

# MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO DA DEFORMAÇÃO DE UMA VIGA ENGASTADA ATUADA POR MEIO DE UM FIO COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA

ANDREI H. PATRIOTA CAMPOS\*, EISENHAWER DE M. FERNANDES†, JAIDILSON J. DA SILVA\*, JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO\*

\**R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário  
Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle, Departamento de Engenharia Elétrica,  
Universidade Federal de Campina Grande  
Campina Grande, Paraíba, Brasil*

†*R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário  
Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande  
Campina Grande, Paraíba, Brasil*

Emails: andrei.campos@ee.ufcg.edu.br, eisenhaver@ee.ufcg.edu.br,  
jaidilson@dee.ufcg.edu.br, zesergio@dee.ufcg.edu.br

**Abstract**— Shape Memory Alloy based actuators have been used in a wide variety of applications along the past decades. In fact, due to their good force to mass ratio, along with their shape recovery capability, even after being subjected to relatively high mechanical stresses, this kind of material has been employed in applications that range from biomedical engineering to robotic joints, and they are always associated with smooth and quit displacements. Besides, when it comes to linear displacements actuation, shape memory alloy actuators surpass even conventional electrical machines in many aspects. However, even with all the benefits associated with these materials, position control is quite challenging, due mainly because the difficulties in estimating their parameters, which are time varying. With all that being said, the present paper aims to investigate the model of a plant made of a cantilever beam, whose fixed end's deformation can be measured, actuated by means a shape memory alloy wire, which will be used to establish a closed-loop control of the beam's deformation.

**Keywords**— Shape Memory Alloy, Control Theory, System Modeling, System Identification, Deformation Measurement.

**Resumo**— Atuadores baseados em Ligas com Efeito de Memória de Forma têm sido utilizados em uma grande variedade de aplicações ao longo das últimas décadas. De fato, devido a sua boa razão força por massa, aliada a sua capacidade de recuperação de forma, mesmo após a aplicação de carregamentos mecânicos relativamente elevados, estes materiais têm sido empregados em aplicações que vão desde a engenharia biomédica à articulações robóticas, sempre estado associados a deslocamentos suaves e silenciosos. Além do mais, em se tratando de atuação de deslocamento linear, os atuadores de liga com memória de forma superam até mesmo as máquinas elétricas convencionais em muitos aspectos. Entretanto, mesmo diante das facilidades proporcionadas por esses materiais, o controle de posição por meio dessa classe de atuadores é bastante desafiador, principalmente por conta da dificuldade que se tem em estimar seus parâmetros, os quais apresentam variância no tempo. Com isso em mente, o presente trabalho busca investigar o modelo de uma planta composta por uma viga engastada, cuja deformação na extremidade fixa pode-se medir, atuada por um fio de liga com memória de forma, o qual destina-se ao projeto de um sistema de controle em malha fechada para a deformação da viga.

**Palavras-chave**— Liga com Memória de Forma, Teoria de Controle, Modelagem de Sistemas, Identificação de Sistemas, Medição de Deformação.

## 1 Introdução

As Ligas com Memória de Forma (LMF) compõem uma classe de materiais que apresentam os efeitos de memória de forma e de super elasticidade. Estas características únicas conferem às LMFs propriedades bastante interessantes no que se refere a sua capacidade de deformação e de tensionamento, tornando-as apropriadas para aplicações de atuação nas quais se almeja obter grandes forças associadas à características de baixa frequência. Atualmente, 90% de todas as aplicações que fazem o uso de LMFs são baseadas na liga de Níquel-Titânio (NiTi), juntamente com suas variações, NiTi-Cu e NiTi-Nb (Elahinia, 2015) (Otsuka and Wayman, 1998).

A utilização de fios de de LMF como atu-

adores em estruturas flexíveis tem se popularizado bastante nos últimos anos, tendo como resultado imediato o surgimento de muitos estudos focados neste problema, como apresentado, por exemplo, por (Silva, 2007) e (Zakerzadeh and Sayyaadi, 2014), nos quais as formas de estruturas flexíveis são atuadas por meio de atuadores de LMF. De fato, em se tratando de aplicações onde necessitam-se de atuadores leves e silenciosos, as LMFs podem ser utilizados como uma opção aos motores DC e solenoides, visto que aquelas apresentam alta densidade de energia (Elahinia, 2015), o que significa que fios muito finos são capazes de realizar um trabalho relativamente alto.

