

Controle Fuzzy Tipo-2 para um Sistema de Levitação Magnética

Ian da Silva Viganó* Fabio Meneghetti U. De Araujo**

* Departamento de Controle e Automação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, (e-mail: ians028@gmail.com).

** Departamento de Controle e Automação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, (e-mail: meneghet@dca.ufrn.br)

Abstract: Magnetic levitation has been successfully implemented, in the industrial domain, for many applications. We can mention, for example, high-speed train suspension in Japan and Germany, providing a great positive impact for society and contributing to the your well-being. On this basis, this work proposes to analyze the application of type-2 fuzzy control as a better alternative for control design for systems of this class, analyzing the positive characteristics of the application of this control technique in the face of type-1 fuzzy. The controllers were designed and tuned manually, in order to observe if the extra degree of freedom provided by the type-2 fuzzy technique presents a superior performance. The experimental results show that the type-2 fuzzy controller provides a superior performance to its type-1 counterpart in several respects. With this methodology the best features of the various classes of control systems can be combined to realize a more efficient and intelligent control scheme.

Resumo: A levitação magnética atrai muito interesse da comunidade acadêmica, atualmente, por possuir um grande potencial em apresentar tecnologias promissoras ao mercado, principalmente no setor de transporte de passageiros e cargas e na área industrial, gerando um grande impacto positivo para a sociedade e contribuindo para o seu bem-estar. Sob essa premissa este trabalho propõe analisar a aplicação do controle *fuzzy* do tipo-2 como uma melhor alternativa para a concepção de controladores para sistemas dessa classe, analisando as características positivas da aplicação desta técnica de controle em face da técnica *fuzzy* do tipo-1. Os controladores foram projetados e sintonizados manualmente, a fim de observar se o grau de liberdade extra provido pela técnica *fuzzy* tipo-2 apresenta uma performance superior. Os resultados experimentais mostram que o controlador *fuzzy* tipo-2 proporciona um desempenho superior a sua contraparte do tipo-1 em diversos aspectos. Com essa metodologia as melhores características das diversas classes dos sistemas de controle podem ser combinadas para a realização de um esquema de controle mais eficiente e inteligente.

Keywords: Non-linear control; Intelligent Control; Fuzzy control; Type-2 Interval Fuzzy Control; Magnetic Levitation.

Palavras-chaves: Controle não Linear; Controle Inteligente; Controle Fuzzy; Controle Fuzzy Intervalar do tipo-2; Levitação Magnética.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas cada vez mais complexos e de processos que requerem um controle mais sofisticado, e confiável, que se ajuste as características complexas provenientes desses sistemas, tem contribuído para o desenvolvimento de métodos de análise e de projeto de sistemas de controle mais rebuscados (Ogata, 2010).

Existem diversos métodos de controle na literatura, entre eles a técnica *fuzzy* tem sido bastante útil na implementação de sistemas de controle que levam em conta incertezas, aplicando-se a diversas situações do cotidiano, como por exemplo em problemas da engenharia de controle industrial, manufatura e sistemas de tomada de decisão. Entre as principais vantagens de utilizar uma técnica de controle

inteligente em relação às metodologias clássicas podemos citar: o maior grau de autonomia e a menor dependência de modelos quantitativos (Almeida et al., 2002).

Na literatura de controle *fuzzy*, controladores *fuzzy* PID (Proporcional-Integral-Derivativo) do tipo-1 (T1-FPID), que são os controladores *fuzzy* tradicionais, são comumente mencionados como uma alternativa para o controle PID, pois apresentam algumas características em comum com esses na maneira de relacionar as suas entradas e saídas, e com a vantagem de ser uma técnica de controle não linear com um maior grau de liberdade quando comparada ao método PID (Oh et al., 2011; Karnik et al., 1999).

