

CONTROLE NÃO-LINEAR DE DISPOSITIVOS ACIONADOS POR FIOS DE LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA

MARCELO FRANCISCO MAESTÁ*, GUSTAVO LUIZ C. M. DE ABREU*, VICENTE LOPES JR.* ,
CARLOS DE MARQUI JUNIOR†

* *Universidade Estadual Paulista - UNESP*
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Brasil, 56, Centro, Ilha Solteira-SP, Brasil

† *Universidade de São Paulo - USP*
Departamento de Engenharia Aeronáutica, São Carlos-SP, Brasil

Email: mfmaesta@gmail.com, gustavo@dem.feis.unesp.br, vicente@dem.feis.unesp.br,
demarqui@sc.usp.br

Abstract— Shape memory alloys (SMAs) are metal alloys capable of converting thermal energy into mechanical energy, and once deformed permanently, such materials can return to their original shape through the heat. This paper aims to evaluate the performance of nonlinear switching controllers to position control of two devices: an actuator and an adaptive airfoil built in wind tunnel. The use of switching controllers is due to the intrinsic nonlinear behavior of SMAs.

Keywords— Shape memory alloy (SMA), SMA wires, nonlinear controllers, switching controller.

Resumo— Ligas de memória de forma (LMF) são ligas metálicas capazes de converter energia térmica em energia mecânica e, uma vez deformados permanentemente, estes materiais podem retornar às suas condições originais de forma através de seu aquecimento. Neste trabalho pretende-se avaliar o desempenho de controladores não-lineares do tipo liga-desliga para o controle de posição de dois dispositivos: um atuador e um aerofólio adaptativo construído em túnel de vento. O uso destes controladores é motivado principalmente pelo comportamento não-linear intrínseco das LMFs.

Palavras-chave— Liga de memória de forma (LMF), fios de LMF, controladores não-lineares, controlador liga-desliga.

1 Introdução

As ligas com memória de forma (LMF) são ligas metálicas especiais que possuem a propriedade de serem termicamente ativas, retornando ao seu estado original quando aquecidas. Esta característica é conhecida como "efeito memória". Em baixas temperaturas, o material apresenta um comportamento semelhante a plástico, com maior facilidade de deformação. Aquecendo-se a LMF até uma determinada temperatura, ocorre uma mudança de fase na estrutura cristalina do material, transformando em uma estrutura com limite elástico elevado. Com isso, uma grande porção da tensão aplicada na liga é recuperada, ocorrendo assim uma contração (Wu e Schetky, 2000; Romano e Tannuri, 2009).

O desenvolvimento de atuadores com as LMFs apresenta grandes atrativos para diversos campos da engenharia, principalmente na área de robótica (Ashrafiun et al., 2006), substituindo os atuadores convencionais de grande peso e ruidosos, como motores e válvula solenoides. Os atuadores baseados em LMF possuem a maior relação de carga útil por peso do atuador em relação aos atuadores convencionais. Entretanto, em alguns casos práticos, o desempenho dinâmico dos atuadores com LMF é considerado insuficiente devido ao elevado tempo de resposta. Para a LMF operar rapidamente, deve-se aquecê-la para haver a contração

e resfriá-la na recuperação. O aquecimento é um processo simples e rápido, podendo ser feito com a passagem de corrente elétrica pelo fio de LMF. Já o resfriamento pode ser realizado mediante a instalação de um sistema de dissipação de calor forçada (Romano e Tannuri, 2009).

A principal motivação está no fato de tais ligas poderem ser empregadas em robôs, naves espaciais, satélites, aviões, entre outros e principalmente na medicina como próteses e substituindo músculos danificados (Wu e Schetky, 2000). Atualmente, diversas pesquisas têm sido realizadas objetivando melhorar a resposta dinâmica dos atuadores de LMF (Romano e Tannuri, 2009). Encontra-se relatado na literatura um número expressivo de trabalhos de pesquisa realizados nos últimos anos, enfocando o uso de atuadores de LMF (Romano e Tannuri, 2009; Kannan et al., 2013; Abreu et al., 2014), fato que comprova a relevância científica e tecnológica do assunto.