O princípio de funcionamento de atuadores dos LMF consiste em aquecer, geralmente por efeito Joule, uma amostra do material acima de

uma determinada temperatura fazendo com que ocorra o efeito de recuperação de forma, mesmo este estando sujeito a um carregamento mecânico. A esse efeito é dado o nome de Efeito de Memória de Forma (EMF) (Lagoudas, 2008). O EMF é ocasionado pela existência de duas fases bem definidas das LMFs, as quais são determinadas por uma mudança na estrutura cristalina do material que ocorre com a variação da sua temperatura. Para baixas temperaturas, o material apresenta-se na fase *martensita*, na qual o material é flexível e pode ser deformado facilmente, enquanto que para temperaturas elevadas, a LMF experimenta a fase de *austenita*, na qual o material se torna muito rígido. Microscopicamente, a LMF apresenta uma estrutura cristalina cúbica quando na fase de austenita, enquanto que ela pode apresentar uma estrutura tetragonal ortorrômbica ou monolítica, quando na fase de martensita (Elahinia, 2015) (Lagoudas, 2008) (Rahman et al., 2008).

Apesar de suas vantagens com relação aos atuadores eletromecânicos convencionais, as LMFs apresentam um comportamento não-linear e histerético característico de sua mudança de fase com a temperatura, o que torna a sua utilização como atuadores para o controle preciso de posição não trivial (Pai et al., 2016). De fato, em aplicações onde se pressupõem deslocamentos ocasionados por LMFs muitas vezes prefere-se utilizar, por questões de simplicidade, o controle *on/off*, em virtude, principalmente, das dificuldades de modelar e controlar sua mudança de forma com a temperatura de maneira precisa (Abdelaal and Nagib, 2014).

Neste trabalho apresenta-se uma viga engastada cuja deformação da extremidade fixa, ocasionada pelo carregamento mecânico da extremidade livre, pode ser medida por meio de um par de extensômetros. Além do carregamento mecânico, atua sobre a extremidade livre da barra a força ocasionada por um fio de LMF, o qual é aquecido por efeito Joule quando uma tensão proveniente de um *driver* de potência é aplicada sobre o mesmo. A deformação experimentada pelos extensômetros, a tensão e a corrente do fio são adquiridos por meio de uma placa de aquisição de dados, sendo estes sinais apresentados e registrados para posterior análise por meio de um Instrumento Virtual (VI) implementado em LabVIEW. Neste contexto, objetiva-se implementar e validar um modelo matemático da planta composta pelo fio de LMF, o qual apresenta-se como um atuador, e pela viga engastada, a qual consiste no processo alvo, cuja deformação na extremidade fixa corresponde à variável do processo.

O restante do texto desenvolve-se da seguinte forma: na Seção 2, apresentam-se uma descrição da estrutura utilizada, bem como dos principais blocos que compõem o sistema em estudo; na Se-

ção 3, os modelos do atuador de LMF e da viga engastada são desenvolvidos, sendo os submodelos daquele analisados separadamente; na Seção 4, descreve-se o esforço de identificação realizado com o intuito de se desenvolver uma aproximação linear para a planta; na Seção 5 são apresentados os resultados de modelagem e identificação, sendo estes comparados com a resposta da planta; e por fim, na Seção 6, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## 2 Plataforma Experimental

A viga engastada, juntamente com sua estrutura de suporte são representadas na Figura 1. A viga tem uma extremidade fixada em uma coluna de suporte, e outra extremidade livre, à qual são aplicadas cargas mecânicas por meio de um conjunto de pesos de precisão. As extremidades do fio de NiTi são fixadas entre os pontos *A* e *B* mostrados na Figura 1, enquanto que um par de extensômetros encontram-se colados na viga próximos à extremidade fixada de forma complementar, de modo que estes experimentem deformações opostas, porém de igual intensidade, conforme ilustrado no esquema Figura 2.