Recentemente, pesquisas começaram a surgir para investigar uma variante do método *fuzzy* de controle, o *fuzzy* tipo-2, ou *fuzzy* intervalar (IT2-FPID) agrega conceitos da aritmética intervalar ao controle fuzzy, e têm demonstrado

*

melhorias significativas de desempenho de controle em comparação com tipo-1 (Wu and Tan, 2010; Wu, 2012). A técnica IT2-FPID tem seu valor pois, em determinados casos, controladores *fuzzy* tipo-1 podem não ser capazes de lidar totalmente os altos níveis de incertezas associados ao controle de certas aplicações, assim, faz-se necessário o uso de uma técnica capaz de lidar com tais incertezas, como a IT2-FPID, e produzir um melhor desempenho. Vários trabalhos mostraram que o controle *fuzzy* do tipo-2 fornece um melhor desempenho de controle por conta do grau adicional de liberdade provido pela região de incerteza, *footprint of uncertainty* (FOU), que é uma consequência da aplicação de funções intervalares para definir as respectivas funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* (Sakalli et al., 2014; Wu and Tan, 2010; Kumbasar et al., 2012).

O levitador magnético Quanser foi escolhido como sistema alvo por ser um sistema não linear e instável em malha aberta, tornando-o um sistema difícil de controlar com metodologias clássicas como o PID (Quanser, 2012). Além disso, os sistemas baseados no fenômeno da levitação magnética têm sido amplamente estudados, principalmente para o desenvolvimento de novos meios de transportes, cada vez mais sustentáveis e seguros, como exemplo tem-se a nova geração dos trens, o Maglev, de alta velocidade, que utilizam a levitação magnética para flutuar sobre suas vias.

Neste artigo, é proposto um controlador IT2-FPID para o sistema de levitação magnética da Quanser, este controlador é comparado com sua contraparte do tipo-1 a fim de validar sua superioridade em desempenho. Ambos os controladores serão analisados em tempo real na planta do levitador magnético e serão sintonizados manualmente. Dessa forma, pretende-se investigar se a técnica IT2-FPID é capaz de lidar melhor com um alto grau de incerteza em comparação com as demais técnicas, evidenciado, assim, a relevância, dessa técnica para a classe de sistemas de levitação magnética.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 apresenta o sistema de levitação magnética da Quanser, sua dinâmica e características, na Seção 3, o projeto de concepção dos controladores *fuzzy* é descrito, a Seção 4 apresenta os resultados da aplicação dos controladores na planta e as discussões pertinentes e por fim, na Seção 5, são feitas conclusões obtidas sobre a pesquisa.

2. LEVITADOR MAGNÉTICO QUANSER

O levitador magnético desenvolvido pela Quanser (MAGLEV) contém um eletroímã como atuador e dois sensores, um sensor de corrente na bobina e um sensor para medir distância da esfera à face do eletroímã. A Figura 1 mostra o esquemático do controlador.

A partir do esquemático da Figura 1 observa-se que o levitador magnético consiste em dois subsistemas. O primeiro relacionando a entrada do sistema, uma tensão $V_c(t)$, com a corrente elétrica $i_c(t)$ que vai para a bobina. O segundo subsistema define o modelo não linear da planta, relacionando a corrente de entrada na bobina com a posição da esfera em relação a sua face, no eixo vertical.

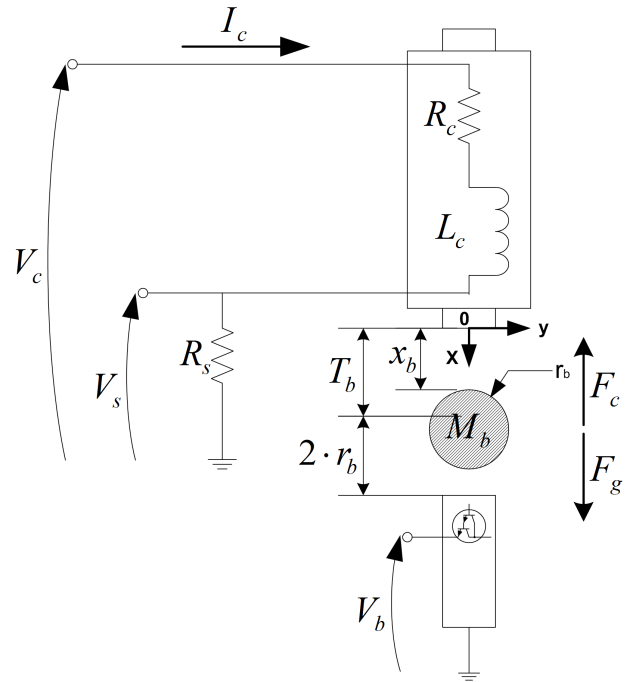


Figura 1. Diagrama esquemático do sistema. Retirado de (Quanser, 2012).

