



## **DESENVOLVIMENTO DE UM GUIA DE EXPERIMENTO PARA ANÁLISE E CONTROLE DE UMA PLATAFORMA DE TESTES COM UMA VIGA ENGASTADA**

**MELO, T. R.** – thamiles.melo@ee.ufcg.edu.br

**SILVA, J. J.** – jaidilson@dee.ufcg.edu.br

**ROCHA NETO, J. S.** – zesergio@dee.ufcg.edu.br

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática,  
Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Instrumentação Eletrônica e  
Controle (UFCG - CEEI - DEE - LIEC)  
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó  
58.429-900 – Campina Grande – Paraíba

**Resumo:** Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento de um guia de experimento com o objetivo de estudar uma plataforma de testes com uma viga engastada. Por meio deste guia, o aluno pode aplicar os conhecimentos prévios sobre sensores strain gauges para criar uma estratégia de controle e implementá-la em um atuador, neste caso, uma Liga com Memória de Forma (LMF) ou SMA (Shape Memory Alloy).

**Palavras-chave:** Guia de Experimento, Plataforma de Testes, Viga Engastada, Sensores, Liga com Memória de Forma.

### **1. INTRODUÇÃO**

Recentemente, um novo enfoque no controle de vibrações em estruturas flexíveis tem sido alvo de estudos de vários pesquisadores. Segundo esse enfoque, o uso integrado de sensores, atuadores e controladores capacitaria um sistema a responder de modo controlado a excitações externas, procurando compensar os efeitos que levariam os níveis de amplitude da resposta a se afastarem de patamares aceitáveis. Atualmente, tem-se convencionado chamar esses sistemas, que integram estrutura, sensores, atuadores e controladores, de Estruturas Inteligentes (ROCHA, 2004).

Várias tecnologias e materiais têm sido investigados e propostos no desenvolvimento de estruturas. Estruturas estas que podem ser, por exemplo, uma viga simplesmente engastada, ou uma viga em balanço. Dessa forma, uma tecnologia que vem sendo utilizada por mais de 10 anos nos problemas mecânicos de deformação e/ou vibração em sistemas estruturais, é a adição de atuadores de força conhecidos como ligas de memória de forma às técnicas convencionais de controle (LIMA, 2008), (ROCHA, 2004).

As Ligas com Memória de Forma (LMF), também conhecidas como SMA (do inglês, *Shape Memory Alloy*), constituem um grupo distinto de materiais metálicos que demonstram a capacidade de regressar à forma original após sofrer uma deformação



plástica seguida de um aquecimento subsequente. Essa capacidade de recuperar a forma foi denominada por Efeito Memória de Forma Simples (EMFS) (MOALLEM, 2005), (REIS, 2010).

Devido a esse fenômeno, as LMF podem ser utilizadas como sensores e/ou atuadores na indústria aeroespacial, petrolífera, automobilística, em aplicações ortodônticas, ortopédicas, robóticas ou no controle da vibração e forma. Quando utilizadas como atuadores termomecânicos, no qual o aquecimento é realizado pelo efeito joule resultante da aplicação de uma certa intensidade de corrente, as LMF tornaram-se uma alternativa atrativa devido à sua grande deformação e boa recuperação em sistemas onde grandes forças, grandes deformações e baixas frequências são requeridas (LIMA, 2008), (SUZUKI, 2010).

De forma semelhante, nos últimos 15 anos vários trabalhos com foco na aplicação de LMF para controle de vibração em máquinas e estruturas têm sido desenvolvidos (FARIA, 2006).

Neste contexto, propõe-se neste trabalho apresentar um guia de experimento elaborado para projetar e implementar os controladores necessários para controlar parte de uma estrutura, mais especificamente a posição de equilíbrio de uma viga de aço engastada, usando um fio atuador de LMF. São usados também extensômetros colados nas faces da barra de aço como sensores de deformação e um controlador, para manter o equilíbrio da viga.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Nesta seção serão apresentados os componentes e materiais utilizados no experimento para análise e controle da plataforma de testes.

### **2.1. Plataforma de Testes**

Basicamente, a estrutura da plataforma consiste numa viga de aço engastada a uma coluna. Como apoio na outra extremidade, encontra-se a Liga com Memória de Forma (LMF). Os extensômetros encontram-se distribuídos de forma que um se localiza em cada face da viga, para que sejam medidos os graus de extensão e de contração do aço. A carga é aplicada na ponta sustentada pela LMF, que recebe o sinal de atuação a partir de terminais elétricos conectados em suas extremidades (LIMA, 2008). Na Figura 1 apresenta-se uma representação da plataforma de testes.

