

CONTROLE AUTOMÁTICO DE UM ROV PARA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS SUBMERSAS

VINÍCIUS N. KUHN¹, PAULO L. J. DREWS JR², SEBASTIÃO C. P. GOMES³, MAURO A. B. CUNHA⁴,
SÍLVIA, S. C. BOTELHO²

1. *Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, Campus Charqueadas, Coordenadoria de Mecatrônica, Rua General Balbão, 81, CEP 96745-000, Charqueadas, RS, Brasil*
E-mail: vinicius@charqueadas.ifsul.edu.br
2. *Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Centro de Ciências Computacionais Avenida Itália Km 8, CEP 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil*
E-mails: paulodrews@furg.br, silviacb@furg.br
3. *Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Instituto de Matemática, Estatística e Física Avenida Itália Km 8, CEP 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil*
E-mail: sebastiaogomes@furg.br
4. *Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, Campus Pelotas, Grupo de Pesquisa em Automação e Controle Praça Vinte de Setembro, 455, CEP 96015-360, Pelotas, RS, Brasil*
E-mail: mauro@pelotas.ifsul.edu.br

Abstract— This paper proposes a control strategy for an underwater vehicle to supervise submerged structures, without using the knowledge of a previous dynamic model in the control law and also using a low cost embedded minimal instrumentation. The main focus is the yaw angle control, i.e., the angular position control around vertical axis of the vehicle. An inertial rotation sensor (gyroscope) is employed to observe a measurement of the angular velocity. In this work, a proportional and derivative (PD) control with a Fuzzy algorithm (PD-Fuzzy) for correcting errors in angular position is proposed. Experimental results showed that the Fuzzy algorithm was able to significantly improve the performance of the PD control, reducing errors in position.

Keywords— control, fuzzy, underwater robotics, ROV, sensors.

Resumo— O presente trabalho propõe uma estratégia de controle para um veículo subaquático supervisionar estruturas submersas, sem a utilização, na lei de controle, do conhecimento prévio de um modelo dinâmico e, ainda, utilizando uma instrumentação embarcada mínima e de baixo custo. O enfoque principal é o controle do ângulo de guinada, ou seja, o controle da posição angular em torno do eixo vertical do veículo. Utiliza-se, para isso, um sensor de rotação inercial (giroscópio) para a observação de uma medida da velocidade angular. Propõe-se, neste trabalho, a utilização de um controle do tipo proporcional e derivativo (PD), utilizado em conjunto com um algoritmo Fuzzy (PD-Fuzzy) para a correção de erros em posição angular. Resultados experimentais mostraram que o algoritmo Fuzzy foi capaz de melhorar significativamente o desempenho do controle PD, reduzindo erros em posição.

Palavras-chave— controle, fuzzy, robótica subaquática, ROV, sensores.

1 Introdução

Atualmente, o oceano desempenha um papel fundamental na economia mundial, principalmente devido à indústria de extração de petróleo. Apesar disso, grande parte do meio subaquático ainda é desconhecida pelo homem, quer seja por sua dimensão, quer seja pelas condições adversas do ambiente (correntes oceânicas, elevadas pressões, etc.). Nessas situações, veículos subaquáticos não-tripulados passam a ser, uma importante ferramenta, pois permitem realizar inspeções, coletar dados, efetuar trabalhos de construção e instalação de estruturas subaquáticas, etc. Além disso, eles possuem a capacidade de poder realizar toda essa gama de atividades a altas profundidades e sem colocar em risco vidas humanas.

No Brasil, existem poucos trabalhos na área de robótica subaquática e, de uma forma geral, a

pesquisa nessa área ainda é insipiente, se comparada em nível mundial. Barros e Soares (2002) apresentaram uma proposta de um veículo de baixo custo que pode operar como ROV (*Remotely Operated Vehicle*) ou AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*). Souza e Maruyama (2002) investigaram diferentes técnicas de controle para posicionamento de veículos. Tavares (2003) contribuiu com um estudo teórico sobre modelagem e controle de veículos subaquáticos não-tripulados. Moraes (2005) e Centeno (2007) trataram do projeto e construção de um ROV de baixo custo, utilizado no presente trabalho. Magalhães (2007) realizou o projeto e a construção de um ROV de baixo custo com caracterização dos sistemas de propulsão. Luque (2007) apresentou resultados de simulações do controle de um AUV utilizando técnicas para sistemas multivariáveis. Aguilar (2007) propôs um sistema de controle inteligente e adaptativo para veículos submarinos semi-autônomos utilizando técnicas *Fuzzy*. Buscariollo (2008) desenvolveu um