2.1 Equações elétricas do sistema

A Equação 1 representa a equação diferencial da dinâmica elétrica do sistema obtido por meio da lei das malhas de Kirchhoff (Alexander and Sadiku, 2013).

$$V_c(t) = (R_c + R_s) i_c(t) + L_c \frac{di_c(t)}{dt} \quad (1)$$

Em que $V_c(t)$ representa a tensão sobre a bobina no instante t , R_c a resistência interna da bobina, R_s a resistência do sensor de corrente, L_c a indutância da bobina e $i_c(t)$ a corrente da bobina no instante t .

A função de transferência do modelo elétrico é obtida transformando a Equação 1 para o domínio de Laplace, e a partir de sua manipulação é possível obter a função de transferência que representa o modelo elétrico do sistema, descrita por:

$$G(s) = \frac{1}{s \frac{L_c}{R_c + R_s} + 1} \quad (2)$$

em que R_c , R_s e L_c são valores constantes descritos no manual do fabricante da planta (Quanser, 2012).

2.2 Dinâmica não linear do sistema

O sistema propõe o controle da força resultante na esfera para que esta atinja a posição desejada, isto é.

$$F_{ext} = F_g - F_c \quad (3)$$

F_{ext} representa a somatório das forças atuantes no eixo vertical, F_c a força de atração eletromagnética exercida pela bobina e F_g a força gravitacional.

A partir da Figura 1, obtemos:

$$F_g = M_b g \quad (4)$$

$$F_c = K_m \frac{i_c^2(t)}{2x_b^2(t)} \quad (5)$$

em que M_b representa a massa da esfera, g a constante gravitacional na superfície da terra, $i_c(t)$ a corrente na bobina no instante t , K_m a constante da força eletromagnética e $x_b(t)$ a posição da esfera no instante t .

Substituindo as Equações 4 e 5 na Equação 3 e desenvolvendo obtém-se o modelo eletromecânico do sistema, dado pela Equação 6:

$$\frac{d^2 x_b(t)}{dt^2} = g - K_m \frac{i_c^2(t)}{2M_b x_b^2(t)} \quad (6)$$

Ambos os modelos descritos nas seções anteriores têm sumária importância pois é com base neles que os controladores serão projetados e sintonizados, inicialmente, através de um ambiente de simulação e posteriormente validados na planta física.

2.3 Esquema de controle em cascata para o MAGLEV

Como mencionado anteriormente, o MAGLEV é, na prática, a combinação dos subsistemas elétrico e eletromecânico. A planta tem como sinal de entrada uma corrente I_c , proveniente da dinâmica linear, que precisa ser devidamente controlada para seguir a referência gerada pelo controle de posição, dessa forma, um controlador PI será encarregado do controle do modelo elétrico. Na prática tem-se que o controle aplicado ao levitador magnético sempre segue o método de controle em cascata, como mostrado na Figura 2. Como o controle da corrente não representa nenhum desafio e não é o foco de projeto de controle seu projeto não será detalhado neste artigo, porém a Tabela 1 apresenta os valores dos ganhos obtidos para o controlador PI de corrente.

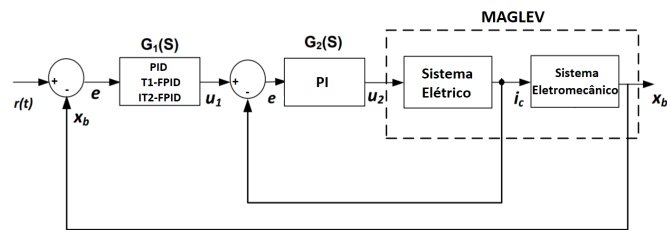


Figura 2. Esquema de controle em cascata.

Tabela 1. Ganhos do controlador PI.