Pode-se dizer, então, que a estrutura da plataforma é composta por três partes:

- Base rígida: Uma base retangular, plana, de ferro, com comprimento de 100 cm, largura de 25,7 cm e altura de 3,5 cm;
- Coluna de suporte: Uma coluna erguida com origem na base, composta por quatro parafusos de 28 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro, dispostos em quatro cantos que formam um retângulo; duas placas de fixação retangulares medindo 10 cm x 12 cm e uma terceira placa de fixação para o LMF, como pode ser visto no detalhe A da Figura 1, com altura de 22 cm;
- Viga: Uma viga de aço com 55 cm de comprimento, 2,6 cm de largura e 2 mm de espessura, tendo uma das extremidades presa entre duas placas de fixação na coluna de suporte, e a outra extremidade livre, onde é fixado o atuador de LMF.

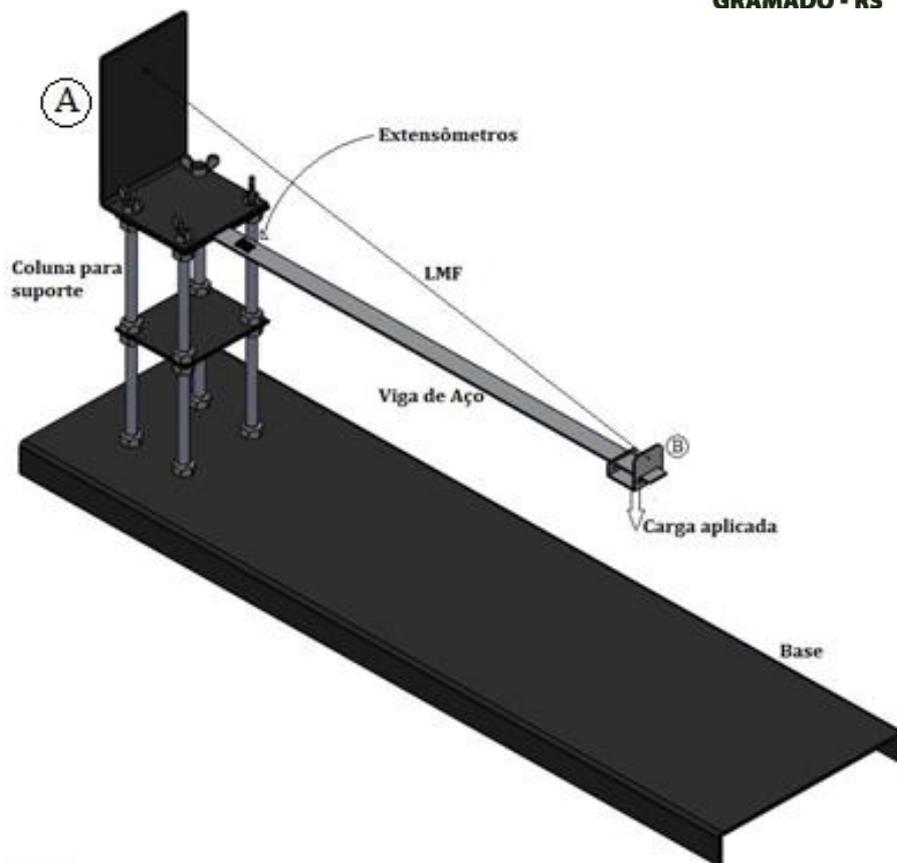
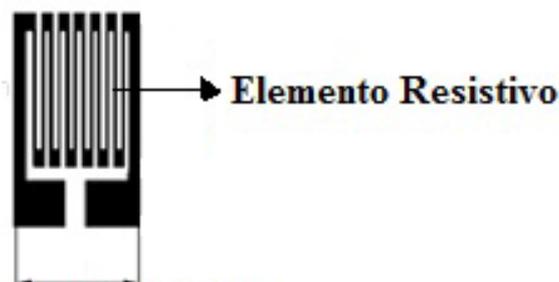


Figura 1 – Representação da plataforma de testes.

## 2.2. Extensômetros

Os sensores de deformação ou extensômetros (do inglês, *Strain Gauges* ou *Strain Gages*) são transdutores que variam sua resistência a partir da deformação de uma estrutura. Sua variação é proporcional à deformação  $\epsilon$ , e sua resistência é dada por  $G$  vezes esta deformação (onde  $G$  é conhecido como o fator de sensibilidade, ou *gage factor*). Nesta plataforma foram utilizados modelos de extensômetros fabricados pela *Excel Sensores*, especificamente o PA - 06 - 125BA - 350 – LEN (EXCEL SENSOR, 2010). Um exemplo de representação de um extensômetro é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Representação de um *Strain Gauge*.

### 2.3. Ligas com memória de forma (LMF)

As ligas com memória de forma (LMF) possuem um comportamento interessante se comparadas com outros materiais. Normalmente, quando um material é aquecido ele expande; porém, as ligas com memória de forma apresentam contração ao serem expostas a temperaturas altas (MOALLEM, 2005).

A propriedade que as ligas com memória de forma possuem seguem basicamente dois aspectos:

- Em baixas temperaturas, na ausência de tensão mecânica, o material passa para o estado de martensita;
- Em temperaturas altas, a liga aquece e retorna para sua forma original, austenita.

Na Figura 3 apresenta-se um esquema das transformações sofridas pela LMF.