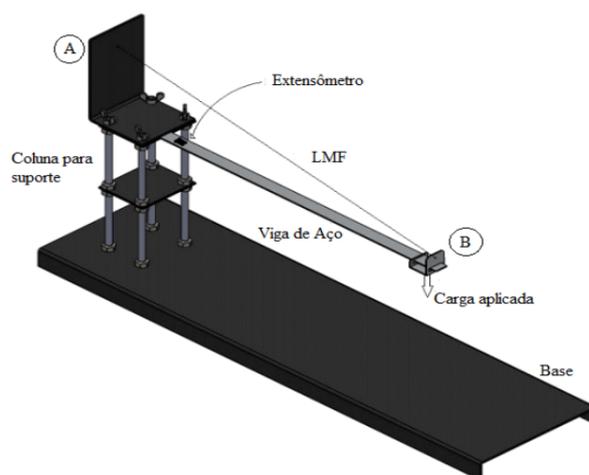


Figura 1: Representação da estrutura com a viga engastada.

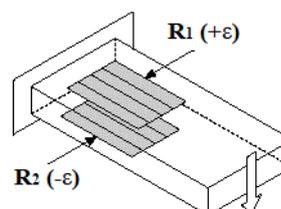


Figura 2: Ilustração do esquema de medição de deformação empregado na viga.

O sistema implementado é ilustrado pelo diagrama de blocos da Figura 3, no qual todos os

sinais e estágios de condicionamento são representados. Dessa forma, de acordo com a Figura 3, a deformação sofrida pelos extensômetros na extremidade fixa da viga ocasiona uma pequena variação na resistência destes, variação esta que é convertida em sinal de tensão por meio de uma meia ponte de Wheatstone. O sinal de tensão resultante é, então, filtrado e amplificado antes de ser adquirido por meio de uma placa de aquisição de dados.

O sinal de controle aplicado ao fio de LMF é do tipo PWM (*Pulse Width Modulation*) proveniente da placa de aquisição de dados. Este sinal, porém, é aplicado ao fio por meio de um *driver* de tensão, o qual fornece a potência necessária para garantir o aquecimento do material. Uma vez aquecido, o fio de LMF passa por uma recuperação de forma, resultando na aplicação de uma força vertical na extremidade livre da barra, a qual se opõe ao carregamento mecânico aplicado neste ponto. Por fim, a força resultante obtida neste processo ocasiona uma variação na deformação da extremidade engastada.



Figura 3: Diagrama de blocos do sistema implementado para realizar o monitoramento e o controle da deformação da viga.

Para adquirir todos os sinais do sistema, bem como para atuar e aplicar ações de controle sobre o mesmo, foi desenvolvido um Instrumento Virtual (VI) em LabVIEW, cuja interface humano-máquina é apresentada na Figura 4.

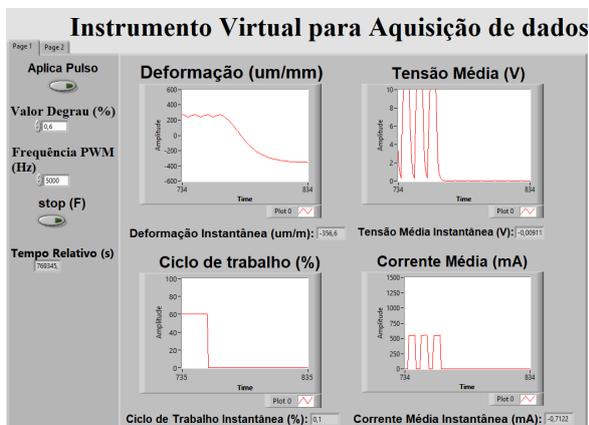


Figura 4: IHM para aquisição e apresentação dos dados.