sistema de posicionamento dinâmico baseado em visão computacional auxiliado por ponteiros laser. Dantas, Cruz e Barros (2010) trataram do controle longitudinal de um AUV utilizando técnicas de controle robusto. Gomes et al (2010) apresentam estudos teóricos do controle de um ROV baseado em estrutura variável.

Projetar leis de controle para veículos subaquáticos não-tripulados constitui uma difícil tarefa, principalmente em razão de dificuldades na determinação de um modelo dinâmico realista para o veículo. A existência de distúrbios externos, como correntes marítimas, também acrescenta dificuldade extra ao desempenho do sistema de controle. Veículos subaquáticos, além das dificuldades naturais na determinação de um modelo dinâmico confiável, também se caracterizam por possuírem uma difícil instrumentação, ou seja, determinar com precisão a posição e a orientação inerciais do veículo a partir de sensores é uma tarefa complicada e pode ter um custo muito elevado.

O presente trabalho propõe uma estratégia de controle para um ROV supervisionar uma estrutura subaquática, sem a utilização, na lei de controle, do conhecimento prévio de um modelo dinâmico e ainda, utilizando uma instrumentação embarcada mínima e bastante acessível.

2 Veículo subaquático

O veículo subaquático utilizado é apresentado na Figura 1. Trata-se do ROVFURG-II, desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande (Centeno, 2007; Moraes, 2005).



Figura 1. ROVFURG-II.

O ROVFURG-II é um protótipo de veículo subaquático do tipo ROV, controlado por um operador humano a partir de um joystick com o auxílio de imagens capturadas pela câmera de vídeo embarcada. Dessa forma, o operador pode controlar manualmente a trajetória do veículo, bem como, todas as funcionalidades da câmera de vídeo e do sistema de iluminação. Esse veículo foi projetado para realizar exclusivamente inspeções no ambiente subaquático, não dispondo de qualquer tipo de manipulador para realização de trabalhos. O ROVFURG-II possui flutuabilidade levemente positiva, próxima a neutra, de modo que pequenos empuxos aplicados pelos propulsores verticais tendem a movimentar o protótipo facilmente. Em casos de problemas de funcionamento do veículo, a

flutuabilidade levemente positiva faz com que o mesmo retorne à superfície lentamente.

Esse veículo possui quatro propulsores, dois dispostos horizontalmente e dois verticalmente, conforme se observa na Figura 2, onde são mostradas as vistas ortogonais simplificadas desse veículo.

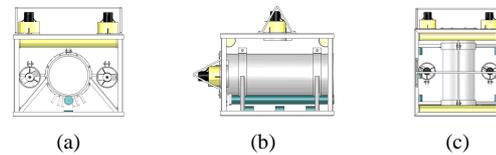


Figura 2. Vistas ortogonais: (a) frontal, (b) lateral e (c) superior

Outra característica importante é que esse ROV é sub-atuado, ou seja, possui um número insuficiente de atuadores para a efetuação do controle ativo nos seis graus de liberdade (não possui propulsores laterais que permitiriam um deslocamento lateral puro do veículo). Porém, os movimentos de arfagem e rolamento são controlados passivamente a partir do distanciamento entre os centros de empuxo e gravidade, o que origina os torques restauradores que mantêm o veículo na posição horizontal (Tavares, 2003). Por essa razão, o veículo possui controle ativo em somente quatro graus de liberdade.

3 Sensoriamento incorporado ao ROV

Para a realização do controle automático foram incorporados ao ROV um sensor inercial de rotação e um sensor de profundidade. No presente artigo, será dada ênfase ao controle do ângulo de guinada do veículo (em torno do eixo vertical) fazendo-se uso do sensor de rotação do tipo giroscópio MEMS (*Micro Electro-Mechanical System*).