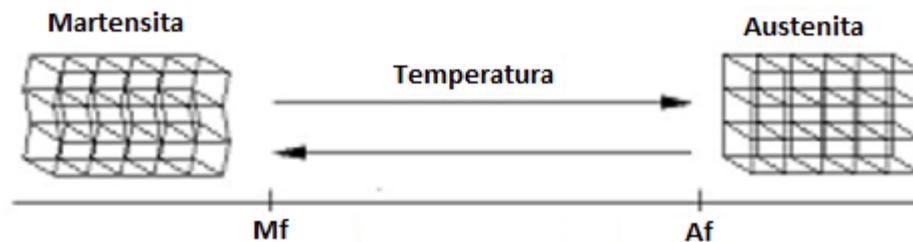


Figura 3 – Transformações de estado das LMF.

É importante observar que, se a liga encontra-se no estado de austenita, esta sofre deformação; e com a ausência da tensão mecânica, a liga volta a sua forma original. Já no outro caso, a liga estando em temperatura baixa (estado de martensita) e cessando-se uma tensão mecânica que previamente causou deformação, ela não retorna ao seu estado original, permanecendo ainda com uma deformação notável (VALENZUELA, 2005).

### 2.4. Atuadores e acionamento

A plataforma possui dois formatos de liga como atuadores: uma fita metálica, de seção retangular e um fio, de seção circular, cujas dimensões são, respectivamente, 68cm x 0,7mm x 0,04mm e raio de 0,095mm (área de 0,028mm<sup>2</sup>).

Para que a liga dilate ou contraia, basta que esta seja percorrida por uma corrente elétrica, de forma controlada, para que a mesma não danifique o material de forma a perder suas propriedades elásticas. Desta maneira, os sinais elétricos são enviados à liga através de pulsos, utilizando o recurso de PWM (*Pulse Wide Modulation*). Assim, para variar a tensão ou corrente médias enviadas à LMF, basta mudar o valor do *duty cycle* deste sinal PWM, controlando assim a corrente/tensão enviadas de 0 a 100% do valor máximo.

O controle, então, é feito de duas formas: através de uma fonte de tensão ou de uma fonte de corrente. Embora os controles utilizem excitações diferentes, um fluxo único de dados é seguido. Desta forma, é possível dizer que o controle da liga inicia-se no



computador, com a requisição de dados obtidos pelos extensômetros. A placa NI PCI6036E recebe esses dados obtidos pela placa BNC 2110 e repassa ao programa para que os mesmos sejam tratados. Uma vez compilados, o programa envia um sinal de saída para a placa NI PCI6036E, que, através da BNC 2110, altera o valor do PWM e, conseqüentemente, o pulso de corrente ou tensão que sai das fontes para a liga. Um esquema desse fluxo de informações é apresentado na Figura 4.

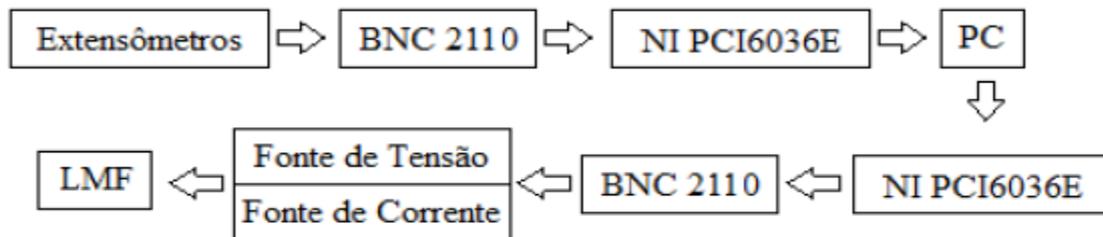


Figura 4 – Representação do fluxo de controle da LMF.

## 2.5. Controladores

O controlador utilizado neste experimento é o controlador PI (Proporcional Integral). Este possui uma boa resposta para este tipo específico de sistema, onde a resposta não necessariamente precisa ser rápida, excluindo a necessidade de um controlador Derivativo.

O método escolhido para implementação do controlador foi o Método de Cancelamento de Pólos, onde o pólo mais lento da função de transferência em malha aberta do sistema é cancelado com zeros do controlador (PEQUENO, 2012). As equações, então, utilizadas para calcular os parâmetros do controlador neste experimento são:

$$T_i = T_p \quad (1)$$

$$K_p = K_i T_p \quad (2)$$

onde,

$$K_i = \frac{1}{4t_d K} \quad (3)$$

onde,  $T_p$ ,  $t_d$  e  $K$  são os valores obtidos para as constantes do sistema utilizando o *software* MATLAB.

## 3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O primeiro passo para a realização do experimento deve ser a identificação da planta do sistema a ser controlado. Isto é feito criando valores de entrada/saída inicialmente, para excitação da plataforma de testes. Na Figura 5 apresenta-se a *interface* homem-máquina (IHM) utilizada, criada com o *software* LabVIEW (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010) para excitação da plataforma de modo a encontrar um modelo para o sistema em estudo.

