

## IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMA NÃO-LINEAR UTILIZANDO REDES NEURAIAS PARA ATUADORES COM MEMÓRIA DE FORMA

Lucas Nicolau, Cícero Souto  
Universidade Federal da Paraíba, lucasnicolau@gmail.com  
Universidade Federal da Paraíba, cicerosouto@cear.ufpb.br

### Introdução

A capacidade de recuperação de forma das ligas níquel-titânio foi observada por Buehler e Wiley em 1962 quando estudavam a transformação da fase martensita destas ligas (OLIVEIRA, 2013). A partir desta descoberta as ligas metálicas que apresentam este comportamento foram nomeadas de Ligas com Memória de Forma (LMF). Este efeito de memória de forma permite ao material recuperar elevadas deformações plásticas na presença da fase martensita através da transformação de fase induzida por temperatura para a fase austenita. Utilizando esta característica única diversos atuadores inteligentes foram desenvolvidos para aplicações nas áreas da engenharia mecânica, civil, biomédica e aeronáutica (WANG, 2014). Entretanto, nestas aplicações, a LMF é exposta a diversos ciclos de transformação de fase que geram mudanças na microestrutura do material.

Durante a ciclagem termomecânica, ocorre a formação da deformação plástica não reversível que altera o comportamento histórico e diminui a deformação máxima de transformação da liga com memória de forma (LAGOUDAS, 2008). Além disso, esta deformação permanente provoca o alongamento do atuador e conseqüentemente afeta o seu desempenho para um número elevado de ciclos. Com a finalidade de otimizar o processo de simulação e desenvolvimento de atuadores com memória de forma, uma rede neural artificial recursiva é proposta, em que, através de um treinamento supervisionado com conjunto de dados experimentais, aprende o comportamento não linear destes materiais.

O objetivo deste artigo é propor a modelagem do comportamento histéretico do material com memória de forma através de uma rede neural não linear auto regressiva com entrada exógena. A resposta experimental da LMF para mil ciclos será utilizada para o treinamento da rede neural e as respostas do modelo para a evolução da deformação, curva histerética em função da temperatura e previsão para mil e quinhentos ciclos será comparada com os dados coletados.

### Metodologia

Primeiramente foi realizado um procedimento experimental para a obtenção da variação da deformação e temperatura de um fio metálico de 305  $\mu\text{m}$  de diâmetro com uma composição de  $\text{Ni}_{52.95} - \text{Ti}_{47.05}$  porcentagem de massa, fornecida pela Memory Metalle Company. O fio foi recozido a uma temperatura de 450°C por uma hora, seguido de têmpera em água a temperatura ambiente. Posteriormente, o material foi submetido a um processo de treinamento sob um carregamento externo constante de 200MPa, que visou induzir uma quantidade significativa de deformação plástica irreversível no material com memória de forma.

Após o treinamento, foi realizado uma ciclagem térmica, processo repetitivo de aquecimento e resfriamento, sob uma tensão constante de 100 MPa para uma quantidade de mil e quinhentos ciclos de transformação de fase. É importante destacar que mesmo com a utilização do treinamento foi observado a formação de deformação residual, porém em proporções relativamente menores. O deslocamento linear do fio de memória de forma é medido através de um Transformador Diferencial Variável Linear, LVDT, enquanto que a temperatura é obtida utilizando um termopar do tipo K fixado no centro do atuador. Além disso, O material foi aquecido através do Efeito Joule, ou seja, uma corrente elétrica constante é aplicada por um período de modo a aquecer o fio e o resfriamento ocorre de maneira natural. Por fim, os dados são armazenados num computador pessoal através de um sistema de aquisição NI cRIO-9076 da National Instruments.

Os dados de temperatura e deformação de mil ciclos de transformação de fase, obtidos experimentalmente, são fornecidos à rede neural dinâmica recursiva. Esta rede utiliza um modelo não linear auto regressivo com entradas exógenas, ou seja, a previsão da deformação do atuador é obtida utilizando uma regressão de valores anteriores desta variável em conjunto com uma entrada externa que para este caso é a temperatura. Como o modelo é não linear, uma função de ativação tangente hiperbólica é empregada em conjunto com um algoritmo de treinamento do tipo regularização bayesiana para a minimização do erro de previsão a um valor admissível desejado.

A validação da capacidade da rede neural em aprender as mudanças histeréticas causadas pela deformação residual é realizada através da análise da previsão desta rede para a continuação da ciclagem térmica até número total de mil e quinhentos ciclos de transformação de fase. Para isto, é apresentada a resposta da deformação experimental e da rede neural em função do tempo total de ciclagem e em função da temperatura durante os ciclos térmicos.

## Resultados e discussões

Comparando a resposta da rede de deformação em função do tempo para os dados de treinamento é possível observar que os valores máximos e mínimos de deformação durante cada ciclo são identificados com elevada precisão, permitindo que a máxima deformação de transformação do atuador seja reconhecida. Além disso, os resultados em função da temperatura indicam que a rede neural aprende satisfatoriamente o comportamento histerético do material com memória de forma, apresentando apenas um erro mais acentuado durante o processo de aquecimento.

A previsão da resposta para um número de ciclos maior do que o do treinamento apresenta um declínio de desempenho conforme o aumento do número de ciclos. Em relação a previsão da deformação máxima através da análise função do tempo, é observado um erro aceitável visto que o comportamento da liga com memória de forma é complexo e sensível a variações no tempo de funcionamento, carregamento externo e temperatura de aquecimento. Entretanto, a performance da identificação da histerese do material degrada significativamente para cada ciclo de transformação e conseqüentemente apresenta um erro elevado na previsão para o milésimo quingentésimo ciclo. Por fim, é possível afirmar que a rede neural recursiva proposta possui a capacidade de identificar comportamentos não lineares com elevada complexidade como por exemplo o de ligas com memória de forma e pode ser utilizada para a previsão de alguns ciclos a frente dos dados fornecidos para o treinamento.

## Conclusões

Os atuadores de memória de forma podem produzir movimento linear através de ciclos térmicos induzidos por corrente elétrica. Entretanto, estes atuadores possuem limitações quanto à formação de deformação residual durante a repetitiva transformação de fase entre a martensita e austenita. Portanto, este trabalho apresenta a utilização de redes neurais artificiais recursivas para a identificação e previsão das mudanças histeréticas e de máxima deformação de transformação causadas por estas deformações irrecuperáveis. O modelo não linear auto regressivo com entradas exógenas permite aprender satisfatoriamente o comportamento destas ligas para mil ciclos de transformação e a previsão com um erro aceitável para aproximadamente mais duzentos e cinquenta ciclos. Finalmente, este modelo de rede neural pode ser usado para o desenvolvimento de controladores preditivos e para o projeto de atuadores com memória de forma.

**Palavras-Chave:** Materiais com Memória de Forma, Redes Neurais Artificiais, Identificação de Sistemas.

## Referências

- LAGOUDAS, D. C. **Shape memory alloys: modelling and engineering applications**. Nova York: Springer, 2008.
- OLIVEIRA, S. A. **Modelagem termomecânica de ligas com memória de forma em um contexto tridimensional**. Tese de Doutorado – COPPE/ Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.
- WANG, H. SONG, G. Innovative NARX recurrent neural network model for ultra-thin shape memory alloy wire. *In: Neurocomputing*, v.134, p. 289–295, jan. 2014.