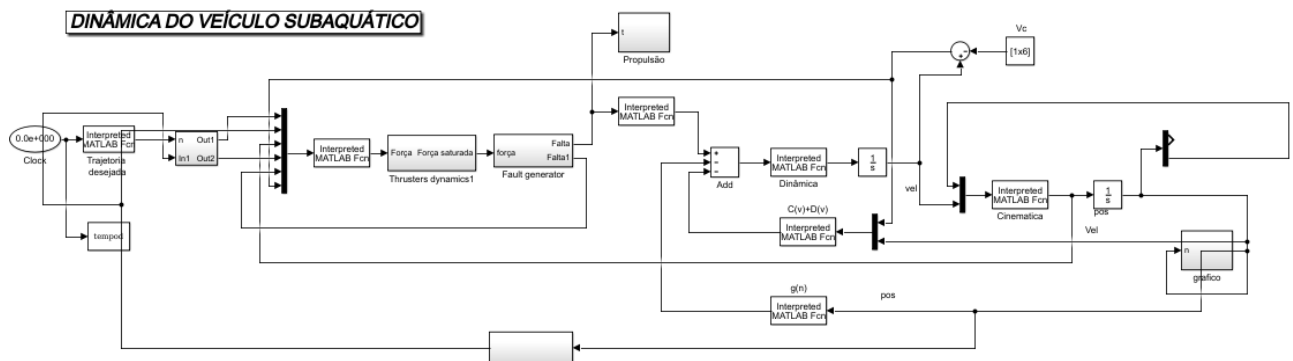


Figura 4. Simulador desenvolvido no software Matlab® junto ao pacote Simulink®

Tem-se a ocorrência de falha nos propulsores horizontais 1 e 4 do BA-1 respectivamente aos 100 e 300 segundos. No sub-bloco gerador de faltas, visto Fig. 5, a falha é de 70% no propulsor 1 e de 50% no propulsor 4.

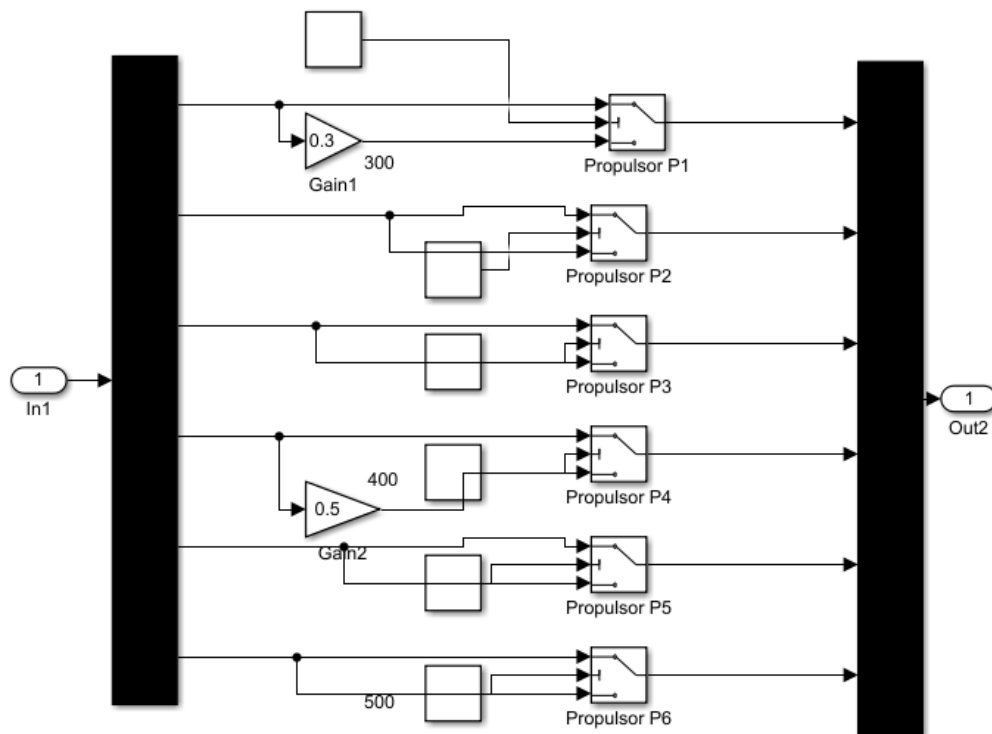


Figura 5. Sub-bloco gerador de falhas do veículo

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

Os parâmetros do BA-1 são mostrados na Tab. 2 (Kondo et. al., 2010).