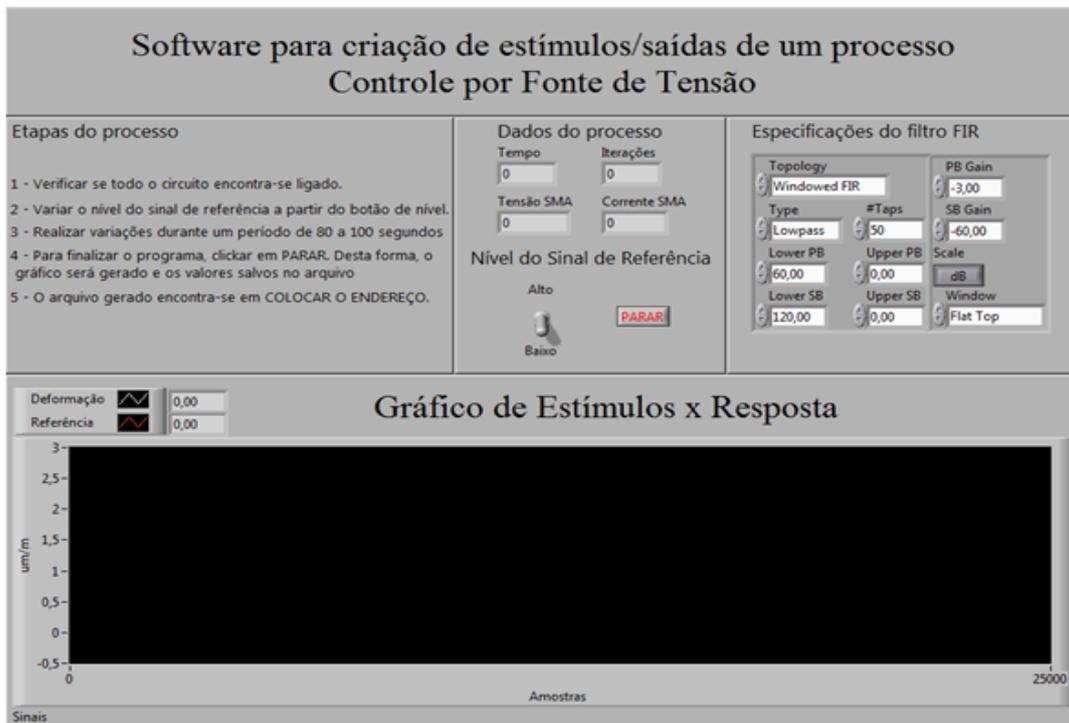


Figura 5 – Tela da *interface* desenvolvida no LabVIEW para criação de estímulos/respostas.

Assim, executa-se a IHM e varia-se o nível de sinal com o botão de nível, de forma a criar um sistema único para cada realização do experimento. O tempo de execução deve variar entre 25 e 35 segundos, de forma que estes são suficientes para a realização deste teste. Para finalizar a operação, deve-se clicar no botão PARAR, para que o gráfico obtido possa ser gravado em disco (a partir da tela aberta do MATLAB) e os dados de estímulo/resposta serão gravados em um arquivo.

O próximo passo para realização do experimento será abrir o MATLAB e importar os valores obtidos no programa anterior, como apresentado na Figura 6, através do botão *Import Data*, em *Workspace*.

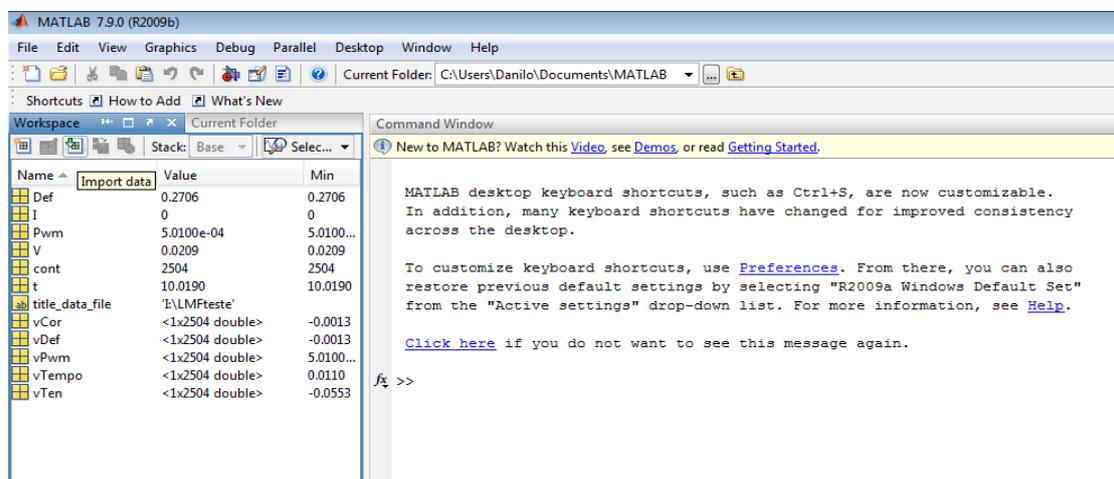


Figura 6 – Representação do botão *Import data* no MATLAB.

