

Experimental Characterization and Validation of Model for Cantilever Beam Platform using SMA Actuator

Antonio J. S. Barroso, Eisenhauer de M. Fernandes, e José S. da Rocha Neto

Abstract—Shape-memory alloys are being used and studied in different areas due to features such as feasibility, high deformation per volume ratio with shape recovery, soft and silent movements. Although these actuators present some advantages for use, its application in position control of structures has some drawbacks related to parameter characterization and, consequently, for system modeling. The lack of information for model the SMA actuator has been compensated in literature by using control algorithms such as Fuzzy controllers, RNA and Fuzzy-PID controller that requires hardware for implementation with more computational requirements. This work presents a model for a flexible cantilever beam actuated by shape-memory alloy (SMA) actuator. The SMA actuator is activated in order to control the position of the free tip of the cantilever beam. The proposed model in Simulink/Matlab is composed by mechanical and electrical sub-systems of the structure. The proposed model is validated by the comparison with the experimental results obtained from a laboratory test bench. The metric used to validate the model is Normalized Mean Squared Error (NMSE), reaching a value of 0.9981, and Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE) of 0.9562, for a 90% duty cycle. As a result, the proposed model can be used for implementation of position closed-loop control of the structure based on conventional algorithms (PI or PID) suitable for simpler hardware presenting limited computational resources (microcontrollers).

Index Terms—Shape-Memory Alloys, SMA Actuator, Simulation model, Experimental Characterization.

I. INTRODUÇÃO

As Ligas de Memória de Forma (LMF) são utilizadas na instrumentação eletrônica, principalmente no desenvolvimento de atuadores, devido ao seu Efeito de Memória de Forma (EMF). Este efeito consiste na capacidade de retornar à uma forma preestabelecida com o aumento de temperatura até um valor crítico, chamado de temperatura de transformação reversa [1]. Essas ligas especiais podem absorver e dissipar energia mecânica através de uma mudança de forma histerética reversível quando submetido à uma carga cíclica mecânica, o que as tornam populares para detecção e atuação, absorção de impacto e aplicações de amortecimento e vibração. Entretanto, o seu uso é restrito à aplicações em baixas frequências (0,1 a 20 Hz). Respostas em alta frequência são possíveis para a classe de ligas com memória de forma magnética [2].

Esses materiais apresentam uma ótima relação deformação por peso, deslocamentos suaves e silenciosos, sendo utilizados como sensores e atuadores em diversos setores industriais como o aeroespacial, automotivo, biomédico, odontológico e exploração de petróleo [2], fornecendo dispositivos simples, compactos e confiáveis [3]. Quando utilizadas em atuadores

termomecânicos, como neste trabalho, onde o aquecimento é realizado por efeito Joule através da passagem de corrente, essas ligas tornam-se uma boa alternativa para geração de grandes forças e deformações com baixas frequências [4].

Destaca-se o trabalho de revisão de Jani *et al.*, onde é feita uma vasta pesquisa sobre aplicações e oportunidades das LMF. Na indústria automotiva, a tecnologia *drive-by-wire* oferece uma ampla gama de oportunidades para atuadores *shape-memory alloy* (SMA) como uma alternativa aos eletromagnéticos, como em válvulas e controles do motor, bateria, controle de transmissão e suspensão, e também nas estruturas externa e interna dos automóveis. Na indústria aeroespacial, destacam-se aplicações de atuação para controle de posição e ângulo em partes dos motores e fuselagem, com destaque para asas e flaps. No campo da robótica, destacam-se as aplicações como músculos artificiais em próteses humanas de dedos e mãos, assim como a construção de robôs da biomimética, simulando o comportamento de animais. Por fim, na indústria biomédica, existem aplicações com atuadores de LMF em ortodontia, ortopédia e vascular, destacando a biocompatibilidade da LMF [5].

A aplicação do controle sobre atuadores de LMF é amplamente difundida na literatura, onde temos trabalhos que ignoram a modelagem e direcionam seus esforços para o controle do atuador, como através de técnica clássica em malha fechada, como o controlador proporcional integral derivativo (PID) [6] ou controle adaptativo com identificação de sistemas para estimação dos parâmetros [7]. Outros trabalhos utilizam técnicas para auxiliar na estimação e aproximação de incertezas nos parâmetros do modelo físico do atuador, permitindo um controle do sistema, como redes neurais para controlador adaptativo [8], [9], e controlador PID com sintonia por lógica Fuzzy [10], estimação não-linear para controlador PID [11] e lógica Fuzzy para controlador proporcional-integral (PI) [12]. Os atuadores de LMF podem ainda ser usados no controle de vibração e atenuação do efeito Sommerfeld em osciladores [13], assim como no controle de movimento e posicionamento de estruturas flexíveis utilizando controladores SDRE (*State Dependent Riccati Equation*) [14].

Destacam-se também trabalhos feitos na mesma plataforma aqui abordada, sendo utilizada a identificação de sistemas com auto-sintonia para controladores PID sem modelagem do sistema [15] e o uso da lógica Fuzzy para estimar parâmetros desconhecidos a partir de uma modelagem com incertezas e aplicação de controladores PI e PID [16].

Diante dos trabalhos mais recentes, percebe-se que o de-

envolvimento e proposição de modelos matemáticos para os atuadores de LMF ainda demandam grande conteúdo a ser explorado na literatura. Dessa maneira, como regra geral, é comum que sejam implementados controladores complexos para suprir a ausência de informações sobre os parâmetros do atuador ou até mesmo a ausência de modelagem.

Utilizando algumas propriedades importantes do material obtidas através de ensaios mecânicos e bibliografia, esse trabalho tem por objetivo propor uma alternativa de modelagem analítica para o atuador de fio de LMF, avaliado em plataforma experimental através de simulação, comparando os resultados e validando o modelo em malha aberta. Almeja-se a aplicação em malha fechada com um sistema de controle simples, utilizando técnicas de controle clássicas, como controladores PI ou PID, com índices de desempenho satisfatórios em comparação à controladores obtidos através de uma modelagem por identificação de sistemas feita na mesma plataforma, do qual se trata de uma evolução [16].