Ganho	Valor	Unidade
K_{i_c}	219,9838	V/A
K_{p_c}	50.429,7331	V/s/A

3. PROJETO DOS CONTROLADORES FUZZY

Nessa seção são apresentadas a estrutura e a metodologia de projeto usadas para os controladores T1-FPID e IT2-FPID. Para ambos, as entradas escolhidas foram o erro (e),

a variação do erro (\dot{e}) e a variação da variação do erro (\ddot{e}). A Figura 3 ilustra o esquema de controle utilizado para os controladores T1-FPID e IT2-FPID.

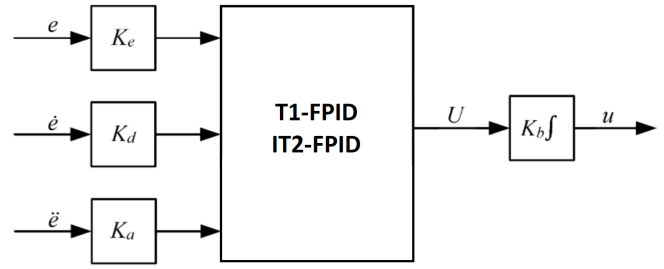


Figura 3. Estrutura do controle fuzzy.

A escolha por três variáveis de entrada se deu por conta das características do sistema, em específico sua sensibilidade a pequenas alterações na corrente da bobina. Inicialmente, tentou-se aplicar controladores menos complexos, com duas entradas, mas esses controladores não apresentaram o desempenho almejado em regime permanente.

3.1 Projeto do controlador T1-FPID

O controlador fuzzy do tipo-1 foi projetado em conformidade com os seguintes passos: definir as funções de pertinência para as variáveis de entrada, definir as saídas fuzzy e o método de Defuzzificação a ser usado, e por fim montar a base de regras.

Para cada variável de entrada foram definidas três funções de pertinência são elas: erro negativo (EN), erro zero (EZ) e erro positivo (EP), para e ; derivada do erro negativo (DEN), derivada do erro zero (DEZ), e derivada do erro positivo (DEP) para \dot{e} ; e aceleração do erro negativo (AEN), aceleração do erro zero (AEZ), e aceleração do erro positivo (AEP) para \ddot{e} . A Figura 4 mostra as funções de pertinência para e , \dot{e} e \ddot{e} .

A base de regras é composta por 27 regras do tipo: SE (e é A) E (\dot{e} é B) E (\ddot{e} é C) ENTÃO U é D .

Em que A , B e C são os valores das funções de pertinência correspondente as entradas, D é o valor crisp de saída e E representa o operador lógico AND que relaciona as entradas.

A base de regras do T1-FPID é vista na Tabelas 2, 3 e 4, bem como na Tabela 5 são relacionadas as funções de saída aos seus respectivos parâmetros.

Tabela 2. Regras para a função de pertinência erro negativo (EN).

	AEN	AEZ	AEP
DEN	P	P	PP
DEZ	PP	PP	NP
DEP	NMP	NP	N

O controlador fuzzy do tipo-1 proposto segue o modelo Takagi-Sugeno, em que as funções de saída fuzzy são funções lineares das entradas, contudo nesse caso específico o controlador assume a forma do modelo Takagi-Sugeno de ordem zero, em que suas funções de saída são parâmetros constantes, como visto na Tabela 5 (Takagi and Sugeno,