### 3 Modelagem e Identificação

O modelo de um atuador baseado em fio de LMF pode ser subdividido em três submodelos: um modelo térmico; um modelo de mudança de fase; e um modelo mecânico, conforme representado no diagrama da Figura 5 (Abdelaal and Nagib, 2014) (Pai and Gorbet, 2007), (Tai and Ahn, 2012) (Romano and Tannuri, 2008).

Assim, quando uma corrente elétrica passa através do fio de LMF, este se aquece por efeito Joule, fazendo com que sua temperatura,  $T$ , varie. Esta variação de temperatura faz com que o material passe por uma mudança de fase, a qual é representada quantitativamente por sua fração martensítica  $\xi$ , a qual pode assumir valores de 100% (totalmente martensita) a 0% (totalmente austenita). Por fim, a fração martensítica determina a deformação do atuador, resultando na aplicação uma força à carga mecânica alvo.

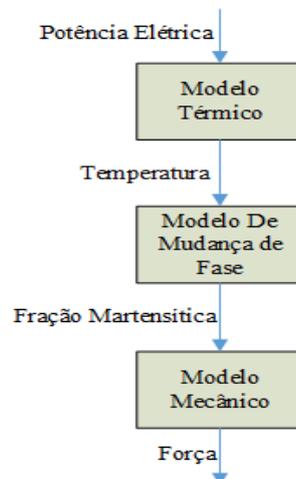


Figura 5: Diagrama de blocos do modelo de um atuador de fio de LMF.

A seguir, serão explorados cada um destes submodelos, juntamente com o modelo de deformação da viga engastada em função da força resultante aplicada à sua extremidade livre.

#### 3.1 Modelo Térmico

O modelo térmico do fio de LMF é descrito em (Nascimento et al., 2008), (Tai and Ahn, 2012) e (Abdelaal and Nagib, 2014), como uma equação diferencial de primeira dada por:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = P - h \cdot A_s (T - T_{amb}) \quad (1)$$

na qual:  $m$  corresponde à massa do fio;  $c_p$  é o calor específico;  $P$  é a potência elétrica entregue ao fio;  $h$  é o coeficiente de convecção;  $A_s$  é a área superficial do fio;  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente; e  $T$  é a temperatura do fio. Observa-se que a constante de tempo térmica do fio é dada por:

$$\tau_{term} = \frac{m \cdot c_p}{h \cdot A} \quad (2)$$

Além do mais, como o acionamento do fio foi realizado por meio de uma fonte de tensão, a potência elétrica aplicada ao mesmo é dada por:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3)$$

A amostra de fio utilizada apresenta um diâmetro de  $0,2\text{ mm}$  e uma resistência por metro de  $32\ \Omega/m$ . Utilizando-se dos dados de um fio com estas mesmas especificações apresentado em (Romano and Tannuri, 2008), foram obtidos os parâmetros térmicos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros do modelo térmico do atuador.

Parâmetro Térmico	Valor
$A$	$4,9574 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$
$m$	$1,5780 \cdot 10^{-4}\text{ Kg}$
$c_p$	$837\ \frac{\text{J}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$
$h$	$118,35 \cdot 10^{-4}\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{°C}}$

### 3.2 Modelo de Mudança de Fase

Para modelar o comportamento histerético entre a fração martensítica e a temperatura do atuador de LMF, utilizou-se o modelo apresentado por (Abdelaal and Nagib, 2014), o qual descreve o comportamento histerético das LMFs como sendo devido a uma dissipação e assimilação do calor latente devido à transformação de fase. Tal modelo foi escolhido em um primeiro momento por depender exclusivamente das temperaturas de transição  $M_s$ ,  $M_f$ ,  $A_s$  e  $A_f$ , as quais correspondem, respectivamente, à temperatura de início de martensita, à temperatura de fim de martensita, à temperatura de início de austenita, e à temperatura de fim de austenita.