Neste trabalho é apresentado uma metodologia de controle de dispositivos acionados por fios de LMF. Devido a presença de efeitos não-lineares, principalmente no modelo matemático da LMF (Abreu et al., 2014), este trabalho objetiva aplicar controladores do tipo liga-desliga no controle de posição de dois dispositivos: um atuador e um aerofólio adaptativo construído em túnel de vento.

2 Atuador de Liga de Memória de Forma

Para avaliar o desempenho de controladores não lineares do tipo liga-desliga, inicialmente foi construído um atuador de fio de LMF (veja Fig. 1) de 0.5 mm de diâmetro, com comprimentos inicial de 230 mm e final de aproximadamente 237 mm (*Memry Corporation*).

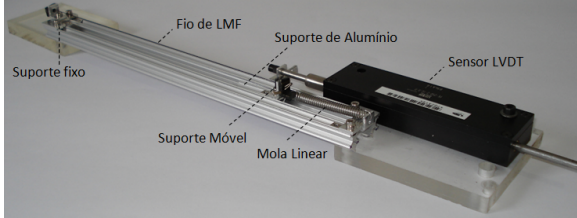


Figura 1: Atuador de LMF construído.

No protótipo construído (Fig. 1), o fio de LMF (fabricante *Nitinol*) está fixado em uma extremidade no suporte fixo da estrutura de alumínio, por intermédio de um conector elétrico.

Sua outra extremidade é fixada em um outro suporte preso a um pequeno dispositivo de alumínio (suporte móvel) que se desloca linearmente ao longo de uma guia linear. Uma mola é conectada a este dispositivo com o intuito de promover o estiramento da liga. O sistema de medida é feito por um sensor de posição (modelo PE-250-2-IE-S-D da *US Digital*) conectado a um suporte preso ao dispositivo móvel.

O objetivo deste experimento é controlar a posição do dispositivo móvel utilizando controladores não-lineares do tipo liga-desliga.

2.1 Controle Liga-Desliga

Os fios de LMF por possuírem um comportamento fortemente não linear, necessitam da aplicação de um controlador de mesma natureza (Elahinia, 2004). De todos os controladores não-lineares existentes, o controle liga-desliga é o mais simples e mais comumente utilizado (Slotine e Li, 1991), principalmente em aparelhos domésticos e industriais diversos como: ar condicionados, refrigeradores, entre outros.

O seu funcionamento se baseia na comparação entre o valor de entrada (referência) e o valor de saída da planta. Para o caso de ligas de memória de forma, quando o valor de saída é maior que o valor de referência, o controlador é desligado, caso contrário o controlador é acionado.

Assim, neste trabalho, a entrada de controle u foi implementada como segue:

$$u = \begin{cases} V_{\max} & \text{se } e > 0 \\ V_{\min} & \text{se } e < 0 \end{cases} \quad (1)$$

onde $e = r - x$ é o erro entre a referência (r) e a posição (x) do atuador de LMF e $V_{\max}$ e $V_{\min}$ são,

respectivamente, as tensões elétricas (em *Volts*) máximas e mínimas aplicadas na fonte de corrente controlável.

A Figura 2 ilustra o sistema de controle liga-desliga implementado em *Simulink*[®], utilizando a plataforma da *Quanser*[®].

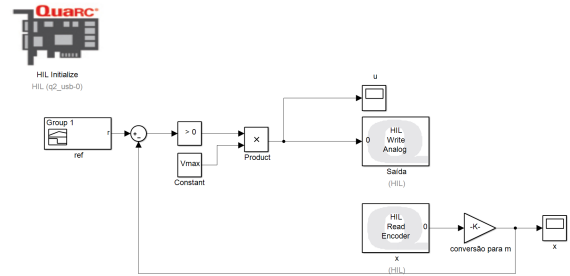


Figura 2: Diagrama de blocos do sistema de controle liga-desliga implementado em *Simulink*[®].

Segundo (Utkin, 1992), quando se utiliza este tipo de controlador, pode ocorrer o efeito indesejável de oscilações causadas pelo chaveamento (*chattering*) em torno do sinal de referência. Este efeito é indesejável pois, além de não se obter uma boa precisão no sistema controle, ocasiona-se um desgaste prematuro do atuador e portanto não é recomendado para ser aplicado em sistemas mecânicos (Utkin, 1992).