O giroscópio integrado ao veículo é produzido pela *Analog Devices*, o ADXRS610 (*Analog Devices*, 2010). Esse componente possui um sensor de temperatura integrado com sinal disponível. Com esse sinal é feita uma correção *online* do valor de *offset* do sinal de velocidade angular de acordo com a temperatura do sensor. Essa correção é feita de maneira semelhante ao descrito em Weinberg (2009).

Uma característica importante desses componentes é que eles fornecem um sinal de velocidade angular e não de posição angular, assim, torna-se necessário fazer uma integração numérica do sinal de velocidade a fim de obter a posição angular. Portanto, a correção em função da temperatura citada anteriormente é fundamental para reduzir erros de deriva em razão da integração do sinal do girômetro para gerar a posição angular.

Para fins de verificação do funcionamento e calibração do sensor foram realizados alguns ensaios experimentais. Nesses testes, o giroscópio foi conectado ao circuito de aquisição de dados desenvolvido em Kuhn (2005). Após iniciado o processo de aquisição, o giroscópio foi, ao longo do tempo, submetido às seguintes posições angulares:

0°, 90°, 180°, 270°, 360°, 270°, 180°, 90°, 0°, -90°, -180°, -270°, -360°, -270°, -180°, -90°, 0°, 90°, 0°, -90° e 0°. Ao término dessa sequência, o sensor foi submetido a vibrações e movimentos aleatórios para, finalmente, ser reposicionado em 0°. O sinal capturado foi, então, integrado numericamente para verificar se as posições angulares obtidas corresponderiam às impostas no experimento. Esses resultados são apresentados nas Figuras 3 e 4.

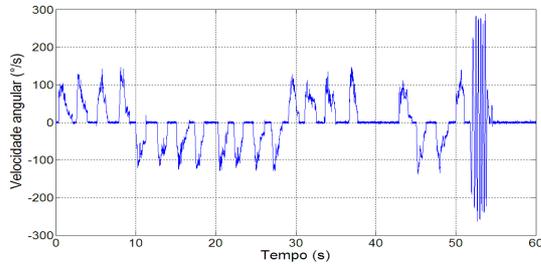


Figura 3. Sinal de velocidade angular do giroscópio.

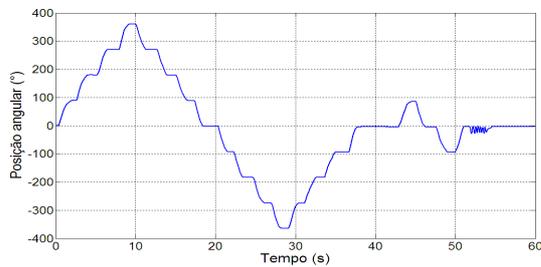


Figura 4. Sinal do giroscópio integrado numericamente.

Percebe-se que o sinal de posição angular apresenta erros que tendem a aumentar com o decorrer do tempo, devido à operação de integração numérica e, principalmente, ao ARW (*Angle Random Walk*) do próprio sensor (Stockwell, 2003). Após um minuto de integração, o maior erro de posicionamento, em três repetições desse experimento, foi de 3,45°, o que é aceitável para missões de inspeção, mas deve ser levado em consideração em outros tipos de aplicações.

4 Controlador do ângulo de guinada

O algoritmo de controle é baseado em um controlador do tipo proporcional e derivativo (PD) em posição com correção *Fuzzy* (PD-*Fuzzy*). A Figura 5 mostra um diagrama de blocos com esta estratégia de controle.

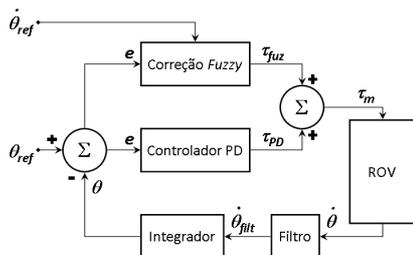


Figura 5. Diagrama em blocos do controlador PD-*Fuzzy*.