Tabela 2. Parâmetros do BA-1

Peso (fora d'água)	430 kg
Largura	1 m
Comprimento	3 m
Altura (desconsiderando as antenas)	0,9 m
Profundidade máxima alcançada	1000 m

O *hardware* utilizado nas simulações numéricas é exibido na Tab. 3.

Tabela 3. Configurações do *Hardware* utilizado nas simulações numéricas

Processador	Intel Core i5 2.30Ghz
Sistema Operacional	Windows 7
Memória RAM	6 Gigabytes

Aplicou-se o método de Runge-Kutta de 4ª ordem com um intervalo de integração de 0,1s para solucionar as simulações numéricas. A velocidade de correnteza foi 0,2 m/s nos eixos x , y e z .

3.1. Primeira trajetória

Os ganhos encontrados para o indivíduo mais apto ao final da simulação da primeira trajetória foram: $K_p = 9,8827$, $K_D = 2,2287$ e $K_I = 3,7341$. A trajetória do indivíduo mais apto é mostrada em metros na Fig. 6.

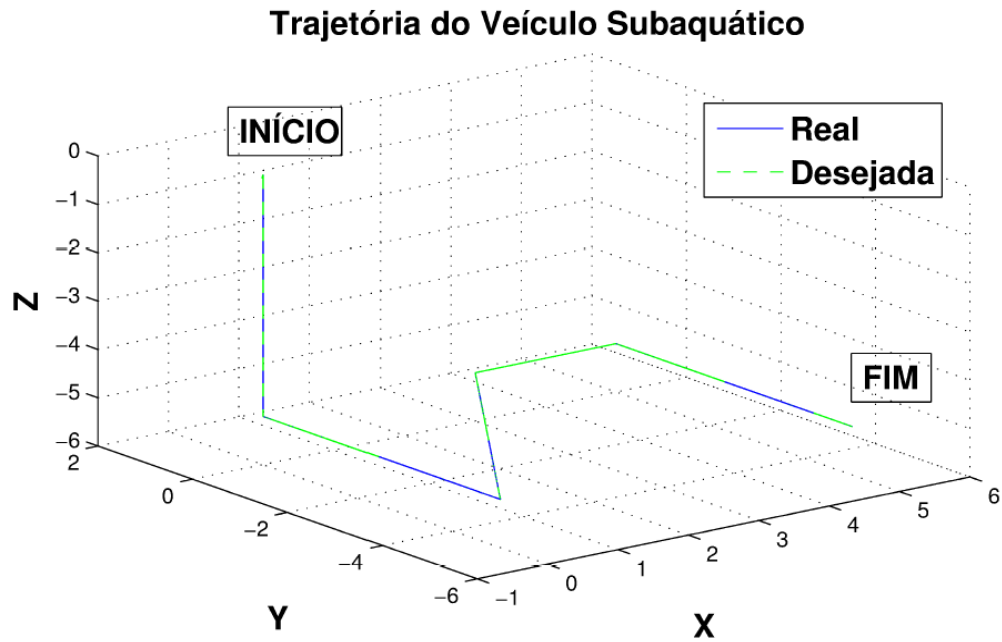


Figura 6. Trajetória 1 do BA-1 utilizando a lei de AG paralelos

3.2. Segunda trajetória

Os ganhos encontrados para o indivíduo mais apto ao final da simulação da primeira trajetória foram: $K_P = 9,8338$, $K_D = 3,8807$ e $K_I = 4,6432$. A trajetória do indivíduo mais apto é mostrada em metros na Fig. 7.