2.2 Controle Liga-Desliga Suavizado

Uma maneira de suprimir as oscilações causadas pelo chaveamento do controlador liga-desliga, uma camada limite, de espessura ϕ , é inserida em torno do erro de posição e . Assim, definindo uma espessura ϕ , a entrada u do controlador liga-desliga pode ser reescrita como (Utkin, 1992):

$$u = \begin{cases} V_{\max} & \text{se } e > \phi \\ V_{\min} & \text{se } e < -\phi \\ ke & \text{se } 0 < e < \phi \end{cases} \quad (2)$$

onde $k = \frac{V_{\max}}{\phi}$ é um ganho proporcional e ϕ é a espessura da camada limite.

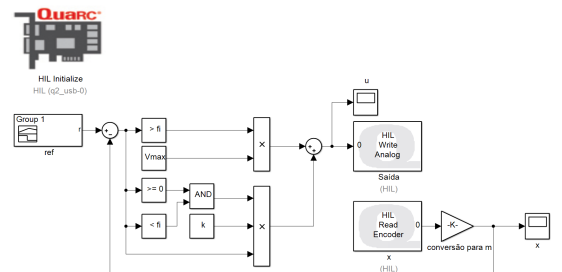


Figura 3: Diagrama de blocos do sistema de controle liga-desliga suavizado construído em ambiente *Simulink*[®].

A Figura 3 ilustra o sistema de controle liga-desliga suavizado construído no *Simulink*[®].

Em todos os ensaios realizados, foram considerados como parâmetros dos controladores os seguintes valores: $V_{\max} = 4 \text{ V}$, $V_{\min} = 0 \text{ V}$ e $\phi = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$.

2.3 Resultados Experimentais

O primeiro teste foi realizado utilizando como referência uma função do tipo onda quadrada. Os resultados comparativos são apresentados pelas Figs. 4 e 5.

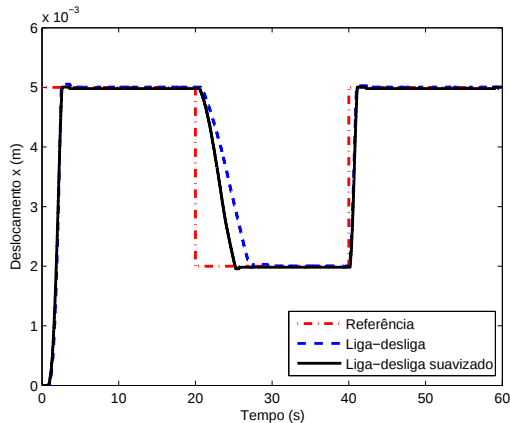


Figura 4: Deslocamento real do atuador de LMF para uma referência do tipo onda quadrada.

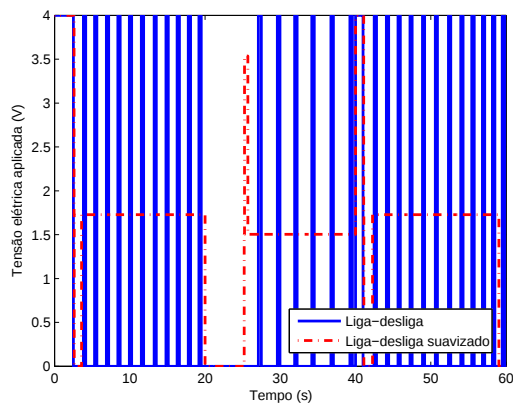


Figura 5: Tensão elétrica aplicada para uma referência do tipo onda quadrada.

Observa-se pelas figuras precedentes que os controladores testados apresentaram bons resultados em termos de acompanhamento de referência do tipo onda quadrada. Além disso, a versão suavizada do controlador apresentou um gasto de energia menor (veja Fig. 5) e proporcionou ao fio de LMF um aquecimento menor e consequentemente uma taxa de resfriamento maior na faixa de 20 a 30 s (veja Fig. 4), garantindo com isso maior eficiência em termos de acompanhamento de referência.

As figuras apresentadas a seguir ilustram o comportamento transitório do deslocamento real

do atuador e da tensão elétrica aplicada, considerando uma referência senoidal com frequência de 0.03 Hz.