II. PROPRIEDADES DAS LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA

As LMF possuem propriedades particulares definidas pela sua estrutura cristalina. Elas possuem duas fases com diferentes estruturas e propriedades: a *austenita*, em altas temperaturas, e a *martensita*, em baixas temperaturas. A transformação entre as fases ocorre pela distorção da estrutura de cisalhamento (transformação martensítica), onde cada cristal martensítico pode ter duas variantes de orientação diferentes: martensita desorientada (M^d), com variantes autoacomodados, e martensita orientada (M^o), com um variante dominante [2]. A transformação da austenita para martensita é dita *transformação direta*, e da martensita para austenita como *transformação inversa*. Esse efeito é ilustrado na Figura 1, adaptada de [3].

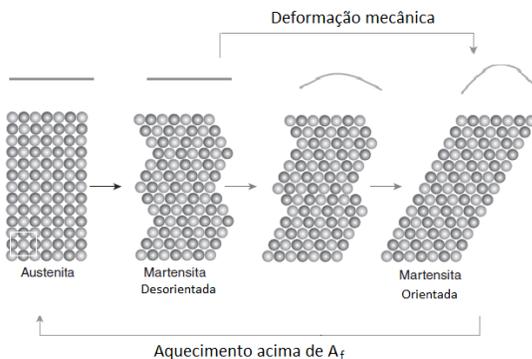


Fig. 1. Mecanismo microscópico do EMF.

A. Efeito de Memória de Forma (EMF)

O EMF é a capacidade de recuperação de forma do material, previamente estabelecida através da variação de temperatura, após sofrer deformações plásticas em uma temperatura específica que exceda o limite elástico do material [17].

Esse fenômeno pode ocorrer em caminho simples (*one way*) ou caminho duplo (*two-way*). No tipo *one way*, o material deformado mecanicamente recupera a sua forma original quando

aquecido, porém quando resfriado não consegue retornar à sua forma deformada original, sendo necessária uma força para deformá-lo novamente. Já no tipo de caminho duplo (*two-way*), o material memoriza duas formas diferentes, uma para baixas temperaturas e outra para altas temperaturas.

Para demonstrar esse efeito, considere a Figura 2, adaptada de [15], onde exhibe-se o comportamento de uma viga engastada cuja deformação é medida na extremidade fixa, sendo movimentada pelo fio de LMF, no qual a liga, inicialmente na fase fria (martensita desorientada), ao sofrer uma aplicação de tensão mecânica, tem suas variantes microscópicas reorientadas, transitando para fase de martensita orientada, que é mantida mesmo após retirar a carga aplicada. A austenita inicia sua formação na temperatura inicial (A_s), e ao ser aquecida acima da temperatura final (A_f), ocorre a transformação completa para fase de austenita, onde temos a recuperação de forma e geração de força no fio, que se contrai devido a organização do tipo cúbica de face ou corpo centrados (CFC/CCC) do material. Ao resfriar, a martensita inicia sua formação na temperatura M_s (temperatura inicial da martensita), e ao atingir uma temperatura menor que M_f (temperatura final da martensita), ela retorna à fase inicial de martensita desorientada. Caso o resfriamento ocorra ainda com a carga aplicada, tem-se uma transformação direta da austenita para martensita orientada, e caso aquecido novamente, esse recupera sua forma original de austenita [2].

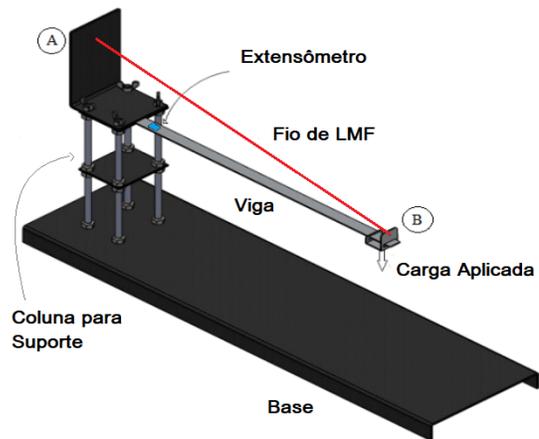


Fig. 2. Vista em perfil da plataforma.

III. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

A plataforma experimental é composta por uma viga engastada com extremidade livre para colocação de cargas, uma base de suporte e um fio de LMF (NiTiNOL tipo *two-way*) como atuador no controle de posição e deformação da extremidade fixa, medida por extensômetros de resistência elétrica. Essa configuração foi desenvolvida para experimentos de modelagem e controle, porém inspira possíveis aplicações na engenharia, no controle de vigas engastadas [4], [16]. A plataforma experimental é mostrada nas Figuras 2 e 3.

O sistema foi projetado para controlar a posição da viga entre valores estabelecidos pelo usuário, utilizando a medição da deformação na extremidade fixa da viga através de sensores

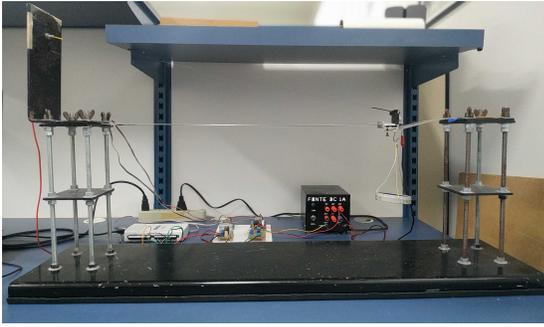


Fig. 3. Plataforma experimental.