O modelo de mudança de fase é descrito matematicamente pelos conjuntos de Equações 4 e 5, as quais representam a evolução da fração martensítica do fio durante o aquecimento,  $\xi_a$ , e o resfriamento,  $\xi_r$ , respectivamente, sendo o comportamento histerético por estes determinados apresentado na Figura 6.

$$\xi_a(T) = \begin{cases} 0, & T > A_f \\ 0,5 \left[ \cos \left( \pi \frac{T-A_s}{A_f-A_s} \right) + 1 \right], & A_s < T < A_f \\ 1, & T < A_s \end{cases} \quad (4)$$

$$\xi_r(T) = \begin{cases} 0, & T > M_s \\ 0,5 \left[ \cos \left( \pi \frac{T-M_f}{M_s-M_f} \right) + 1 \right], & M_s > T > M_f \\ 1, & T < M_f \end{cases} \quad (5)$$

As temperaturas de transição foram obtidas do trabalho de (Romano and Tannuri, 2008), e são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Temperaturas de transição utilizadas no modelo de transição de fase do fio de LMF.

Temperaturas de Transição	Valor (°C)
$M_s$	66
$M_f$	34
$A_s$	53
$A_f$	93

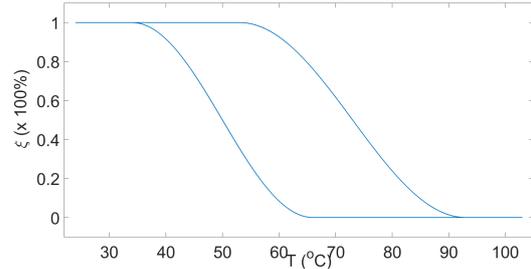


Figura 6: Curva de histerese determinada pelo modelo de mudança de fase do atuador de LMF.

### 3.3 Modelo Mecânico

O modelo mecânico do atuador de LMF relaciona a deformação sofrida pelo fio,  $\varepsilon$ , com a fração de martensita do material,  $\xi$ , o que resulta na realização de um trabalho mecânico pelo fio, associado a uma tensão mecânica  $\sigma$ . A deformação do fio pode ser representada por meio de uma equação diferencial de primeira ordem conforme em (Abdelaal and Nagib, 2014), dada por:

$$\tau_{mec} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon - \varepsilon_m \cdot [1 - \xi(T)] \quad (6)$$

onde:  $\tau_{mec}$  corresponde à constante de tempo mecânica do sistema;  $\varepsilon_m$  é a máxima deformação passível de ser sofrida pelo fio; e  $\varepsilon$  é a deformação do fio em porcentagem do seu comprimento.

A força produzida pelo fio na fase de austenita em função da deformação ocasionada pelo seu aquecimento, é descrita pela Equação 7, e depende apenas do seu módulo de elasticidade de Young na fase de austenita,  $E_a$ , e da sua área transversa,  $A_t$ .

$$F_{fio} = E_a \cdot \varepsilon \cdot A_t \quad (7)$$

Os parâmetros do modelo mecânico do fio foram utilizados como fatores de ajuste da resposta do modelo e são apresentados na Tabela 3.

### 3.4 Modelo da Viga Engastada

O modelo da viga engastada relaciona a força resultante na extremidade livre da mesma à deformação sofrida pela extremidade fixa. Para um

Tabela 3: Parâmetros do modelo mecânico do atuador.

Parâmetros do Modelo Mecânico	Valor
$\tau_{mec}$	1,5 s
$\varepsilon_m$	5 %
$E_a$	13,5 GPa
$A_t$	$3,1416 \cdot 10^{-8} m^2$

viga com comprimento  $L$ , largura  $a$ , espessura  $b$ , e módulo de elasticidade de Young  $E_{viga}$  tem-se que a deformação  $\varepsilon_{viga}$  é dada pela Equação 8, conforme demonstrado por (Pequeno, 2012).

$$\varepsilon_{viga} = \frac{6 \cdot F \cdot L}{a \cdot b^2 \cdot E_{viga}} \quad (8)$$

O diagrama de corpo livre da extremidade fixa da viga é apresentado na Figura 7

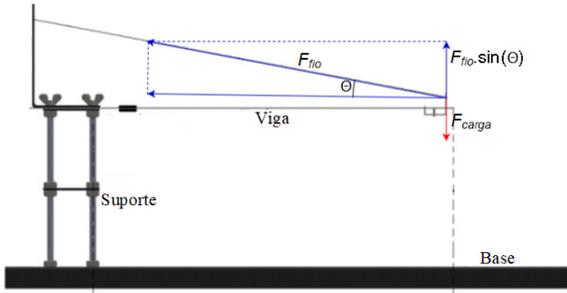


Figura 7: Diagrama de corpo livre que representa a viga atuada pelo fio de LMF.