O sinal do erro em posição angular entra tanto no algoritmo *Fuzzy* quanto no controlador PD, além

disso, o sinal de referência de velocidade angular é utilizado pelo algoritmo *Fuzzy*. A soma das saídas desses dois blocos forma o torque de controle que é enviado aos atuadores do ROV. A expressão matemática discretizada do controlador PD é apresentada na Equação (1).

$$\tau_{PD}(t_k) = Kp \cdot e(t_k) + Kd \cdot (e(t_k) - e(t_{k-1}))/T \quad (1)$$

onde: $\tau_{PD}(t_k)$ é o sinal de saída do controlador no instante atual, Kp é o ganho proporcional do controlador, Kd é o ganho derivativo do controlador, $e(t_k)$ é o sinal de erro amostrado no instante atual, $e(t_{k-1})$ é o sinal de erro no instante de amostragem anterior e T é o período de amostragem.

O algoritmo *Fuzzy* implementado visa ampliar o desempenho de forma a substituir a ausência da componente integral no controlador PD, visto que essa é difícil de ser ajustada, além de eventualmente tornar o sistema instável, principalmente em regimes estacionários.

Os controladores *Fuzzy* são baratos para desenvolver, cobrem uma larga faixa de operação e se adaptam bem a descrição em linguagem natural (Al-Odienat e Al-Lawama, 2008). Quando associados a controladores clássicos como o PD tornam o sistema de controle mais robusto, melhorando a qualidade final do controlador.

O controlador desenvolvido baseia-se na lógica *Fuzzy* (Zadeh, 1965), convertendo o sinal de controle, no caso o erro de posição angular, em variáveis linguísticas, aplicando regras *Fuzzy* e obtendo, posteriormente, um sinal a ser aplicado ao sistema. Na Figura 6 é ilustrado o esquema utilizado para o controle do ROV, enquanto que na Figura 7 a correção *Fuzzy* é detalhada. Pode-se notar que a correção é feita em três fases, detalhadas a seguir:

- Fuzzificação: nessa primeira fase, o sinal de entrada físico é convertido em variáveis linguísticas de modo a permitir a aplicação das regras *Fuzzy*. Um total de onze variáveis *Fuzzy* foram utilizadas no controlador, conforme explicitado na Figura 7.
 - Regras *Fuzzy*: considerando-se o conjunto de entrada, foram utilizadas regras simples, tendo-se como objetivo final a redução do erro do ângulo de guinada do veículo:
 - Se erro=GG+, então: saída=GG-;
 - Se erro=G+, então: saída=G-;
 - Se erro=M+, então: saída=M-;
 - Se erro=P+, então: saída=P-;
 - Se erro=PP+, então: saída=PP-;
 - Se erro=Z, então: saída=Z;
 - Se erro=PP-, então: saída=PP+;
 - Se erro=P-, então: saída=P+;
 - Se erro=M-, então: saída=M+;
 - Se erro=G-, então: saída=G+;
 - Se erro=GG-, então: saída=GG+.
- onde: 'G' = grande, 'M' = médio, 'P' = pequeno, 'Z' = zero. '+' = positivo e '-' = negativo.

- Defuzzificação: nessa última etapa o sinal linguístico é convertido em um sinal físico utilizando-se o método do centróide da área (Cox, 2002), sendo que o torque de saída possui uma limitação variável descrita pela Equação (2).

$$\tau_{fuz_{m\acute{a}x}} = \tau_{m\acute{i}n} + (\tau_{m\acute{a}x} - \tau_{m\acute{i}n}) \cdot \left| \frac{\dot{\theta}_{ref}}{\dot{\theta}_{m\acute{a}x}} \right| \quad (2)$$

Na Equação (2), $\dot{\theta}_{ref}$ e $\dot{\theta}_{m\acute{a}x}$ são a velocidade de referência e a velocidade máxima de referência, respectivamente. O torque máximo de saída da ação *Fuzzy* ($\tau_{fuz_{m\acute{a}x}}$) varia de um valor mínimo ($\tau_{m\acute{i}n}$) até um valor máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$), de acordo com a velocidade de referência. Esse artifício visa liberar a ação *Fuzzy* para velocidades significativas e atenuá-la para velocidades pequenas ou nulas. Dessa forma, o desempenho é aumentado para o seguimento de trajetórias variáveis e reduzido para referências constantes ou com pequenas variações angulares, sendo fundamental para que o sistema se mantenha estável durante o seguimento dessas trajetórias.