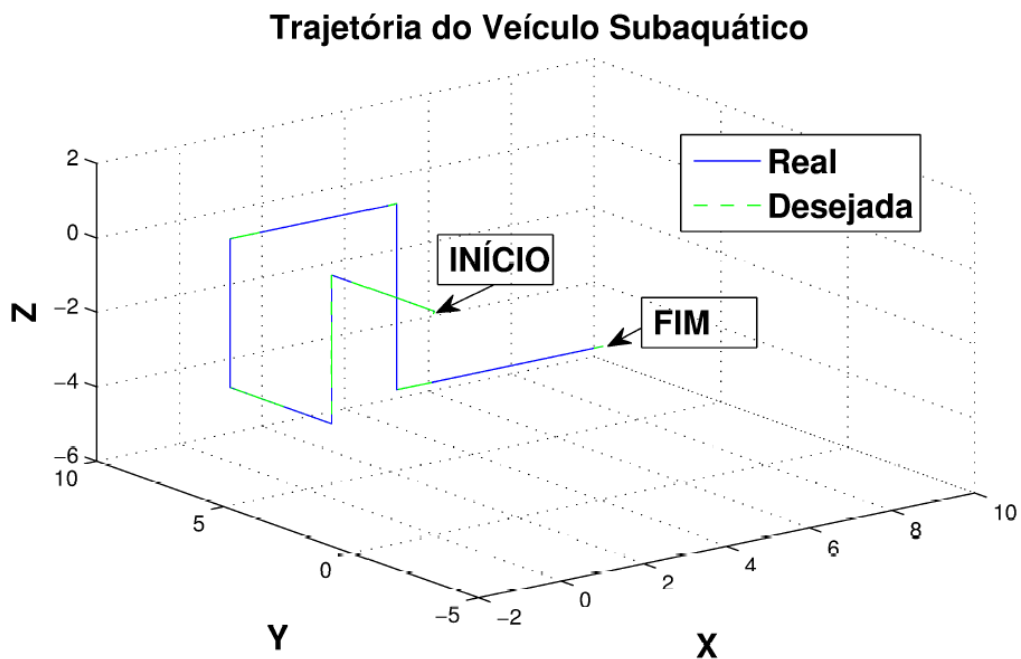


Figura 7. Trajetória 2 do BA-1 utilizando a lei de AG paralelos

3.3. Terceira trajetória

Os ganhos encontrados para o indivíduo mais apto ao final da simulação da primeira trajetória foram: $K_P = 8,5924$, $K_D = 2,2678$ e $K_I = 4,3157$. A trajetória do indivíduo mais apto é mostrada em metros na Fig. 8.

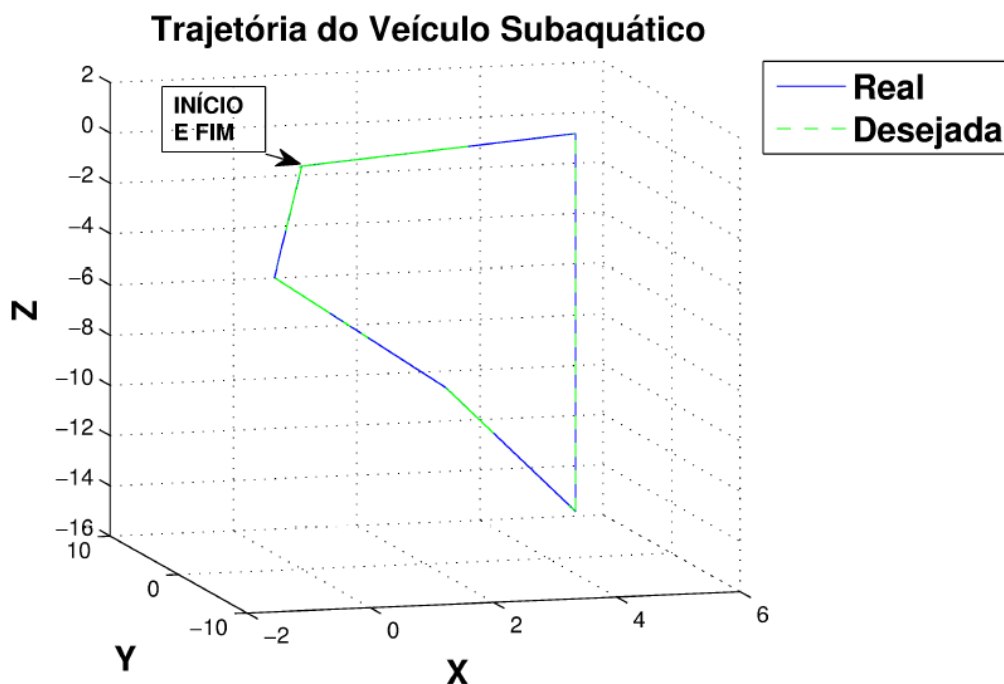


Figura 8. Trajetória 3 do BA-1 utilizando a lei de AG paralelos

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, propôs-se realizar o controle tolerante a falhas e garantir o controle da trajetória do veículo BA-1, buscando aliar o CTF proposto por Choi e Kondo (2010) com a realimentação linearizante, na qual houve uma otimização por algoritmos genéticos paralelos.