Uma vez importados os valores, deve-se executar o comando *ident* no MATLAB. A seguinte tela (Figura 7) irá aparecer. O aluno deve clicar em *Import Data* e, em seguida, selecionar *Time domain data*.

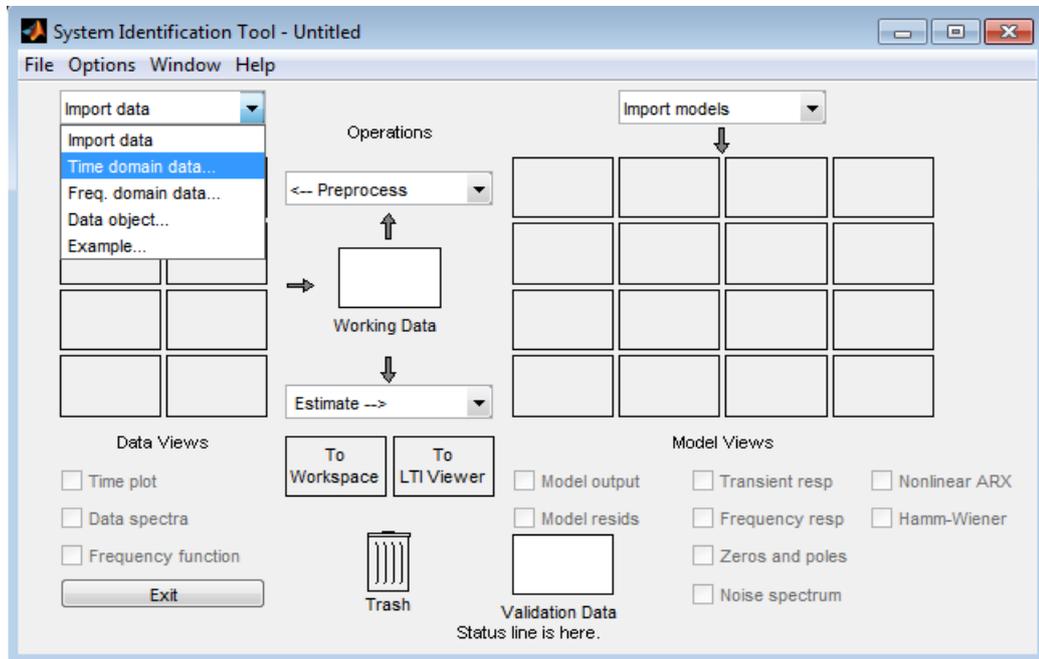


Figura 7 – Representação da tela principal da função *ident* no MATLAB.

A seguinte tela irá aparecer (Figura 8). Os valores de *input* e *output* devem ser preenchidos com os nomes das variáveis de estímulo e resposta, respectivamente, *vTen* (sinal de referência) e *vDef* (resposta – deformação). Uma vez digitados, deve-se clicar em *Import*.

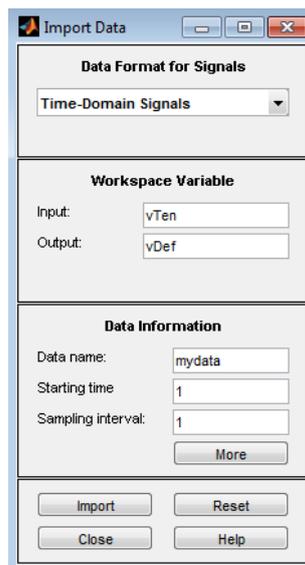


Figura 8 – Representação do *Import Data* interface.

Em seguida, na tela da Figura 7 ainda, deve-se clicar em *Estimate* e selecionar *Process Models*. É neste momento onde se definem os parâmetros do modelo a ser gerado (ordem, número de zeros, pólos, etc.). O nome do modelo gerado encontra-se no canto esquerdo inferior, como representado na Figura 9. Como nenhum valor necessita ser alterado neste experimento, basta clicar em *Estimate*. É importante notar que o modelo deve ser do tipo dado na Equação (4), que é um modelo de primeira ordem com atraso.

$$G(s) = \frac{K e^{-st_d}}{1 + sT_p} \quad (4)$$

onde  $K$  é o ganho,  $t_d$  é o atraso e  $T_p$  é a constante de tempo do sistema.