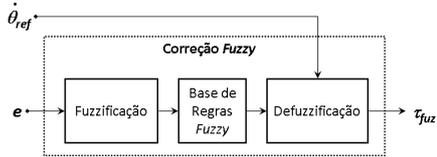


Figura 6. Diagrama esquemático da correção *Fuzzy*.

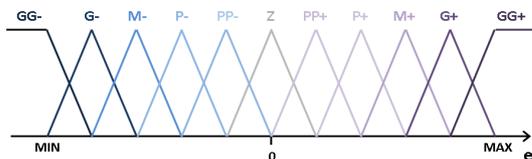


Figura 7. Variáveis linguísticas (conjuntos *Fuzzy*).

5 Resultados Experimentais

Foram realizados experimentos com o controlador clássico PD na tentativa de se obter o melhor ajuste de ganhos possível que reduzisse o erro de seguimento de trajetória. Esses resultados foram tomados como referência de desempenho para os ensaios com o controlador utilizando lógica *Fuzzy*. Os ajustes dos parâmetros dos controladores foram feitos através do método da tentativa e erro, uma vez que o modelo do sistema é desconhecido.

O sinal de referência de posição angular utilizado em todos os experimentos foi gerado a partir de um perfil trapezoidal de velocidade, conforme pode ser visto nas Figuras 8, 11 e 14. A integração desse perfil de velocidade gera a trajetória de referência em posição vista nas Figuras 9, 12 e 15. Nessa trajetória, o ROV teria que sair da posição angular inicial, girar 180° em 8 segundos e girar no sentido contrário até retornar à sua posição inicial em 16 segundos. Após este retorno o veículo deveria manter a sua posição angular inicial.

As Figuras 8 e 9 apresentam as curvas de resposta do ROV utilizando um controlador PD e a Figura 10 apresenta o respectivo esforço de controle.

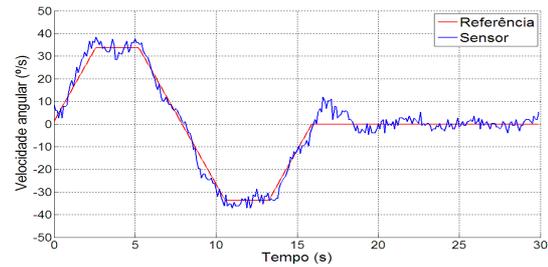


Figura 8. Velocidade angular (PD).

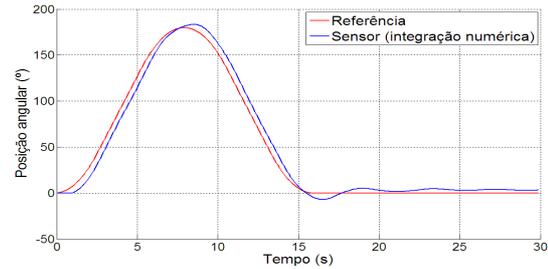


Figura 9. Posição angular (PD).

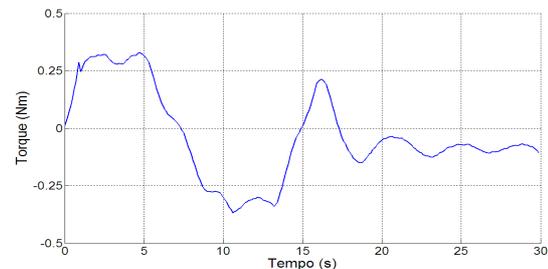


Figura 10. Torques dos atuadores (PD).

As Figuras 11, 12 e 13 mostram os resultados obtidos utilizando-se um controlador PD-*Fuzzy* com $\tau_{m\acute{i}n} = 0\%$ e $\tau_{m\acute{a}x} = 25\%$, ou seja, o torque de contribuição da ação *Fuzzy* é nulo para velocidades de referência nulas, fazendo com que o algoritmo *Fuzzy* aumente o desempenho do controlador somente no seguimento de trajetórias com velocidades significativas. Na Figura 13 percebe-se claramente que a contribuição *Fuzzy* é nula após o término do perfil trapezoidal.