no qual, fica evidente que a deformação na extremidade fixa da viga pode ser reescrita em função das forças que agem sobre ela da seguinte forma:

$$\varepsilon_{viga} = \frac{6 \cdot L}{a \cdot b^2 \cdot E_{viga}} \cdot [F_{fio} \cdot \sin(\theta) - F_{carga}] \quad (9)$$

#### 4 Identificação

Numa tentativa de se obter uma aproximação linear do comportamento da planta composta pelo conjunto fio-viga, foi empregada uma rotina baseada no algoritmo dos Mínimos Quadrados para tempo contínuo, conforme descrito em (Ioannou and Fidan, 2006), com o intuito de se estimar um modelo na forma de função de transferência para a planta.

A versão contínua do Método dos Mínimos Quadrados visa a encontrar o vetor de parâmetros  $\theta$  que minimiza a função de custo definida por:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \int_0^t |z(\tau) - \theta^T \varphi(\tau)|^2 d\tau \quad (10)$$

onde  $z$  corresponde à versão filtrada da saída da planta,  $\theta$  representa o vetor dos parâmetros a serem estimados, os quais consistem basicamente nos coeficientes da função de transferência contínua, e  $\varphi$  consiste no vetor de regressão, cujos elementos são versões filtradas dos sinais de entrada,  $u$ , e de saída  $y$ . Para a planta em estudo, o sinal  $u$  representa o ciclo de trabalho do sinal de PWM aplicado ao *driver* de tensão, enquanto que a saída  $y$  consiste na deformação medida na extremidade engastada da viga. Esses vetores são representados da seguinte forma:

$$z = \frac{s^n}{\Lambda(s)} y \quad (11)$$

$$\theta^* = [b_m \quad \dots \quad b_0 \quad a_{n-1} \quad a_0]^T \quad (12)$$

$$\varphi = \left[ \frac{s^m}{\Lambda(s)} u \quad \dots \quad \frac{1}{\Lambda(s)} u \quad -\frac{s^{n-1}}{\Lambda(s)} y \quad \dots \quad -\frac{1}{\Lambda(s)} y \right]^T \quad (13)$$

sendo  $\Lambda(s)$  o polinômio característico dos filtros aplicados definido como:

$$\Lambda(s) = s^n + \lambda_{n-1} s^{n-1} + \dots + \lambda_1 s + \lambda_0 \quad (14)$$

Assim, pode-se demonstrar que o vetor de parâmetros  $\theta$  que minimiza a expressão em 10 pode ser obtido da seguinte maneira:

$$\theta(t) = \left( \int_0^t \varphi(\tau) \varphi^T(\tau) d\tau \right)^{-1} \int_0^t z(\tau) \varphi(\tau) d\tau \quad (15)$$

Conforme as Equações 1 e 6, observa-se que a planta apresenta duas constantes de tempo reais: uma associada ao comportamento térmico do fio; e outra relacionada às propriedades mecânicas de deformação e tensionamento do material. Assim, no intuito de tentar reproduzir a dinâmica da planta, foi escolhido o modelo de segunda ordem sem atraso e com resposta superamortecida, cuja representação na forma de função de transferência é da seguinte forma:

$$H(s) = \frac{K}{(\tau_1 \cdot s + 1)(\tau_2 \cdot s + 1)} \quad (16)$$

Para identificar o modelo de segunda ordem, foi aplicado um sinal pulsado à entrada da planta, como apresentado na Figura 8, na qual observa-se a resposta da planta dada a aplicação de dois pulsos, o primeiro de 70 e o segundo de 55 %, de ciclo de trabalho do sinal de PWM.

#### 5 Resultados

O modelo da planta foi simulado no *Matlab/Simulink*, de modo que cada submodelo foi implementado separadamente, conforme apresentado na Figura 9.