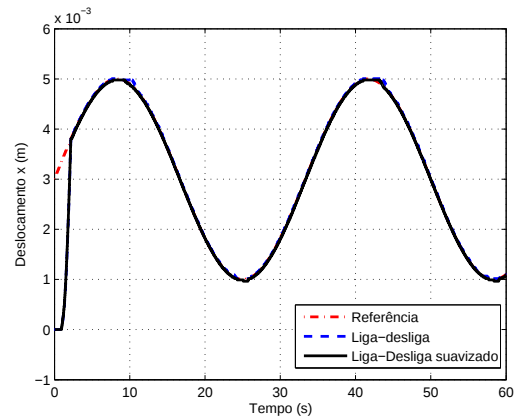


Figura 6: Deslocamento real do atuador de LMF para uma referência do tipo senoidal.

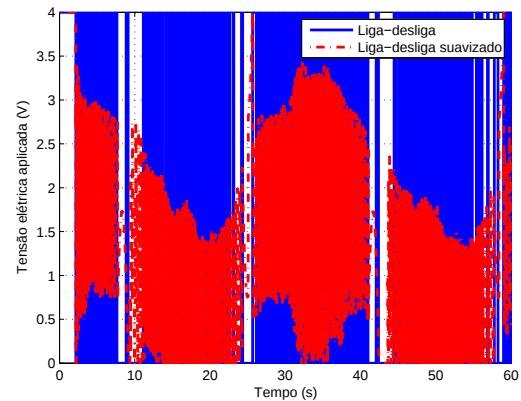


Figura 7: Tensão elétrica aplicada para uma referência do tipo senoidal.

A partir da análise da Fig. 6, nota-se que, em termos de acompanhamento de referência, o controlador suavizado apresentou ligeiramente melhores resultados. O mesmo ocorreu em relação ao gasto de energia de controle (veja Fig. 7).

3 Aerofólio Construído em Túnel de Vento

Um aerofólio de 200mm de corda e 200mm de *Span* com uma seção de controle localizada a 50% da corda foi construído em túnel de vento para avaliar a eficiência dos controladores não-lineares propostos.

No modelo construído da Fig. 8, deseja-se estabelecer uma forma para o perfil aerodinâmico a partir da determinação de um ângulo entre a parte móvel do aerofólio. Este ângulo é atingido pelo efeito de memória de forma da liga através da passagem de uma corrente elétrica.

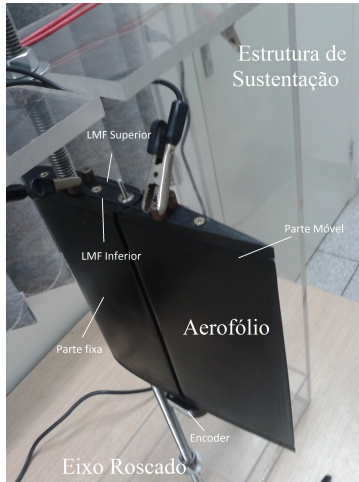


Figura 8: Bancada experimental do aerofólio.

A leitura do ângulo da parte móvel aerofólio é feita através do *encoder* incremental da *US Digital* (modelo E2-1250-118-IE-D-D-B) de 1250 pulsos por revolução.

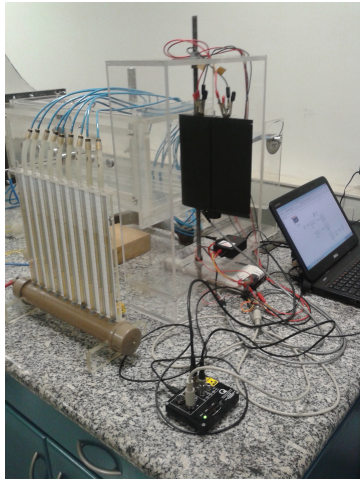


Figura 9: Bancada experimental do aerofólio posicionado em túnel de vento.

Para o teste aerodinâmico, o aerofólio foi instalado no túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UNESP de Ilha Solteira, como mostra a Fig. 9. A dimensão de saída do túnel é de 200 mm de altura e 200 mm de largura e a velocidade de escoamento máxima é de aproximadamente 25 $\frac{m}{s}$. O sistema de medida da velocidade de escoamento foi realizado através de um manômetro inclinado a 25°.