As Figuras 14, 15 e 16 apresentam as respostas do sistema utilizando um controlador PD-*Fuzzy* com $\tau_{m\acute{i}n} = 5\%$ e $\tau_{m\acute{a}x} = 25\%$, ou seja, o torque de contribuição da ação *Fuzzy* é pequeno para velocidades de referência nulas. Assim, o algoritmo *Fuzzy* atua pouco no seguimento de trajetórias com velocidades nulas, tendendo a corrigir erros em estado estacionário (ausência da componente integral no controlador PD) sem levar o sistema à instabilidade. Na Figura 16 nota-se uma pequena contribuição do algoritmo *Fuzzy* após o término do perfil trapezoidal.

A Figura 17 apresenta, em um mesmo gráfico, os sinais de erro correspondentes a cada um dos controladores utilizados.

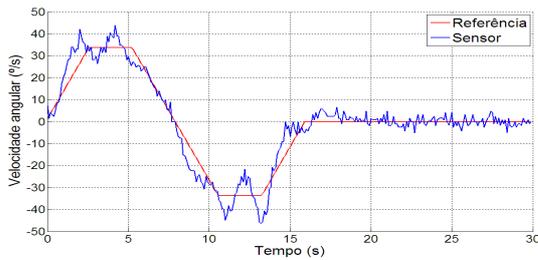


Figura 11. Velocidade angular (PD-Fuzzy com $\tau_{\min} = 0\%$).

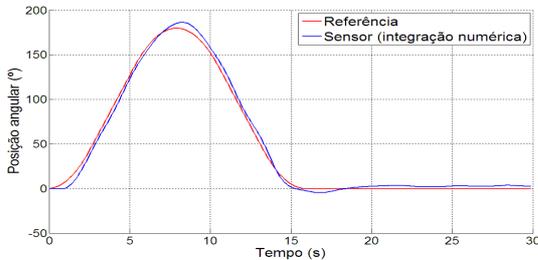


Figura 12. Posição angular (PD-Fuzzy com $\tau_{\min} = 0\%$).

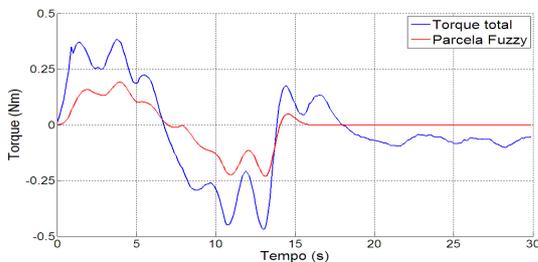


Figura 13. Torques dos atuadores (PD-Fuzzy com $\tau_{\min} = 0\%$).

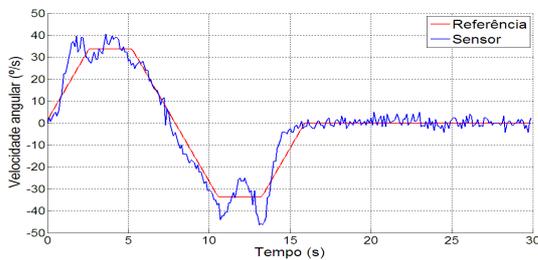


Figura 14. Velocidade angular (PD-Fuzzy com $\tau_{\min} = 5\%$).

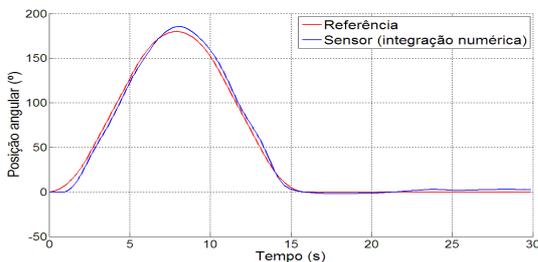


Figura 15. Posição angular (PD-Fuzzy com $\tau_{\min} = 5\%$).

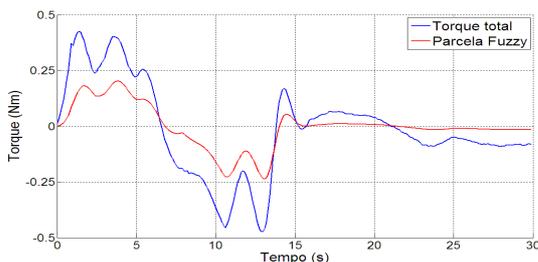


Figura 16. Torques dos atuadores (PD-Fuzzy com $\tau_{\min} = 5\%$).