(extensômetros) e utilizando um fio de LMF como atuador. A viga é deformada pelo seu próprio peso em balanço e por uma carga externa facultativa, conseqüentemente esticando o fio. Aplicando-se uma potência elétrica no atuador, recupera-se a forma original mediante aquecimento, produzindo força suficiente na viga para retorná-la a sua posição desejada.

IV. CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM

A. Ensaios do Material

Com o intuito de obter os parâmetros do atuador de LMF apresentados na literatura [1], [2] e [16], foi necessário realizar ensaios mecânicos em laboratório. Os ensaios mecânicos foram os seguintes:

1) *Calorimetria Diferencial de Varredura*: A Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) é utilizada para obtenção das temperaturas de transformação de fase do material, parâmetros fundamentais na modelagem do sistema. As temperaturas podem ser obtidas analisando-se o comportamento de outras propriedades em função da temperatura, como resistência elétrica R_{LMF} e calor específico c_p , pois elas variam de forma específica na mudança de fase.

O ensaio consiste em medir o fluxo de calor absorvido ou liberado por uma amostra do fio durante aquecimento e resfriamento à uma taxa constante de variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$). O resultado do ensaio mecânico DSC é apresentado na Figura 4.

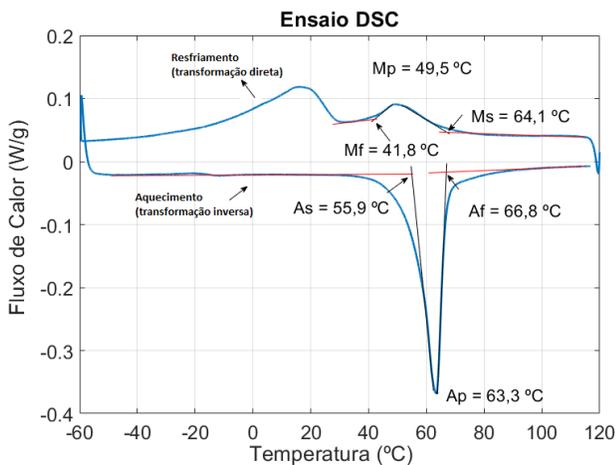


Fig. 4. Resultado do ensaio DSC.

As temperaturas de transformação de fase são obtidas pelo método da tangente, utilizando os picos de transformação como referência. Na Figura 4 são apresentadas também as temperaturas de pico em cada fase (M_p e A_p).

Considerando uma temperatura ambiente de 22°C , observa-se que a LMF utilizada neste trabalho possui temperaturas de transformação de fase acima da temperatura ambiente, indicando que pode-se atingir a contração máxima (5%) do fio através da aplicação de potência elétrica. A recuperação de forma é possível através da carga aplicada pela viga engastada e por sua resistência elástica à temperatura ambiente (resfriamento natural).

2) *Análise Mecânica Dinâmica*: Para avaliar os módulos de elasticidade do material em cada fase (Martensita e Austenita) em função da temperatura, foi realizada uma Análise Mecânica Dinâmica (DMA) com equipamento DMA Q800 da fabricante TA Instruments. O ensaio é do tipo tração e consiste na aplicação de uma força oscilatória em uma amostra e o estudo da resposta do material a esta carga aplicada.

Metais comuns apresentam redução do módulo de elasticidade com o aumento de temperatura, porém para as LMFs existe um aumento deste módulo durante a transformação de fase indireta (aquecimento), onde a austenita apresenta uma maior rigidez, conforme apresentado na Figura 5.

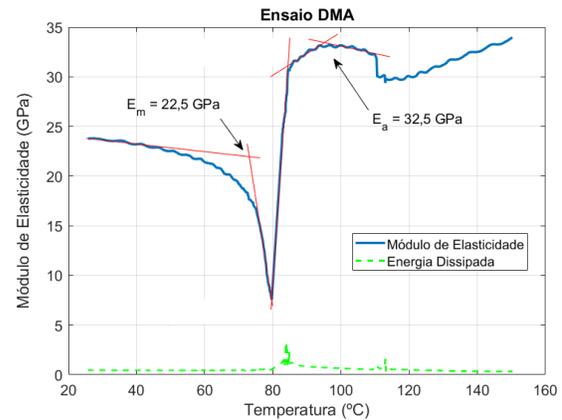


Fig. 5. Resultado do ensaio DMA.

Esse ganho de rigidez, conseqüentemente aumento do módulo de elasticidade e amortecimento, permite aos atuadores de LMF serem utilizados para minimizar vibrações mecânicas em equipamentos industriais. No entanto, é preciso atentar para o aquecimento excessivo do atuador, pois já na região totalmente austenítica (temperaturas acima de 110°C), existe uma redução da capacidade de absorção de energia e, conseqüentemente, da capacidade de amortecimento da LMF.

Esse ensaio também permite analisar a tensão mecânica aplicada à amostra e os seus valores correspondentes de deformação, em função da temperatura. O ensaio permite estabelecer uma relação entre deformação e temperatura, utilizada como comparativo e orientação para as simulações computacionais dos modelos, garantindo a utilização do fio dentro do limite de segurança, evitando danos ao material.

B. Modelagem Matemática

O modelo matemático do atuador de LMF pode ser dividido em três sub-sistemas físicos: o modelo térmico, o modelo da mudança de fase e o modelo mecânico. Estes modelos são representados na Figura 6. Neste trabalho, para fins experimentais no cálculo da deformação em uma viga, acrescenta-se ainda um submodelo da viga engastada.



Fig. 6. Diagrama de blocos do modelo de atuador LMF.

A potência elétrica aplicada fornece uma corrente elétrica ao fio de LMF, aquecendo-o por efeito Joule, elevando sua temperatura (T). Em seguida, o material sofre uma mudança de fase na sua estrutura microscópica, caracterizada por sua porcentagem de martensita (ξ) presente, sendo $\xi = 1$ (100 %) para a sua fase fria (apenas martensita) e $\xi = 0$ (0 %) para a sua fase quente (apenas austenita). Essa fração determina a deformação do fio e força aplicada por ele à viga engastada, onde é medida a deformação ε_{viga} .