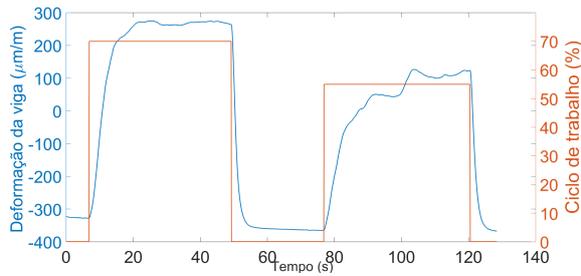


Figura 8: Resposta da planta (azul) a um sinal de teste (vermelho) aplicado à sua entrada.

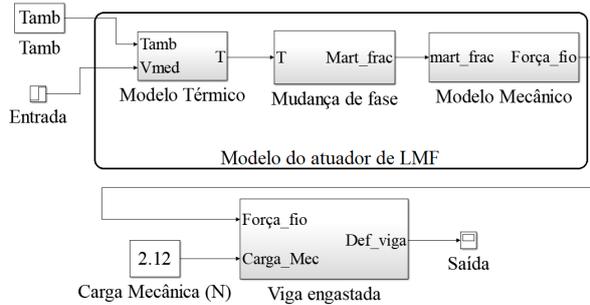


Figura 9: Modelo da planta implementado no *Simulink*.

A planta apresenta três entradas, sendo duas delas do modelo do atuador de LMF, e a outra do modelo da viga engastada. As entradas do modelo do atuador são a temperatura ambiente,  $T_{amb}$ , e a tensão média aplicada sobre o fio,  $V_{med}$ , enquanto que a entrada do modelo da viga engastada corresponde ao carregamento mecânico aplicado a sua extremidade livre,  $c_m$ .

O modelo identificado para a planta é representado pela função de transferência:

$$H(s) = \frac{868,2}{(0,8854 \cdot s + 1)(1,5047 \cdot s + 1)} \quad (17)$$

da qual pode-se extrair as constantes de tempo:  $\tau_1 = 0,8854 s$ ; e  $\tau_2 = 1,5047 s$ . Percebeu-se que uma das constantes de tempo do modelo identificado foi encontrada como sendo  $1,5047 s$ , sendo bastante próxima da constante de tempo mecânica empregada no modelo mecânico do fio.

As repostas dos modelos obtidos via modelagem e via identificação foram comparadas com a resposta da planta obtidas experimentalmente, e são apresentadas nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

A resposta do modelo desenvolvido também foi comparada com a resposta do modelo identificado, conforme apresentado na Figura 12.

## 6 Conclusões

Os modelos obtidos para a planta apresentam-se como uma etapa inicial para o projeto de controle

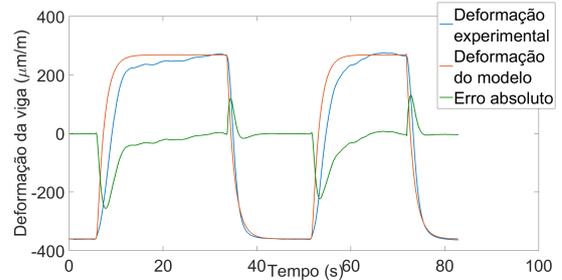


Figura 10: Respostas do (em vermelho) modelo implementado no *Simulink* e (em azul) da planta.

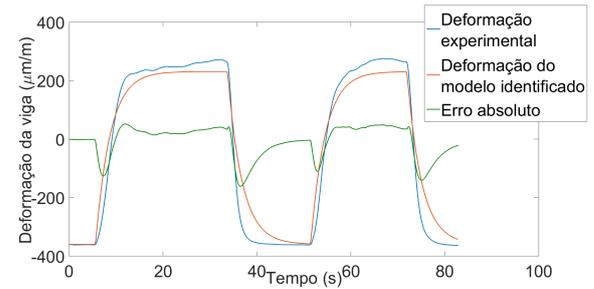


Figura 11: Respostas do (em vermelho) modelo identificado e (em azul) da planta.