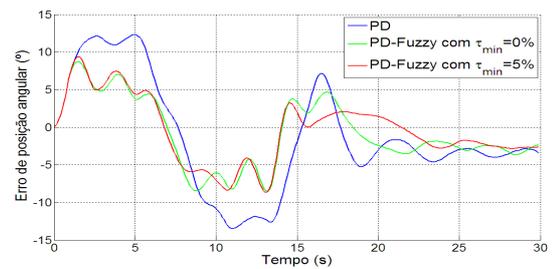


Figura 17. Sinais de erro de posição angular de cada controlador.

Cada experimento foi repetido seis vezes para certo tipo de controlador. A Tabela 1 apresenta os coeficientes de correlação entre os experimentos realizados com o controlador PD-Fuzzy com $\tau_{\min} = 0\%$. Conforme pode ser visto, o menor coeficiente é 0,9982, ou seja, o nível de repetição dos experimentos é muito bom, indicando que os demais sinais foram muito próximos aos apresentados nesse artigo. As comparações dos coeficientes de correlação dos controladores PD e PD-Fuzzy com $\tau_{\min} = 5\%$ também apresentaram bons resultados.

Tabela 1. Coeficientes de correlação (PD-Fuzzy com $\tau_{\min} = 0\%$).

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6
Exp. 1	1	0,9994	0,9987	0,9994	0,9997	0,9989
Exp. 2	0,9994	1	0,9995	0,9990	0,9997	0,9996
Exp. 3	0,9987	0,9995	1	0,9982	0,9991	0,9999
Exp. 4	0,9994	0,9990	0,9982	1	0,9991	0,9986
Exp. 5	0,9997	0,9997	0,9991	0,9991	1	0,9992
Exp. 6	0,9989	0,9996	0,9999	0,9986	0,9992	1

Para uma melhor visualização do desempenho dos controladores, utilizou-se o índice baseado na integral do valor absoluto do erro de posição angular, ou IAE (*Integral of the Absolute magnitude of the Error*) descrito em Dorf e Bishop (2001). Esse índice pode ser visto na Figura 18, onde estão representados os seis experimentos de cada um dos três tipos de controladores. Nessa figura, percebe-se que o controlador PD-Fuzzy com $\tau_{\min} = 5\%$ apresentou desempenho levemente superior ao controlador PD-Fuzzy com $\tau_{\min} = 0\%$, devido à contribuição em regime estacionário. No entanto, a diferença mais significativa de desempenho reside no seguimento de trajetória, durante a referência variável (até 16 segundos), entre o controlador clássico PD e o controlador PD-Fuzzy, ficando clara a melhora na qualidade do controlador devido à ação Fuzzy.

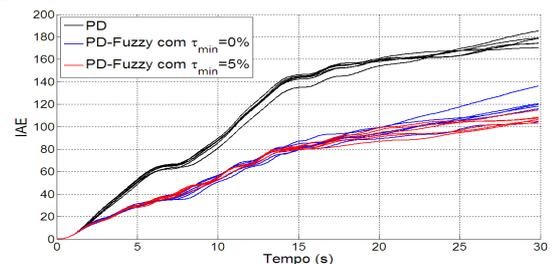


Figura 18. Integral do valor absoluto do erro de posição angular.

6 Conclusão

Neste artigo foram apresentados resultados da utilização de um algoritmo *Fuzzy* para o controle do ângulo de guinada de um ROV. Um sensor do tipo girômetro foi utilizado para observar a velocidade de rotação do ROV em torno do seu eixo vertical, gerando-se deste sinal a posição angular.

A principal proposta do presente artigo consiste na utilização de um controle do tipo proporcional e derivativo (PD), em conjunto com um algoritmo *Fuzzy* (PD-*Fuzzy*) para diminuir o erro em posição, durante o seguimento de uma trajetória de referência. Os resultados experimentais mostraram que o desempenho foi significativamente ampliado com a utilização do PD-*Fuzzy*, quando comparado apenas ao controle PD. A estratégia de limitação da contribuição *Fuzzy* em função da velocidade de referência foi fundamental para manter a estabilidade do sistema durante o seguimento de uma trajetória de referência constante.