1) *Modelo Térmico*: O atuador de fio com LMF tem seu princípio fundamentado na variação de temperatura para gerar forças e deformações. Considerando que a estrutura da plataforma não possui medição de temperatura do fio T , é necessário primeiramente definir o seu modelo térmico. Na literatura é possível encontrar essa modelagem bem definida e explorada, como em [18], [19], [20], [9], [21] e [11].

O modelo aqui utilizado é constitutivo e adaptado da literatura, obtido pelo balanço térmico no fio. O calor no fio (Q_{LMF}) é proporcional a diferença entre o calor fornecido pela fonte externa (Q_{fonte}) e as dissipações por convecção (Q_{convec}), condução (Q_{cond}) e radiação (Q_{rad}). O calor dissipado por radiação pode ser desprezado ($Q_{rad} \approx 0$) em aplicações na atmosfera, assim como o calor dissipado por condução ($Q_{cond} \approx 0$), ao considerar a temperatura atual constante ao longo todo o fio, como neste trabalho.

A temperatura do fio T é determinada por uma equação diferencial de primeira ordem, conforme Equação (1), obtida a partir da transferência de calor no fio, conforme Equação (2):

$$m_{LMF} \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = P_{LMF} - h \cdot S(T - T_{amb}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Q_{LMF} &= Q_{fonte} - Q_{convec} - Q_{cond} - Q_{rad} \\ Q_{LMF} &= Q_{fonte} - Q_{convec} \end{aligned} \quad (2)$$

onde m_{LMF} é a massa do fio, P_{LMF} é a potência elétrica fornecida pela fonte, h é o coeficiente de convecção, S é a área superficial do fio e T_{amb} é a temperatura ambiente.

Os parâmetros do modelo térmico estão apresentados na Tabela I, onde os valores experimentais foram obtidos a partir dos ensaios mecânicos.

TABELA I
PARÂMETROS DO MODELO TÉRMICO.

Parâmetro	Valor	Fonte
d	0,2 mm	Experimental
l	789 mm	Experimental
S	$4,96 \cdot 10^{-4} m^2$	Experimental
V	$2,48 \cdot 10^{-8} m^3$	Experimental
T_{amb}	22 °C	Experimental
m_{LMF}	$1,58 \cdot 10^{-4} kg$	Experimental
ρ_{LMF}	$6450 kg/m^3$	Fabricante
c_p	$837 J/(kg \cdot K)$	Fabricante
k	$1800 W/(m \cdot K)$	Fabricante
R_{LMF}	29 Ω/m	Fabricante
h	150 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$	Fabricante

2) *Modelo da Mudança de Fase*: A liga de LMF possui uma histerese na relação entre a fração martensítica ξ (mudança de fase) e a temperatura T . Fisicamente, essa histerese é baseada na dissipação e assimilação do calor latente, devido a mudança de fase, que tende a retardar o aquecimento e o resfriamento.

O material possui quatro temperaturas de transição, duas para cada fase (austenita e martensita), e seus valores obtidos através do ensaio DSC são apresentados na Tabela II.

TABELA II
TEMPERATURAS DE TRANSIÇÃO DO MATERIAL.

Temperatura	Valor
M_f	41,8 °C
M_s	64,1 °C
A_s	55,9 °C
A_f	66,8 °C

O modelo aqui apresentado é baseado em uma relação empírica que utiliza a teoria de estatística Fermi-Dirac, sendo desenvolvida por *Liang e Rogers* e utilizado em diversos trabalhos, como [18] e [21], descrevendo a fração martensítica $\xi(T)$ durante o aquecimento (Equação 3) e o resfriamento (Equação 4) do fio em função apenas das temperaturas M_s , M_f , A_s e A_f , aplicando cargas contantes:

$$\xi_a(T) = \begin{cases} 0, & T > A_f \\ 0,5 \left[\cos \left(\pi \frac{T - A_s}{A_f - A_s} \right) + 1 \right], & A_s < T < A_f \\ 1, & T < A_s \end{cases} \quad (3)$$

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

onde $\xi_a(T)$ e $\xi_r(T)$ são as frações martensíticas no aquecimento e resfriamento, respectivamente.

3) *Modelo do Sistema Mecânico*: As características mecânicas do fio de LMF são apresentadas na Tabela III.

A mudança de fase, expressa pela fração martensítica calculada ξ , permite calcular o trabalho mecânico (W) do material e o movimento do fio gerados pela variação de calor

TABELA III
PARÂMETROS MECÂNICOS DO MATERIAL.

Parâmetro	Valor
τ_{mec}	1,5 s
ε_m	5 %
E_a	32,5 GPa
E_m	22,5 GPa
A_t	$3,1416 \cdot 10^{-8} m^2$

(temperatura). A deformação ε é modelada por uma equação diferencial de primeira ordem [18]:

$$\varepsilon + \tau_{mec} \frac{d\varepsilon}{dt} = \varepsilon_m [1 - \xi(T)] \quad (5)$$

onde ε_m é a máxima deformação recuperável da LMF, disponível no manual [22], e τ_{mec} é a constante de tempo mecânica, que depende do diâmetro do fio, com valor adaptado para o sistema e baseado na literatura [1].