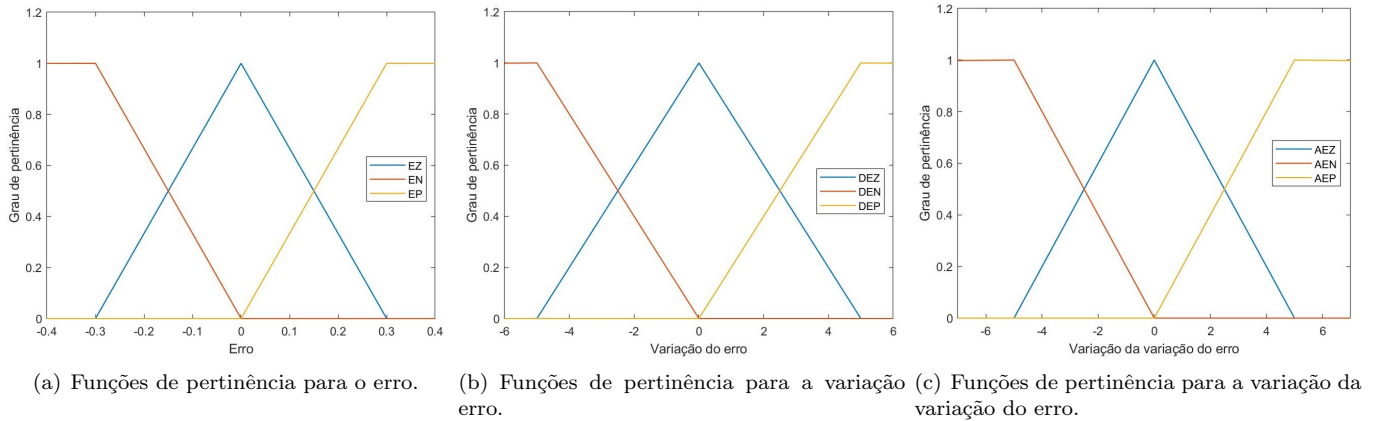


Figura 4. Funções de pertinência para o controlador T1-FPID.

Tabela 3. Regras para a função de pertinência erro zero (EZ).

	AEN	AEZ	AEP
DEN	PP	PMP	Z
DEZ	Z	Z	Z
DEP	Z	NMP	NP

Tabela 4. Regras para a função de pertinência erro positivo (EP).

	AEN	AEZ	AEP
DEN	PP	Z	Z
DEZ	NMP	NMP	NP
DEP	NMP	NP	N

Tabela 5. Valores dos consequentes das regras fuzzy.

MF _s	Parâmetro
N	-0,4
NP	-0,2
NMP	-0,1
Z	0
PMP	0,1
PP	0,2
P	0,4

1985). O método de Defuzzificação escolhido foi a média ponderada de todas as saídas.

3.2 Projeto do controlador IT2-FPID

Para o projeto do controlador IT2-FPID, a mesma base de regras, demonstrada nas Tabelas 2, 3 e 4, é usada. As variáveis de entrada são as mesmas (e , \dot{e} e \ddot{e}), contudo, agora, as funções de pertinência são funções intervalares, ou seja, compostas por duas funções fuzzy cada (função superior e inferior), assim, o controlador fuzzy de tipo-2 possui três funções de pertinência intervalares para cada variável de entrada. As Figuras 5, 6 e 7 apresentam as funções de pertinência, em termos da função inferior e superior, para e , \dot{e} e \ddot{e} respectivamente.

Modificar as funções de pertinência para serem definidas em termos de uma função superior e inferior gera um novo grau de liberdade ao controle, provido pela FOU, assim, a sintonia do controlador IT2-FPID, nesse caso, é feita ajustando os novos parâmetros (limite inferior e superior)

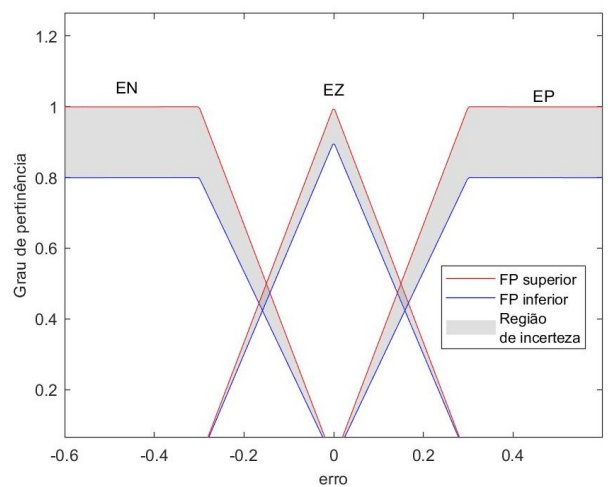


Figura 5. Funções de pertinência intervalares para o erro.