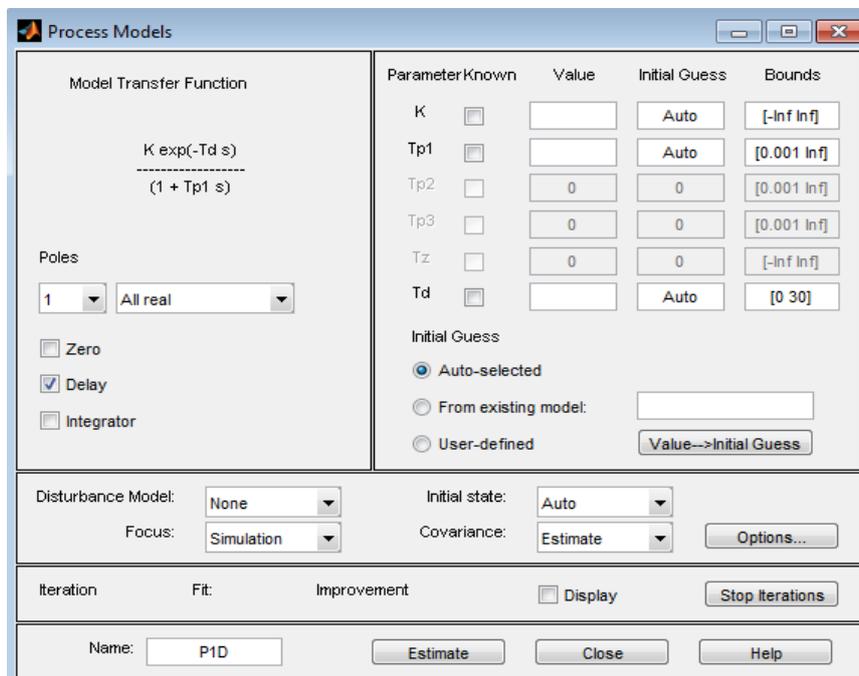


Figura 9 – Representação da tela para definição de parâmetros do modelo.

Os valores de  $K$ ,  $T_{p1}$  e  $T_d$  aparecerão em seus respectivos campos. Estes valores, quando substituídos na Equação (4), representam o sistema identificado. Estes devem ser anotados, uma vez que serão essenciais no cálculo do controlador.

Os valores de  $T_{p1}$  e  $T_d$  estão em unidade de amostras. Para transformá-los em unidade de segundos, deve-se dividi-los pela taxa de amostragem, utilizando os valores das variáveis do MATLAB “tempo” e “amostras”. Um exemplo desta modificação encontra-se nas Equações (5) a (7).

$$\text{Taxa de amostragem} = \text{amostras/tempo} \quad (5)$$

$$T_p(\text{em segundos}) = \frac{T_p(\text{obtido no MATLAB})}{\text{Taxa de amostragem}} \quad (6)$$

$$T_d(\text{em segundos}) = \frac{T_d(\text{obtido no MATLAB})}{\text{Taxa de amostragem}} \quad (7)$$

Em seguida deve-se clicar em *Model Output* (tela da Figura 7), para verificar a compatibilidade do modelo gerado, gravando o valor e o gráfico de comparação.

Uma vez identificado o sistema, finalmente chega-se à parte de cálculo do controlador. As Equações utilizadas para o cálculo das constantes  $K$ ,  $T_i$  e  $T_d$  são feitas a partir das equações (1) a (3), após a conversão dos valores do MATLAB para unidades de segundos.

Uma vez calculados os parâmetros do controlador, deve-se executar um programa criado no *software* LabVIEW para controlar o sistema em estudo. É importante lembrar que os valores dos parâmetros  $T_i$  e  $T_d$  estão em minutos. Na Figura 10 apresenta-se a *interface* do programa criado no LabVIEW para verificar o efeito do controlador sobre o sistema.