Conforme demonstrado por [11], o módulo de elasticidade do fio E_{LMF} é fundamentado em função da fração martensítica ξ e dos módulos de elasticidade das fases de austenita E_a e martensita E_m , retirados do ensaio DMA realizado:

$$E_{LMF} = \xi \cdot E_m + (1 - \xi) \cdot E_a \quad (6)$$

A força no fio F_{LMF} , ao se deformar por efeito Joule, é dada em função de E_{LMF} , da deformação do fio ε e da área transversal do fio A_t , considerando um fio de seção circular:

$$\begin{aligned} \sigma_{LMF} &= E_{LMF} \cdot \varepsilon \\ F_{LMF} &= E_{LMF} \cdot \varepsilon \cdot A_t \end{aligned} \quad (7)$$

4) *Modelo da Viga Engastada*: O modelo da viga engastada possui uma relação entre a força resultante (F) na extremidade livre da viga ($x = L$) à deformação sofrida (ε_{viga}) na extremidade onde foram fixados os extensômetros para medição da deformação ($x = 0$), conforme ilustrado no seu diagrama de corpo livre na Figura 7, adaptada de [15].

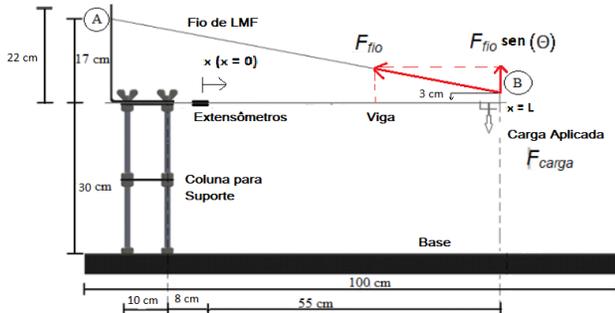


Fig. 7. Diagrama de corpo livre do sistema.

A viga é feita de aço comum e possui comprimento útil $L = 55 \text{ cm}$, largura $a = 26 \text{ mm}$, espessura $b = 2 \text{ mm}$ e momento de inércia da seção transversal $I = 1,73 \times 10^{-11} m^4$. A densidade $\rho_{viga} = 7860 \text{ kg/m}^3$ e módulo de elasticidade $E_{viga} = 20,6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ são para o aço comum [23].

A deformação da viga ε_{viga} é dada por:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{viga} &= \frac{6FL}{ab^2 E_{viga}} \\ \varepsilon_{viga} &= \frac{6L}{ab^2 E_{viga}} [F_{LMF} \cdot \text{sen}(\Theta) - F_{carga}] \end{aligned} \quad (8)$$

onde Θ é o ângulo formado entre o fio e uma linha paralela à viga, ilustrado na Figura 7, e F_{carga} a carga facultativa aplicada à viga, calculados por:

$$\Theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{14 \text{ cm}}{73 \text{ cm}} \right) = 11,23^\circ \text{ ou } 0,1961 \text{ rad}$$

$$F_{carga} = (m_{viga} + 2m_{carga}) \cdot g \cdot \frac{L}{2} \quad (9)$$

onde g é a aceleração da gravidade, m_{carga} é a massa da carga possivelmente aplicada através de pesos de referência disponíveis no laboratório e m_{viga} é a massa da viga, calculada por:

$$m_{viga} = \rho_{viga} \cdot V_{viga} = \rho_{viga} \cdot a \cdot b \cdot L$$

V. SIMULAÇÃO DO MODELO

O modelo do sistema físico foi simulado em malha aberta no *Simulink*, ferramenta do *software MATLAB R2018a*, conforme representado na Figura 8. As entradas são tensão (V) ou corrente (I) elétricas aplicadas, T_{amb} e F_{carga} . A saída é a deformação na viga ε_{viga} .

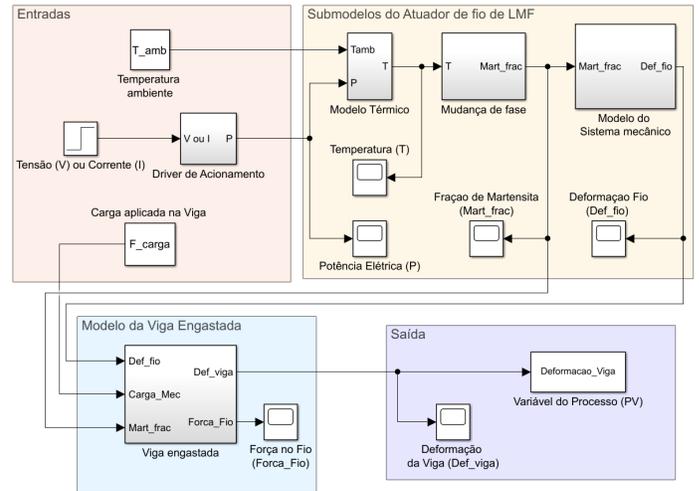


Fig. 8. Modelo do sistema em malha aberta.

Conforme apresentado na Seção IV, o modelo do atuador pode ser dividido em três submodelos:

- **Modelo térmico**, definido pela Equação 1;
- **Modelo de mudança de fase**, definido pelas Equações 3 e 4;
- **Modelo do sistema mecânico**, definido pela Equação 5;

Além do atuador, modela-se também a viga engastada, fundamental para composição do sistema, com modelo definido pela Equação 8.

VI. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O modelo foi simulado em *Simulink* aplicando-se diferentes valores no sinal de entrada de tensão do tipo *pulse width modulation* (PWM), variando entre 60 % e 90 % da tensão máxima de 15 V fornecida pela fonte do sistema real. Esses valores foram escolhidos respeitando uma limitação do sistema em relação a potência elétrica mínima necessária (2,4 W), e conseqüentemente tensão (7,5 V) e corrente (320 mA) mínimas, para que o fio de LMF atinja a temperatura A_s , iniciando a transformação austenítica, e alcance a transformação completa em A_f , onde ocorre a contração máxima, sendo capaz de produzir força suficiente para deformar a viga conforme desejado, com valores de até $350 \mu\text{m/m}$.

Utilizando-se um *driver* de tensão, essa tensão mínima equivale a 50 % do ciclo máximo de trabalho do PWM. Os valores limitam-se a 90 % pois evita-se utilizar o valor máximo para não desgastar o fio, conforme recomendado pelo fabricante [22]. O resultado para aplicação de 13,5 V (90 %) é apresentado na Figura 9.