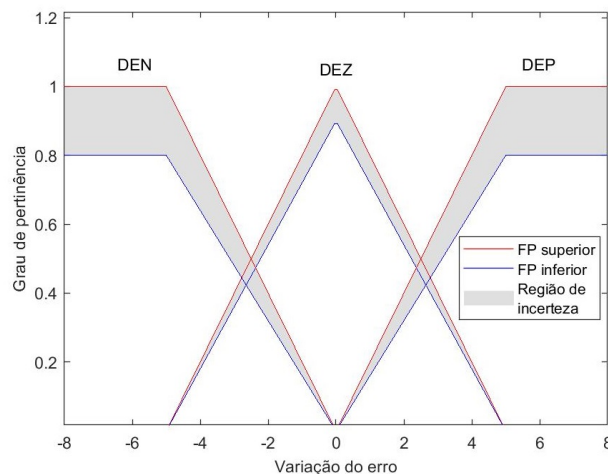


Figura 6. Funções de pertinência intervalares para a variação do erro.

das respectivas funções de pertinência e ajustar a FOU. Dessa forma, pretende-se evidenciar que com o ajuste do novo grau de liberdade provido pelo método intervalar é possível obter uma melhoria no desempenho do controle. O método de Defuzzificação/redução de tipo usado foi o

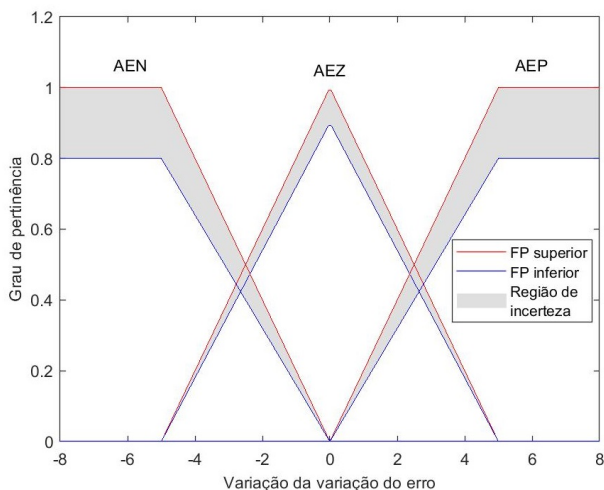


Figura 7. Funções de pertinência intervalares para a variação da variação do erro.

algoritmo *Enhanced iterative algorithm with stop condition* (EIASC) (Wu and Nie, 2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, os resultados obtidos com os controladores *fuzzy* do tipo-1 e 2 serão analisados e será comparando o *overshoot*, a integral absoluta do erro (IAE) e a integral do erro absoluto ponderada pelo tempo (ITAE) de cada controlador.

A bancada de teste em tempo real consiste em uma planta MAGLEV, um computador funcionando como sistema de controle e uma placa de aquisição de dados associada a um circuito de condicionamento de sinal. Um amplificador de potência é responsável por fornecer corrente ao eletroímã. O *software* de controle em tempo real da Quanser (QUARC) é usado para teste de *hardware* em *loop* (HIL).

Para examinar o desempenho dos controladores foi aplicado um sinal de referência variável à planta, iniciando ($t=0$) em 13 milímetros (mm), indo para 12 mm em $t=2$ segundos, e variando 2 mm a cada 2 segundos, ou seja variando entre 10 e 12 mm. Com esse sinal de referência é possível avaliar diversos pontos de controle, bem como o estado transitório entre eles.

4.1 Resultados obtidos com os controladores

As Figuras 8 e 9 apresentam os resultados obtidos com os controladores T1-FPID e IT2-FPID. Primeiramente, analisando a resposta transitória do sistema extrai-se que o *overshoot* inicial (quando a esfera sai do repouso para a posição de 13 mm) foi de 5,9%, para o controlador T1-FPID e de 3,5% para o controlador IT2-FPID, o que representa uma diferença de, aproximadamente, 40% entre os controladores nesse aspecto específico de desempenho. Observa-se, também, que o controlador IT2-FPID possui uma resposta significativamente menos oscilatória em comparação com o T1-FPID, em termos numéricos as oscilações registradas no controlador *fuzzy* intervalar são na faixa de 0,1 mm, em face da variação na faixa de 0,12 mm registradas no *fuzzy* tipo-1, tomando como base o ponto a partir da transição de referência para 12 mm.

Dessa forma, é possível afirmar que o sistema entra em regime permanente pois permanece dentro da faixa de 5% do valor do degrau aplicado a partir da transição de 13 mm para 12 mm.