Os objetivos deste trabalho foram atendidos, pois, apesar das falhas em 2 propulsores horizontais, encontraram-se os ganhos de K_p , K_D e K_I e assim os erros foram da ordem de milímetros, entretanto, a simulação numérica teve um alto custo computacional, pois o cálculo para cada conjunto de 20 gerações levou em média 260 minutos. A utilização de Algoritmos Genéticos mostrou-se viável para a solução desse tipo de problema, entretanto, para ser viável em operações *online*, deve-se aplicar em linguagens de baixo nível para reduzir o tempo de simulação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual do Oeste do Paraná e ao PTI por todo o apoio durante a pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Carvalho, Eduardo A., Estudo e implantação de leis de Controle Ótimo e Algoritmos Genéticos aplicados em Veículos Subaquáticos não tripulados utilizados em inspeções de barragens. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2015, 135 p. (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica)
- Choi, J-K. Kondo, H. On fault-tolerant control of a hovering AUV with four horizontal and two vertical thrusters. In: Ocean's 2010 IEEE. Sydney, 2010
- Fossen, Thor Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, Wiley, 2011.
- Fossen, Thor. How to incorporate wind, waves and ocean currents in the marine craft equations of motion, Proceedings of the IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, Genova, Wiley, 2012.
- Kondo H.; Shimizu, E.; Choi J.-K.; Nakane, K.; Matsushima, M.; Nagahashi, K.; Nishida, Y.; Matsui, R. Biointeractive autonomous underwater vehicle, in Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2010 IEEE/OES, pages 1 - 7, sept. 2010.
- Iyoda, E. M. Inteligência computacional no projeto automático de redes neurais híbridas e redes neurofuzzy heterogêneas, FEEC / UNICAM, São Paulo, 2010, 166 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica).
- Santos, Carlos H. F. dos, Controle Tolerante a Falhas utilizando propulsores virtuais para um veículo subaquático autônomo, Relatório Técnico, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2013.
- Santos, Carlos H. F. dos, Virtual Fuzzy Thrusters inserted in Optimal Control Applied to Fault Tolerant Strategy of Underwater Vehicles, Relatório Técnico, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2017.
- Tavares, A. M., Um estudo sobre a modelagem e o controle de veículos subaquáticos não tripulados, Universidade Federal do Rio Grande, 2003.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são s únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DESIGN OF OPTIMIZATION OF TRAJECTORY CONTROLLERS FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES THROUGH GENETIC ALGORITHMS

Eduardo Attuy Carvalho, engedu.carvalho@hotmail.com¹

Carlos Henrique Farias dos Santos, chf.santos@uol.com.br¹

¹ Universidade Estadual do Oeste do Paraná, PR, Brasil

Abstract: Aiming at the control of trajectory in underwater vehicles, despite the faults and failures of its propellers, it was proposed to combine a strategy of Fault Tolerant Control (FTC) with the technique of feedback linearization through genetic algorithms. One of the main problems suffered by autonomous underwater vehicles, which are used in research and monitoring of underwater environments, is the partial failure and total lack of their propellers that may occur during the mission of the vehicle and, thus, compromise the mission and loss of the vehicle. The advantage of genetic algorithms lies in the use of natural selection concepts in optimization of control systems. Thus, the parameters K_p , K_D and K_I were used as individuals and the sum of the trajectory error as cost function was created. population of 32 individuals then divided it into 4 subpopulations of 8 individuals. The kinematics and dynamics of the underwater vehicle Biointeractive-1, which has 4 horizontal and 2 vertical propellers, in 6 degrees of freedom, were mathematically described and, through numerical simulations in Matlab® software and its Simulink® tool, it was verified which gains of K_p , K_D and K_I reached smaller sums of errors of position, speed and acceleration. Despite the disturbances of the underwater current and the failures of 2 horizontal propellers, the gains obtained ensure the trajectory control and the success of the mission.

Keywords: Control Fault Tolerant, Autonomous Underwater Vehicles, Linearizing Feedback, Genetic Algorithms.