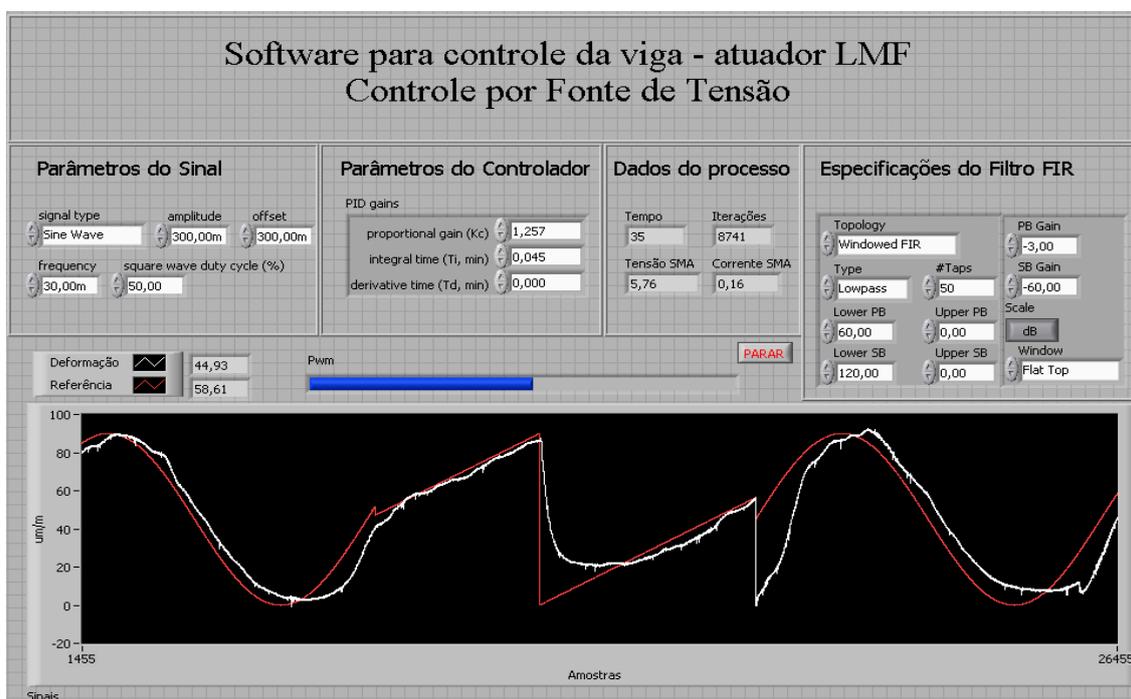


Figura 10 – Representação da *interface* com o comportamento do sistema.

Análoga a IHM anterior, deve-se executar o programa de controle em um intervalo de tempo entre 25 e 35 segundos. Uma vez executado, deve clicar em PARAR para que o gráfico seja gerado e possa ser gravado em disco.

Para diferentes testes, o tipo de sinal (*signal type*) deve ser modificado, de modo a testar a plataforma com diferentes tipos de sinal de referência (onda quadrada, onda triangular, etc.). Há também a possibilidade de adicionar cargas à barra, de massa 50g cada, para gerar perturbações ao sistema.

#### 4. RESULTADOS DOS TESTES

Após concluídas as etapas anteriores com o condicionamento dos sinais, tanto para leitura dos sensores quanto para acionamento do atuador, foram implementados controladores PI com sintonia dos parâmetros, utilizando o programa desenvolvido com o LabVIEW. O sistema foi submetido a diversos tipos de excitação, e assim os sinais de entrada foram variados entre onda senoidal, onda quadrada e onda triangular, repetindo

todos os ensaios para os três tipos de onda de excitação. Os resultados são apresentados nas Figuras 11 a 13.

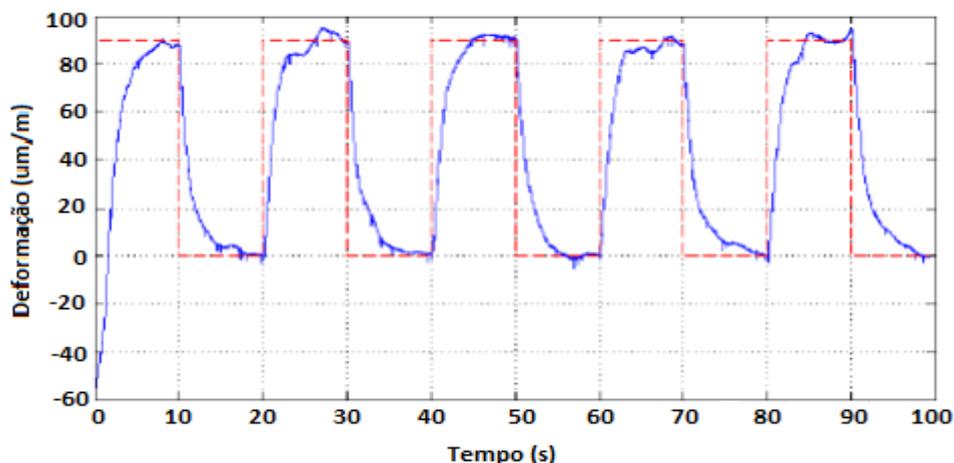


Figura 11 – Controlador com sintonia automática, referência: onda quadrada (tracejado) e deformação da viga (linha sólida).

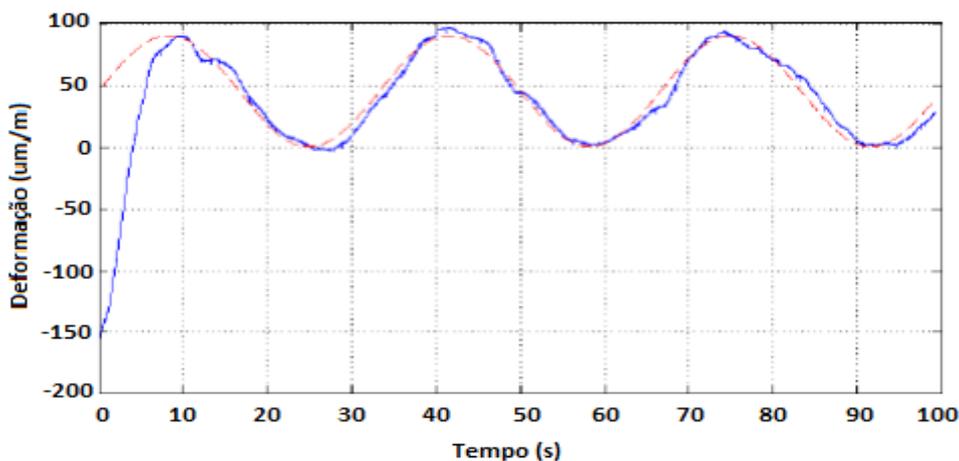


Figura 12 – Controlador com sintonia automática, referência: onda senoidal (tracejado) e deformação da viga (linha sólida).