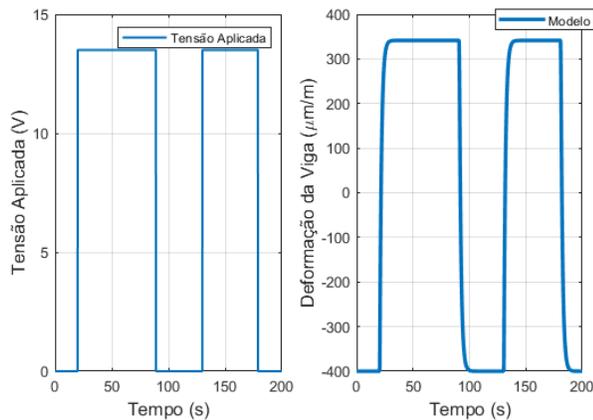


Fig. 9. Curvas de entrada e saída para o modelo do sistema.

VII. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O acionamento do atuador (fio de LMF) é feito através de sinal elétrico fornecido por um *driver* de tensão, apresentado na Figura 10. Nesta mesma figura, encontram-se um *driver* de corrente, disponível para futuras aplicações, e os circuitos de condicionamento de sinal e ajuste de ganho, necessários pois o sinal de saída da deformação medida pelos extensômetros é muito baixo, não sendo perceptível à um conversor analógico-digital (AD) da placa de aquisição de dados. Nesse caso, aplica-se um alto ganho ($> 100 \text{ V/V}$), assim como um amplificador de instrumentação, para evitar a amplificação de ruídos e com *offset* ajustável.

A aquisição de dados é feita por um sistema DAQ NI USB-6212. O sistema é operado através de uma Interface Homem-Máquina (IHM) feita em *software* NI LabVIEW 2015, apresentado na Figura 11. A interface para o usuário permite o monitoramento, controle e aquisição de dados de testes realizados com o atuador LMF de forma automática, permitindo a comparação com o modelo proposto. Foram realizados experimentos com valores de entrada entre 60 %

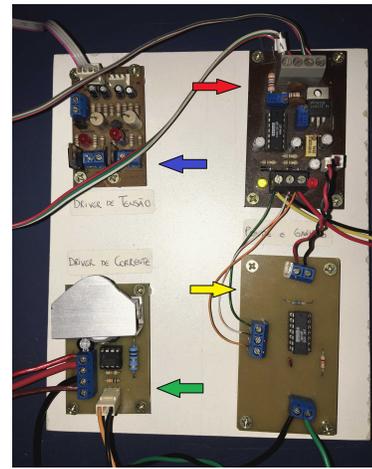


Fig. 10. Drivers de acionamento e circuito de condicionamento e ajuste de ganho.

e 90 %. O resultado para a aplicação de 13,5 V (90 %) é apresentado na Figura 12.

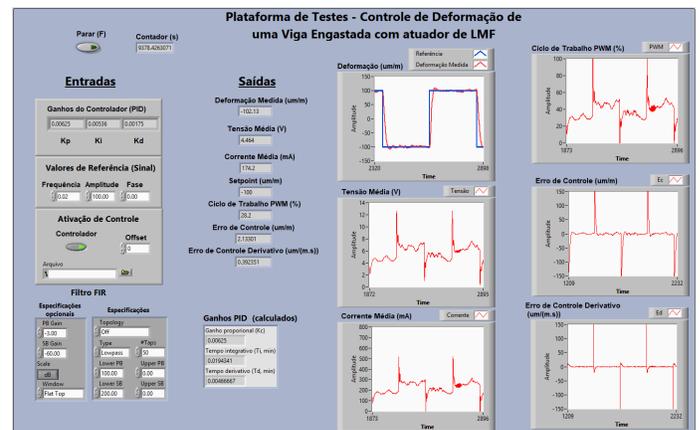


Fig. 11. Painel frontal da IHM implementada em LabVIEW para o controle de deformação.

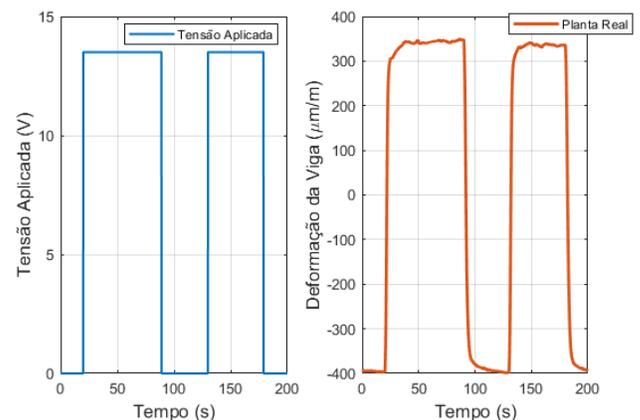


Fig. 12. Curvas de entrada e saída para o sistema real.

VIII. VALIDAÇÃO

Para avaliar a coerência dos valores de simulação com os valores reais do sistema, é necessário validar os modelos obtidos.

Dessa maneira, é possível realizar uma comparação entre as respostas em malha aberta dos modelos e da planta real para os mesmos valores de ciclo (PWM) de tensão aplicada. O comparativo de validação para aplicação de 13,5 V (90 %) é apresentado na Figura 13.