Os testes do aerofólio em túnel de vento foram executados considerando quatro velocidades distintas para o escoamento, a saber: 8.03, 14.9, 18.93 e 21.08 $\frac{m}{s}$. Para garantir uma mesma velocidade de escoamento, a temperatura ambiente (26°C) foi monitorada utilizando um termômetro analógico.

Para o controle ativo da posição angular do aerofólio foi estabelecido uma faixa útil de traba-

lho (de 0 à 8°), faixa esta onde o aerofólio é capaz de atingir o ângulo desejado com a atuação dos fios de LMF.

3.1 Controle Angular Ativo

Neste trabalho, o controlador liga-desliga foi implementado da seguinte forma (veja Seção 2.1):

Para o fio de LMF SUPERIOR:

$$u = \begin{cases} V_{\max} & \text{se } e > 0 \\ V_{\min} & \text{se } e < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Para o fio de LMF INFERIOR:

$$u = \begin{cases} V_{\min} & \text{se } e > 0 \\ V_{\max} & \text{se } e < 0 \end{cases} \quad (4)$$

onde $e = r - \theta$ é o erro entre a referência (r) e a posição angular (θ) da parte móvel do aerofólio e $V_{\max} = 4$ e $V_{\min} = 0$ são as tensões elétricas máximas e mínimas aplicadas nos fios de LMF.

A Figura 10 mostra o sistema de controle liga-desliga implementado no Simulink®, utilizando a plataforma da Quanser®.

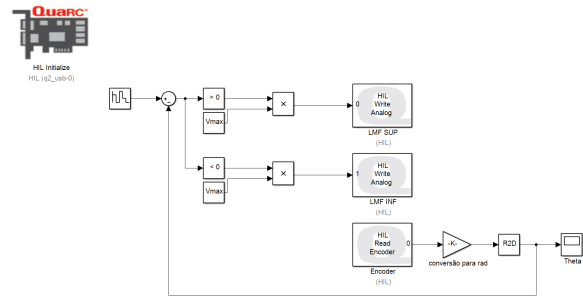


Figura 10: Sistema de controle liga-desliga implementado no Simulink® para o aerofólio adaptativo.

Já para a versão suavizada do controlador (veja Seção 2.2), a sua implementação é realizada da seguinte forma:

Para o fio de LMF SUPERIOR:

$$u = \begin{cases} V_{\max} & \text{se } e > \phi \\ V_{\min} & \text{se } e < -\phi \\ ke & \text{se } 0 < e < \phi \end{cases} \quad (5)$$

Para o fio de LMF INFERIOR:

$$u = \begin{cases} V_{\min} & \text{se } e > \phi \\ V_{\max} & \text{se } e < -\phi \\ k|e| & \text{se } -\phi < e < 0 \end{cases} \quad (6)$$

onde $k = \frac{V_{\max}}{\phi}$ é um ganho proporcional e ϕ é a espessura da camada limite.

A Figura 11 ilustra o sistema de controle liga-desliga suavizado construído no *Simulink*®, utilizando a plataforma da *Quanser*®.

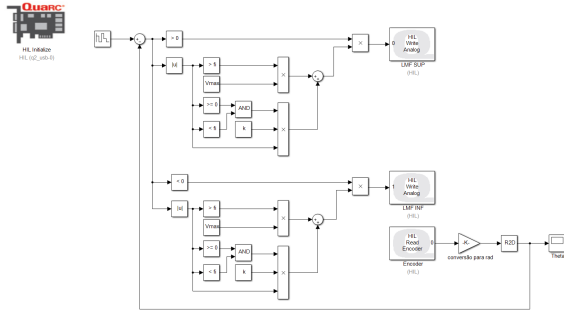


Figura 11: Sistema de controle liga-desliga suavizado em ambiente *Simulink*® para o aerofólio adaptativo.

3.2 Resultados Experimentais

Em todos os ensaios realizados, foram considerados como parâmetros dos controladores os seguintes valores: $V_{\max} = 4 \text{ V}$, $V_{\min} = 0 \text{ V}$ e $\phi = 0.15^\circ$.