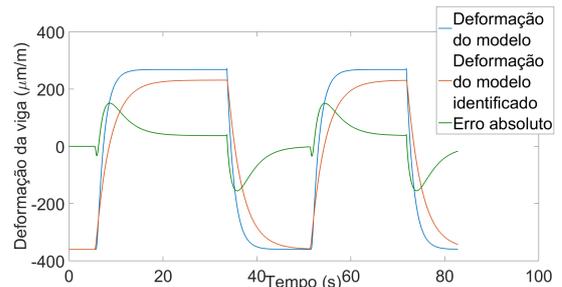


Figura 12: Respostas do (em vermelho) modelo identificado e do (em azul) modelo implementado no *Simulink*.

em malha fechada da deformação na extremidade fixa da viga engastada por meio do atuador baseado em fio de LMF. Foi observado que uma das constantes de tempo obtidas com o modelo identificado de segunda ordem ficou muito próxima da constante de tempo mecânica utilizada no modelo analítico, comprovando a proximidade dos modelos obtidos.

Apesar de o modelo analítico ter apresentado uma boa resposta, ainda faz-se necessário introduzir mecanismos que permitam melhor representar as variações dos parâmetros térmicos do fio com a temperatura bem como determinar com precisão os parâmetros do modelo mecânico. Com relação ao modelo obtido empiricamente, apesar de sua resposta se aproximar razoavelmente dos resultados experimentais, este necessita um maior refinado no sentido de representar melhor as não linearidades da planta bem como a variação dos

parâmetros do fio. O próximo passo deste trabalho consiste em utilizar os modelos obtidos afim de projetar e validar estratégias de controle a serem aplicadas a esta planta.

### Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (PPgEE-UFCG) representado pela Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (COPELE), bem como à Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES) por todo apoio durante a execução deste mestrado.

### Referências

- Abdelaal, W. G. A. and Nagib, G. (2014). Modeling and simulation of sma actuator wire, *9th International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES)* .
- Elahinia, M. H. (2015). *Shape Memory Alloy Actuators*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Ioannou, P. and Fidan, B. (2006). *Adaptive Control Tutorial (Advances in Design and Control)*, SIAM, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Lagoudas, D. C. (2008). *Shape Memory Alloys - Modeling and Engineering Applications*, 1st edn, Springer, Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA.
- Nascimento, M., de Araújo, C., de Almeida, L., da Rocha Neto, J. and Lima, A. (2008). A mathematical model for the strain-temperature hysteresis of shape memory alloy actuators, *Materials and Design* .
- Otsuka, K. and Wayman, C. M. (1998). *SHAPE MEMORY ALLOY MATERIALS*, 1st edn, Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 2RU, United Kingdom.
- Pai, A. and Gorbet, R. (2007). Inverse model-based control and disturbance rejection for a shape memory alloy actuator, *IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics* .
- Pai, A., Rieppold, M. and Trächtler, A. (2016). A model extended temperature and strain controller modulated with pwm for precision position control of shape memory alloy actuators, *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* .
- Pequeno, A. (2012). *Aplicação de métodos de controle em uma estrutura ativa de viga engastada com atuador de liga com memória de forma*, Master's thesis, Universidade Federal de Campina Grande.
- Rahman, S. M. M., Ahn, K. K. and Anh, H. P. H. (2008). A comparative study of position control of a sma actuated manipulator, *2008 Second International Conference on Communications and Electronics* .
- Romano, R. and Tannuri, E. A. (2008). Modelagem e validação experimental de um atuador baseado em liga de memória de forma, *Revista Controle & Automação* **19**(1).
- Silva, E. D. (2007). Beam shape feedback control by means of a shape memory actuator, *Materials & Design* **28**: 1592–1596.
- Tai, N. T. and Ahn, K. K. (2012). Output feedback direct adaptive controller for a sma actuator with a kalman filter, *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY* **20**(4).
- Zakerzadeh, M. and Sayyaadi, H. (2014). Deflection control of sma-actuated beam-like structures in nonlinear large deformation mode, *American Journal of Computational and Applied Mathematics* .