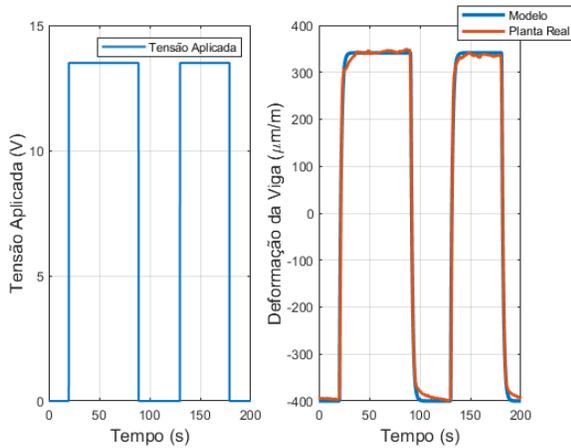


Fig. 13. Curvas de entrada e saídas do modelo e planta real.

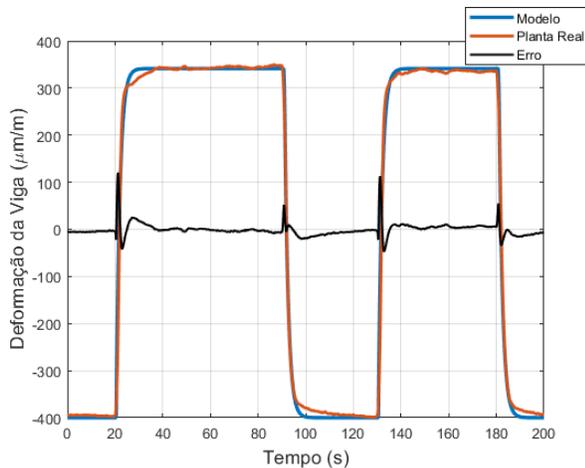


Fig. 14. Curvas de saídas e erro entre elas.

A precisão dos modelos foi calculada através do erro instantâneo entre o modelo simulado e os resultados da planta real, considerando a mesma condição de entrada, sendo apresentado na Figura 14.

Percebe-se um pequeno erro em regime estacionário, próximo do zero, e uma variação em torno de $100 \mu\text{m}/\text{m}$ na deformação devido a uma diferença nos instantes de acionamento entre o modelo simulado em Simulink e os dados reais da planta obtidos no LabVIEW.

Foram também calculados os erro médio quadrático normalizado (NMSE - *Normalized Mean Square Error*) e erro médio quadrático (NRMSE - *Normalized Root Mean Square Error*),

que baseiam-se nas Equações 10 e 11. Os resultados dos erros NMSE e NRMSE são apresentados na Tabela IV.

$$NMSE = \frac{\|x_{ref} - x\|}{\|x_{ref} - M_s(x_{ref})\|} \quad (10)$$

$$NRMSE = \frac{\|x_{ref} - x\|^2}{\|x_{ref} - M_s(x_{ref})\|^2} \quad (11)$$

onde x corresponde aos dados modelados, x_{ref} aos dados de referência da planta real e $M_s(x_{ref})$ é a média de valores de x_{ref} .

TABELA IV
MÉTRICAS DE VALIDAÇÃO DO MODELO.

Ciclo de Trabalho	NMSE	NRMSE
90 %	0,9981	0,9562

Pode-se verificar que, dos resultados apresentados na Tabela IV, para o teste de deformação máxima de $350 \mu\text{m}/\text{m}$ do modelo e do experimento, com acionamento de 13,5 V (90 % do ciclo de trabalho), obtiveram-se valores de $0,9981 \mu\text{m}/\text{m}$ para o erro NMSE e $0,9562 \mu\text{m}/\text{m}$ para o erro NRMSE, que representam 0,285 % e 0,273 %, respectivamente.

IX. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um modelo de simulação computacional de um sistema em viga engastada acionada por atuador de LMF. O modelo proposto foi simulado em *Simulink*. Os resultados de simulação foram validados em malha aberta com aqueles de uma plataforma experimental. Como métricas de comparação, foram calculados os erros instantâneo, NMSE e NRMSE. Os valores obtidos com essas métricas comprovam a aderência e validam o modelo proposto.

Dessa maneira, o modelo proposto representa com ótima aproximação o comportamento real da plataforma experimental acionada por atuador de LMF, possibilitando simplificação no controle do sistema.

Os erros obtidos na avaliação experimental possibilitam empregar o modelo para aplicações de controle de posição utilizando LMF, e controle de deslocamento e vibração de estruturas mecânicas em diversas áreas, como automotiva, aeronáutica, robótica e biomédica. Com base nos demais trabalhos publicados na área, verifica-se que o nível de representação do modelo físico do sistema é compatível com àqueles descritos em outras propostas.