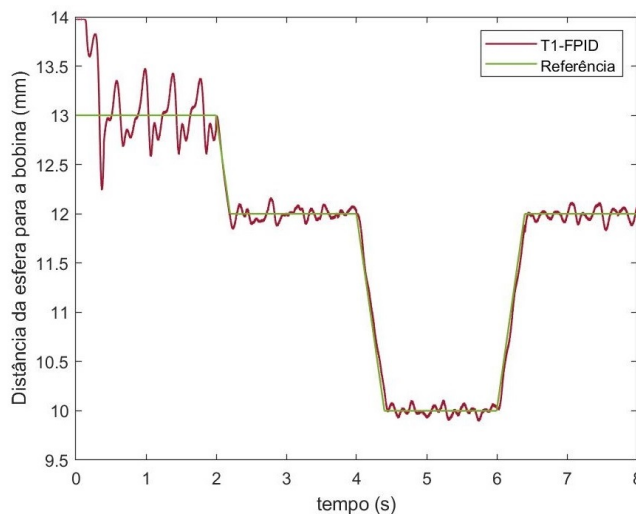


Figura 8. Resultados experimentais para o T1-FPID.

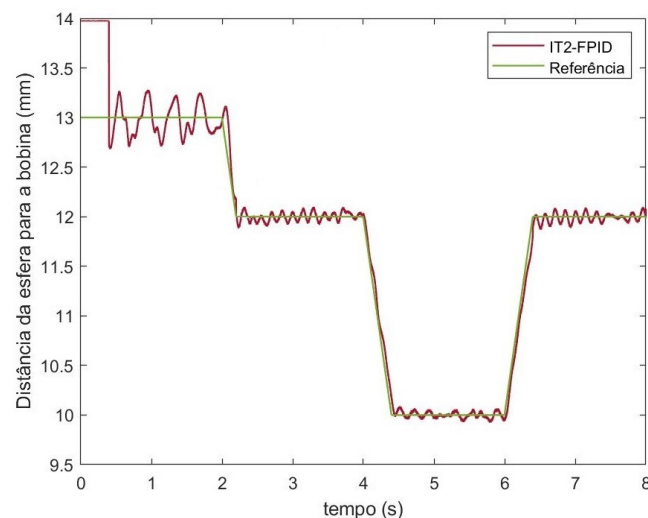


Figura 9. Resultados experimentais para o T2-FPID.

Para a referência de 13 mm ambos os controladores mostraram-se mais oscilatórios, tal comportamento se deve por conta de um degrau muito pequeno aplicado a esfera, fazendo-a permanecer muito próximo ao ponto de repouso, porém, após a elevação para 12 mm essa característica é eliminada e o sistema passa não ter um *overshoot*, contudo, permanece, de uma forma mais atenuada, a resposta oscilatória dentro dos parâmetros aceitáveis de oscilação, como visto nas transições de referência subsequentes.

A Figura 10 mostra o sinal de controle do T2-FPID, constatando que não há variações acentuadas de corrente, o que poderia inviabilizar a aplicação do controlador em questão. A variação no sinal de controle utilizado pelo controlador IT2-FPID é menor que T1-FPID, especificamente durante o regime permanente, evidenciado, assim, uma característica bastante desejável e vantajosa para a técnica *fuzzy* intervalar.

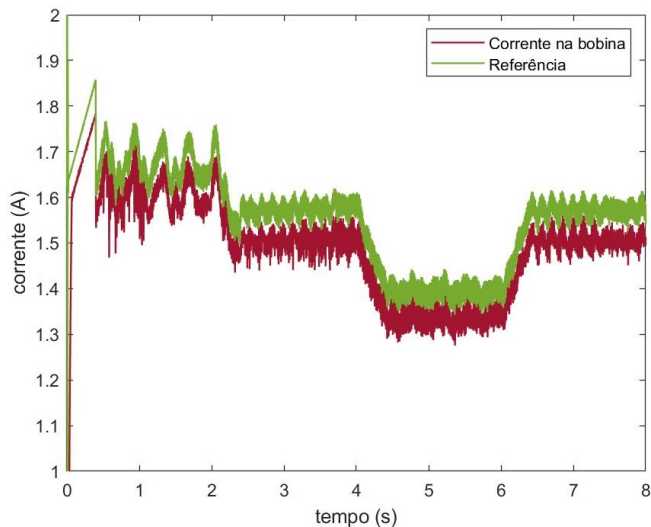


Figura 10. Sinal de controle para o T2-FPID.