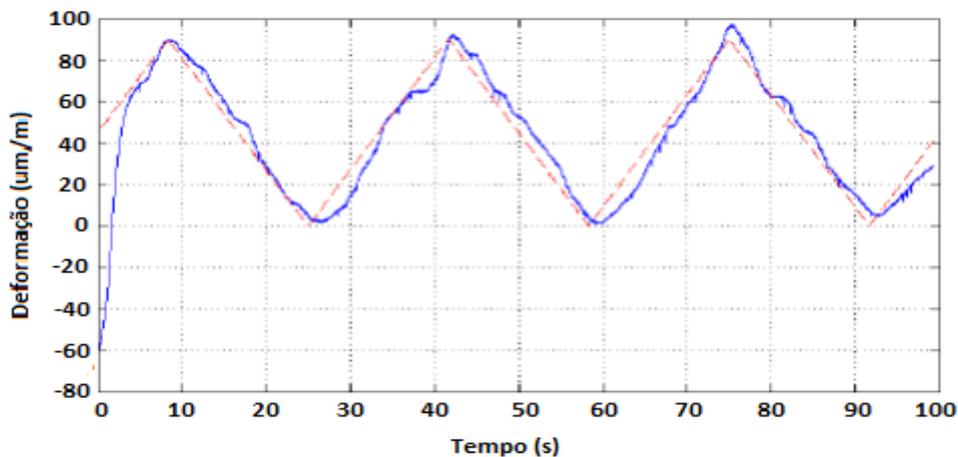


Figura 13 – Controlador com sintonia automática, referência: onda triangular (tracejado) e deformação da viga (linha sólida).



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foi apresentado um guia de experimento elaborado para análise e controle de uma plataforma com uma viga engastada controlada por uma LMF como também foram apresentadas informações sobre as ligas com memória de forma, sobre a plataforma de testes e sobre o método de identificação e controle da mesma.

Desta forma, os alunos podem fazer uma análise das etapas do processo, desde a identificação do sistema, até a resposta obtida do controlador, enumerando possíveis erros e formas de corrigi-los.

Para alcançar os objetivos propostos, utilizou-se uma plataforma de testes, em que uma viga de aço está simplesmente engastada à uma coluna e contém uma fita/fio de LMF na extremidade oposta. Colados nas faces superior e inferior desta viga, foram instalados extensômetros de resistência elétrica unidirecionais, de modo que foi possível adquirir dados de deformação da viga. Nas extremidades do fio de LMF, foram conectados terminais elétricos por meio dos quais foi enviado o sinal de atuação.

De acordo com o exposto neste trabalho, mostrou-se que é possível implementar a técnica PI de controle de malha fechada usando um programa que foi desenvolvido com o *software* LabVIEW, uma vez que o sistema foi identificado com os dados referentes a excitação e saída do sistema via MATLAB.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EXCEL SENSOR. **Fator de Sensibilidade de Extensômetros Coláveis de Resistência Elétrica.** [S.l.], 2010.

FARIA, V. A.; SILVA, E. P. da. **Controle da frequência natural em vigas compósitas com fios de sma.** *Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, Dezembro, 2006.

LIMA, W. M. **Plataforma para Análise Comportamental de Atuadores de ligas com Memória de Forma e para Controle de Deformação de uma Barra Flexível**, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

MOALLEM, M.; LU, J. **Application of shape memory alloy actuators for flexure control: theory and experiments.** *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, v. 10, n. 5, p. 495 – 501, oct. 2005. ISSN 1083-4435.

NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW Product Information: What is NI LabVIEW?** [S.l.], 2010.

PEQUENO, A. A. P. **Aplicação de Métodos de Controle em uma Estrutura Ativa de Viga Engastada com Atuador de Liga com Memória de Forma**, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

REIS, R. P. B. dos. **Desenvolvimento de um equipamento para caracterização térmica de atuadores de ligas com memória de forma usando o efeito termoeletrico.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.



ROCHA, T. L. da. *Modelagem de Estruturas Inteligentes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira -SP, 2004.

SUZUKI, Y.; KAGAWA, Y. **Active vibration control of a flexible cantilever beam using shape memory alloy actuators**. *Smart Materials and Structures*, Julho 2010.

VALENZUELA, W. A. **Sistema de articulação atuado por meio de liga com memória de forma**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

## **DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENT GUIDE FOR ANALYZE AND CONTROL OF A TEST PLATFORM WITH CANTILEVER BEAM**

**Abstract:** *This article presents the development of an experiment guide with the purpose of study a test platform with cantilever beam. Through this guide, the student can apply the previous knowledge about strain gauges sensors for create a control strategy and implement in a actuator, in this case, the SMA (Shape Memory Alloy).*

**Key-words:** *Experiment Guide, Test Platform, Cantilever Beam, Sensors, Shape Memory Alloy.*