A Figura 12 mostra a comparação entre os controladores aplicados no aerofólio adaptativo para uma velocidade de escoamento de $0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

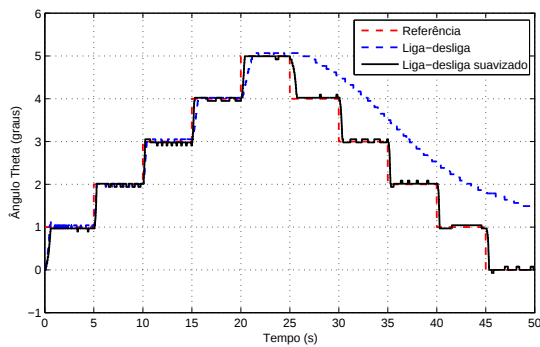


Figura 12: Desempenho dos controladores aplicados para uma velocidade de escoamento de $0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Note que o controlador liga-desliga suavizado apresentou um desempenho melhor na fase ascendente do ângulo do aerofólio e um desempenho muito superior na fase descendente. Esta diferença ocorre devido a energia utilizada no aquecimento dos fios de LMF, como mostram as Figs. 13 e 14.

Como na versão suavizada o controlador utiliza menos energia no aquecimento dos fios de LMF, isto permite que os fios resfriem mais rapidamente, o que gera efetivamente numa diminuição considerável nas forças de restituição dos fios de LMF.

A Figura 15 ilustra a comparação entre os controladores aplicados para uma velocidade de escoamento de $8.03 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Observa-se que o controlador liga-desliga apresenta uma melhora significativa em termos de acompanhamento da referência. Tal melhoria deve-se ao resfriamento forçado provocado pela velocidade de escoamento no túnel.

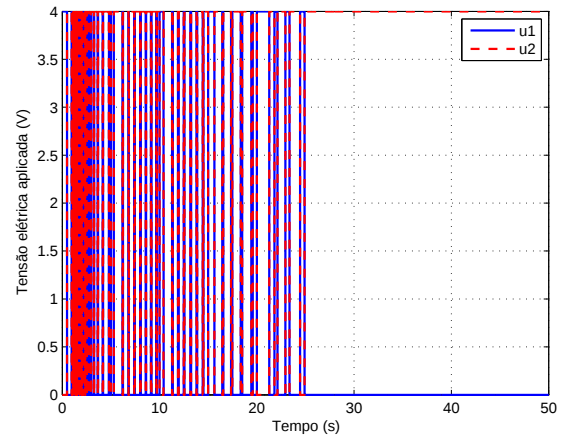


Figura 13: Tensão elétrica de saída do controlador liga-desliga para uma velocidade de escoamento de $0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

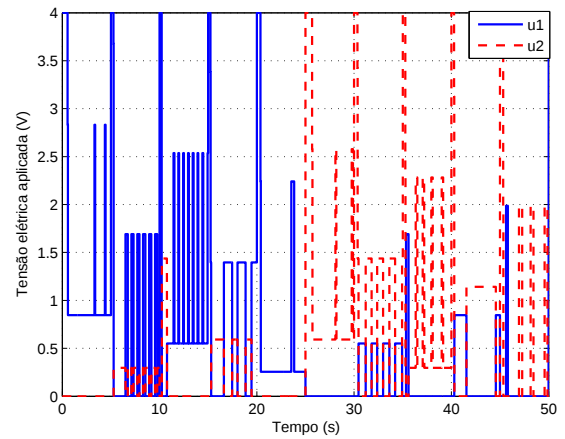


Figura 14: Tensão elétrica de saída do controlador liga-desliga suavizado para uma velocidade de escoamento de $0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

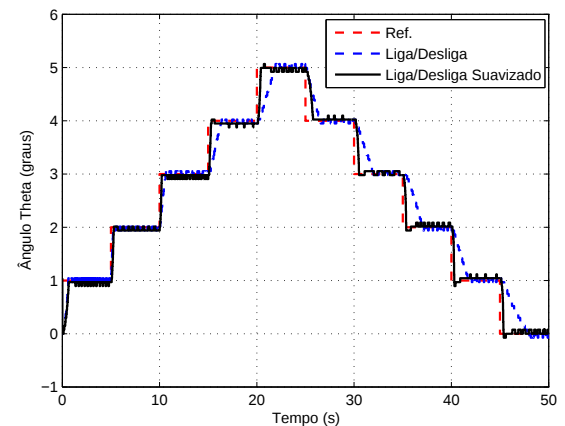


Figura 15: Desempenho dos controladores para uma velocidade de escoamento de $8.03 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