As características evidenciadas com os experimentos dos controladores são plenamente aceitáveis dentro de um contexto prático, pensando na aplicação futura dessa modelo de controle nos sistemas de levitação magnética, principalmente nos trens que fazem uso dessa tecnologia, em que uma oscilação na casa dos poucos milímetros é plenamente aceitável na maioria dos projetos práticos.

4.2 Índices de desempenho para os controladores

Os índices de desempenho são uma maneira consagrada de avaliar o desempenho de controladores. Assim, foram obtidos a Integral Absoluta do Erro (IAE) e a Integral do Erro Absoluto ponderada pelo Tempo (ITAE) para os controladores *fuzzy* propostos. A Tabela 6 apresenta os valores dos índices IAE e ITAE para os controladores.

Tabela 6. Índices para os controladores.

Controlador	IAE	ITAE
T1-FPID	1,821	0,977
IT2-FPID	1,297	0,659

Assim, pode-se concluir que o controlador que possui um grau extra de liberdade (IT2-FPID) apresenta melhores respostas, transitórias e gerais, de atuação. Além disso, o grau de liberdade extra (FOU) do IT2-FPID fornece ao projeto do controlador uma maior gama de opções no momento da concepção do controlador, seja manualmente ou utilizando algum algoritmo específico.

5. CONCLUSÃO

Nesse artigo o desempenho de duas metodologias de controle, o *fuzzy* PID do tipo-1 e o *fuzzy* PID do tipo-2, em um sistema de levitação magnética, foram analisados e comparados entre si. Os resultados mostram o potencial da técnica IT2-FPID para aplicações práticas nessa classe de sistemas, pois muitos sistemas aceitam uma pequena margem de oscilação no regime permanente, como é o caso dos trens que atuam através da levitação magnética, contudo levando em conta que os controladores projetados foram sintonizados manualmente, há espaço para melhorias futuras, como a implementação de um algoritmo de otimização

para os controladores. As possibilidades são diversas, e um estudo comparativo de técnicas de otimização para os controladores *fuzzy* propostos poderá incrementar ainda mais o rol de evidências das vantagens da técnica *fuzzy* do tipo-2.

REFERÊNCIAS

- Alexander, C.K. and Sadiku, M.N. (2013). *Fundamentos de circuitos elétricos*. AMGH Editora.
- Almeida, O.d.M. et al. (2002). *Controle PID auto-ajustável, inteligente e preditivo*. Ph.D. thesis.
- Karnik, N.N., Mendel, J.M., and Liang, Q. (1999). Type-2 fuzzy logic systems. *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, 7(6), 643–658.
- Kumbasar, T., Eksin, I., Guzelkaya, M., and Yesil, E. (2012). Type-2 fuzzy model based controller design for neutralization processes. *ISA transactions*, 51(2), 277–287.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno*. São Paulo: Pearson, 5 edition.
- Oh, S.K., Jang, H.J., and Pedrycz, W. (2011). A comparative experimental study of type-1/type-2 fuzzy cascade controller based on genetic algorithms and particle swarm optimization. *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11217–11229.
- Quanser (2012). *Magnetic Levitation Experiment [User Manual]*. Quanser Inc., Markham, Ontario, Canada.
- Sakalli, A., Kumbasar, T., Yesil, E., and Hagraş, H. (2014). Analysis of the performances of type-1, self-tuning type-1 and interval type-2 fuzzy pid controllers on the magnetic levitation system. In *2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, 1859–1866. IEEE.
- Takagi, T. and Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (1), 116–132.
- Wu, D. (2012). On the fundamental differences between interval type-2 and type-1 fuzzy logic controllers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 20(5), 832–848.
- Wu, D. and Nie, M. (2011). Comparison and practical implementation of type-reduction algorithms for type-2 fuzzy sets and systems. In *2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2011)*, 2131–2138. IEEE.
- Wu, D. and Tan, W.W. (2010). Interval type-2 fuzzy pi controllers: Why they are more robust. In *2010 IEEE International Conference on Granular Computing*, 802–807. IEEE.