É muito provável que um refinamento maior dos parâmetros poderia melhorar ainda mais o desempenho do PD-*Fuzzy*. Entretanto, o que se pode concluir com segurança é que o algoritmo proposto (PD-*Fuzzy*) tem uma implementação simples e com bom desempenho, configurando-se assim como uma interessante alternativa à utilização de uma componente integral que, em alguns casos, pode apresentar problemas de instabilidade, dependendo da forma implementada.

Trabalhos futuros envolvem o controle dos demais graus de liberdade do ROVFURG-II, através dos sinais provenientes do sensor de profundidade e do processamento das imagens capturadas pela câmera de vídeo embarcada. Para isso, serão instalados propulsores que permitam o veículo desenvolver movimentos laterais puros.

Referências Bibliográficas

- Aguilar, L. L. P. Controle Inteligente para a Navegação de Veículos Submarinos Semi-Autônomos. São Paulo, 2007. 159p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Al-Odienat, A. I., Al-Lawama, A. A. The advantages of PID Fuzzy Controllers over the Conventional Types. American Journal of Applied Sciences, 2008. Vol. 5, Ed. 6, p. 653-658.
- Analog Devices, Inc. ADXRS610 Datasheet. 2010. Disponível em: <<http://www.analog.com>>.
- Barros, E. A., Soares, F. J. A. Desenvolvimento de um Robô Submarino de Baixo Custo. Congresso Brasileiro de Automática, XIV, Natal, 2002. p. 2121-2126.
- Buscariollo, P. H. Sistema de Posicionamento Dinâmico Baseado em Visão Computacional e Laser. São Paulo, 2008. 145p. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Centeno, M. L. ROVFURG-II: Projeto e Construção de um Veículo Subaquático Não Tripulado de Baixo Custo. Rio Grande, 2007. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Fundação Universidade Federal de Rio Grande.
- Cox, E. Fuzzy Fundamentals. IEEE Spectrum, 2002. Vol. 29, No. 1, p. 58-61.
- Dantas, J. L. D.; Cruz, J. J. da; Barros, E. A. de. Controle Longitudinal do Veículo Autônomo Submarino Pirajuba, Utilizando Técnicas de Controle Robusto LQG/LTR. Congresso Brasileiro de Automática, XVIII, Bonito, 2010.
- Dorf R. C., Bishop R. H. Sistemas de Controle Modernos. 8ª Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2001.
- Gomes, S. da S. et al. Controle de um Veículo Subaquático Baseado em Estrutura Variável. Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, IV, Rio Grande, 2010.
- Kuhn, V. N. Desenvolvimento de um Sistema Microcontrolado para Implementação do Modo Teach em um Robô: Hardware e Software. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Automação Industrial), Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas, Pelotas.
- Luque, J. C. C. Controle Robusto Multivariável para um Veículo Submersível Autônomo. São Paulo, 2007. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Magalhães, P. H. V. Desenvolvimento de um Submersível Remotamente Operado de baixo Custo e Caracterização dos Sistemas de Propulsão e Vetorização de Empuxo por Hélice. Belo Horizonte, 2007. 178p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais.
- Moraes, C. E. ROVFURG-I: Projeto e Construção de um Veículo Subaquático Não Tripulado de Baixo Custo. Rio Grande, 2005. 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Fundação Universidade Federal de Rio Grande.
- Souza, E., Maruyama, N. An Investigation of Dynamic Positioning Strategies for Unmanned Underwater Vehicles. Congresso Brasileiro de Automática, XIV, Natal, 2002. p. 1273-1278.
- Stockwell, W. Angle Random Walk. Application Note. Crossbow Technologies Inc., 2003. p. 1-4 (<http://www.xbow.com>).
- Tavares, A. M. Um Estudo Sobre Modelagem e o Controle de Veículos Subaquáticos Não Tripulados. Rio Grande, 2003. 218p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Fundação Universidade Federal do Rio Grande.
- Weinberg, H. Application Note AN-1049: Calibrating iMEMS Gyroscopes. Analog Devices. 2009.
- Zadeh, L. A. Fuzzy Sets. Information and Control. 1965. Vol. 8, No. 3, p. 338-353.