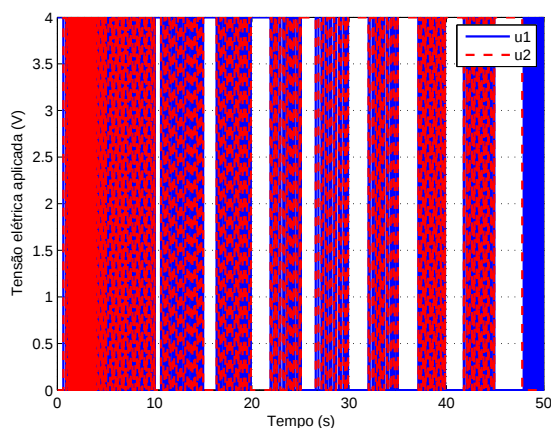


Figura 16: Tensão elétrica de saída do controlador liga-desliga para uma velocidade de escoamento de $8.03 \frac{m}{s}$.

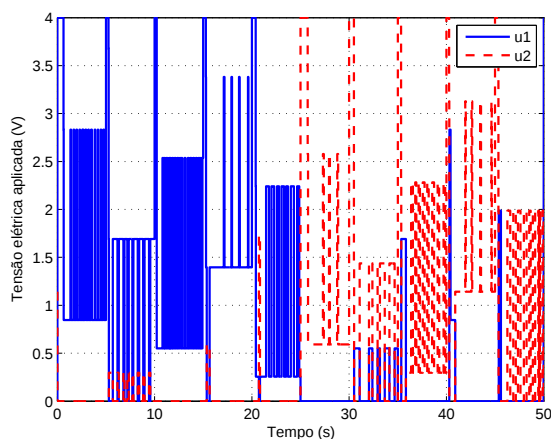


Figura 17: Tensão elétrica de saída do controlador liga-desliga suavizado para uma velocidade de escoamento de $8.03 \frac{m}{s}$.

Assim como ficou constatado nos ensaios realizados para o atuador de LMF (veja Seção 2.3), a versão suavizada do controlador apresentou um gasto de energia menor (veja Fig. 17) e proporcionou aos fios de LMF um aquecimento menor e consequentemente uma taxa de resfriamento maior.

Vale ressaltar que em todos os outros casos estudados (velocidades de escoamento de 14.9, 18.93 e $21.08 \frac{m}{s}$), os resultados foram similares à última situação aqui descrita.

4 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para o controle de posição de dois dispositivos acionados por fios de liga de memória de forma (LMF): um atuador e um aerofólio construído em túnel de vento.

Um conjunto de ensaios em laboratório foi realizado a fim de avaliar o desempenho de controla-

dores do tipo liga-desliga. Verificou-se, entretanto, que a versão suavizada do controlador apresentou melhores resultados em termos de acompanhamento de referência e gasto energético de controle.

Agradecimentos

Os autores agradecem à *FAPESP* pelo auxílio financeiro concedido.

Referências

- Abreu, G. L. C. M., Maesta, M. F., Lopes, V., DeMarqui, C., Faria, C. T. e Inman, D. J. (2014). Active angular control of a sectioned airfoil using shape memory alloys and fuzzy controller, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* **1**: 1–13.
- Ashrafioun, H., Eshraghi, M. e Elahinia, M. H. (2006). Position control of a three-link shape memory alloy actuated robot, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **17**: 381–392.
- Elahinia, M. H. (2004). *Effect of system dynamics on shape memory alloy behavior and control*, PhD thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and University.
- Kannan, S., Giraud-Audine, C. G. e Patoor, E. (2013). Application of laguerre based adaptive predictive control to shape memory alloy (sma) actuator, *ISA Transactions* **4**: 469–479.
- Romano, R. e Tannuri, E. (2009). Modeling, control and experimental validation of a novel actuator based on shape memory alloys, *Mechatronics* **19**: 1169–1177.
- Slotine, J. J. E. e Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall.
- Utkin, V. I. (1992). *Sliding Modes in Control and Optimization*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Wu, M. H. e Schetky, L. M. (2000). Industrial applications for shape memory alloys, *International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, Pacific Groove, California, pp. 171–182.