Deve-se destacar que, sem a investigação de propostas de modelos para este tipo de atuador inteligente, torna-se necessário um desenvolvimento em estratégias de controle mais sofisticadas, conforme visto em trabalhos da literatura e principalmente aqueles desenvolvidos na mesma plataforma [15], [16]. Dessa maneira, a investigação de modelagem mais elaborada permite um esforço computacional menor, a implementação em dispositivos de controle (*hardwares*) de menor complexidade e custo. Como trabalhos futuros, tem-se a implementação do controle de posição da plataforma experimental em laboratório a partir do modelo proposto ao sistema em associação a um controlador PI.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPgEE-COPELE) da UFCG, assim como ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFCG, especialmente à equipe do laboratório LaMMEA, pela disponibilidade de equipamentos e materiais para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Jayender, R. V. Patel, S. N. and Ostojic, M. (2008), *Modeling and control of shape memory alloy actuators*, IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY 16(2): Pag 279-287.
- [2] 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.
- [3] Yamauchi, K., Ohkata, I., Tsuchiya, K. and Miyazaki, S. (2011), *Shape memory and superelastic alloys - Technologies and applications*, 1st edn, WOODHEAD PUBLISHING, 80 High Street, Sawston, Cambridge CB22 3HJ, UK.
- [4] Lima, W. M. (2008), *Plataforma para análise comportamental de atuadores de ligas com memória de forma e para o controle de deformação de uma barra flexível*, Master's thesis, Universidade Federal de Campina Grande
- [5] Jani, J. M., Leary, M., Subic, A. and Gibson, M. A (2014), *A review of shape memory alloy research, applications and opportunities*, Materials and Design 56 (2014) 1078–1113.
- [6] Roshan, T. A. U., Basnayake, B. A. D. J. C. K., Amarasinghe, Y. W. R., Wijethunge, D. and Nanayakkara, N. D. *Development of a PID Based Closed Loop Controller for Shape Memory Alloy Actuators*, 2018 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon).
- [7] Tai, N. T. and Ahn, K. K. (2012), *Robust Indirect Adaptive Control for a Class of Nonlinear Systems and Its Application to Shape Memory Alloy Actuators*, IEEE Access (Volume 6): Pag 35809 - 35823.
- [8] Pan, Y., Guo, Z., Li, X. and Yu, H. (2017), *Output-Feedback Adaptive Neural Control of a Compliant Differential SMA Actuator*, 2017 IEEE Transactions on Control Systems Technology.
- [9] Tai, N. T. and Ahn, K. K. (2012), *Output feedback direct adaptive controller for a sma actuator with a kalman filter*, Transactions on Control Systems Technology 20(4): Pag 1081 - 1091.
- [10] Shi, Z., Tian, J., Luo, R., Zhao, G. and Wang, T. *Multifeedback Control of a Shape Memory Alloy Actuator and a Trial Application*, IEEE transactions on systems, man and cybernetics: systems, vol. 48, no. 7, July 2018.
- [11] Xiaoguang, L., Daohui, Z., Xingang, Z. and Han, J. (2017), *Modeling and control of shape memory alloy actuator using feedback linearization*, 2017 36th Chinese Control Conference(CCC).
- [12] Alsayed, Y. M., Abouelsoud, A. A., Fath El Bab, A. M. R., *Hybrid Sliding Mode Fuzzy Logic-Based PI Controller Design and Implementation of Shape Memory Alloy Actuator*, 2016 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT).
- [13] Kossoki, A., Tusset, A. M., Janzen, F. C., Rocha, R. T., Balthazar, J. M., Brasil, R. M. L. R. F. and Nabarrete, A. (2018), *Jump Attenuation in a Non-Ideal System Using Shape Memory Element*, MATEC Web Conf., 148 (2018) 03003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814803003>
- [14] Janzen, F. C., Tusset, A. M., Piccirillo, V., Balthazar, J. M. and Brasil, R. M. L. R. F. (2015), *Motion and vibration control of a slewing flexible structure by SMA actuators and parameter sensitivity analysis*, Eur. Phys. J. Spec. Top. 224, 3041–3054 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02605-6>
- [15] A. A. P. Pequeno (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.
- [16] Campos, A. H. P. (2018), *Estratégias de controle aplicadas a um atuador de liga de memória de forma para o controle de deformação de uma viga engastada*, Master's thesis, Universidade Federal de Campina Grande
- [17] Mohammad H. Elahinia (2015), *Shape Memory Alloy Actuators*, Vol. 1, first edn , John Wiley & Sons, Ltd. URL: <https://doi.org/10.1002/9781118426913>
- [18] Abdelaal, W. G. A. and Nagib, G. (2014), *Modeling and simulation of sma actuator wire*, 9th International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES).
- [19] D, J. S. R. and Dhanalakshmi, K. (2017), *Shape memory alloy wire for force sensing*, IEEE Sensors Journal 17(4): Pag 967 - 975.
- [20] Nascimento, M. J., de Araújo, C., de Almeida, L., da Rocha Neto, J. and Lima, A. (2009), *A mathematical model for the strain-temperature hysteresis of shape memory alloy actuators*, Materials & Design 30(3): 551 - 556. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306908002318>.
- [21] Velázquez, R. and Pissaloux, E. (2012), *Modelling and temperature control of shape memory alloys with fast electrical heating*, International Journal of Mechanics and Control 13(2): Pag 3 - 10.
- [22] Inc., D. (n.d.), *Technical characteristics of flexinol actuator wires*, DYNALLOY, Inc., Acesso em: 09/10/2018. URL: <http://www.dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf>
- [23] Hibbeler, R. C. (2005), *Resistência dos Materiais*, Vol. 1, 5th edn, Prentice-Hall.



Antônio J. S. Barroso possui Mestrado em Engenharia Elétrica (Instrumentação Eletrônica, Controle e Automação) pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Possui graduação sanduíche em Engenharia Automotiva - Politecnico di Torino (2016) e em Engenharia Mecânica com ênfase em Mecatrônica pela Universidade de Pernambuco (2016). É professor auxiliar do Centro Universitário Estácio de Sergipe. Tem experiência nas áreas de Engenharia Eletrônica (ênfase em instrumentação eletrônica e controle de processos), Engenharia Mecânica (com ênfase em Automação) e Engenharia Automotiva.



Eisenhauer de M. Fernandes possui graduação (2004), mestrado (2006) e doutorado (2011) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Em 2013, foi Pesquisador-Visitante na Universidade de Wisconsin-Madison (UW-Madison), Estados Unidos, trabalhando em projeto de sistemas de controle de motores a ímãs permanentes sem sensor de posição. De 2006 a 2008, foi Professor da Universidade Federal do Vale do São Francisco (Univasf). Desde 2008, é Professor do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM/UFCG) e membro colaborador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPgEE/UFCG). Suas áreas de interesse em pesquisa são: sistemas de controle, instrumentação eletrônica, controle de máquinas elétricas, sistemas embarcados, controle de sistemas termo-mecânicos.



José S. da Rocha Neto é membro Sênior do IEEE, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1978), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1982) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1994). Atualmente é professor associado da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Instrumentação Eletrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: Caracterização de sensor termo-resistivo, Ligas de memória de forma (shape memory alloy), sensores inteligentes, redes de sensores/atuadores industriais, redes ASI, rede CAN, Sistemas Embarcados.