

# Determinação da Deformação Inicial de um Atuador Polimérico Bobinado

Ellen Ribeiro Lucena\* Saulo O. D. Luiz\*,\*\*  
João R.C. de Araújo\*\* Antonio M. N. Lima\*,\*\*

\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, (e-mail:

ellen.lucena@ee.ufcg.edu.br, {saulo, amnlima}@dee.ufcg.edu.br)

\*\* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, (e-mail: joao.araujo@ee.ufcg.edu.br)

**Abstract:** This paper aims at proposing a method for determining an optimum initial stretching for a Coiled Polymer Actuator (CPA) subject to constraints. An analytical approach is adopted for determining steady state solutions of the system dynamic model, which is composed of a thermoelectric model and a thermomechanical model. The model parameters were estimated from experimental data acquired from a real actuator. An algorithm is proposed for determining the optimum initial stretching. The result of such algorithm was verified using computer simulations of the system dynamic model. The present study shows that it is possible to analytically determine an optimum initial stretching for a CPA subject to constraints.

**Resumo:** Este artigo tem como objetivo propor um método para determinar uma deformação inicial ótima para um Atuador Polimérico Bobinado (CPA), sujeito a restrições. Uma abordagem analítica é adotada para determinar soluções em estado estacionário do modelo dinâmico do sistema, composto por um modelo termoeletrônico e um modelo termomecânico. Os parâmetros do modelo foram estimados por meio de dados experimentais adquiridos a partir de um atuador real. Um algoritmo é proposto para determinar a deformação inicial ótima. O resultado obtido para o algoritmo foi verificado por meio de simulações computacionais do modelo dinâmico do sistema. O presente estudo mostra que é possível determinar analiticamente uma deformação inicial ótima para um CPA, sujeito a restrições.

*Keywords:* Actuator; nylon; deformation; model; algorithm.

*Palavras-chaves:* Atuador; nylon; deformação; modelo; algoritmo.

## 1. INTRODUÇÃO

Até 1932 quando Arne Olander descobriu o efeito de memória de forma Kirkland (2010), as opções de dispositivos para converter outros tipos de energia em movimento estiveram limitadas a motores, cilindros hidráulicos e pneumáticos e a algumas variações deles. Recentemente, contudo, o surgimento de novas demandas tecnológicas, especialmente em áreas como robótica e automação, têm motivado a descoberta e ascensão de novos dispositivos. Por exemplo, Haines et al. (2014) que mostrou que com linhas de pesca e de costura, de nylon, é possível fabricar atuadores baratos e muito semelhantes ao músculo biológico por atuar com suavidade.

Ao ser submetido a um aumento de temperatura, o fio de nylon sofre uma dilatação radial que provoca uma pequena contração axial. Por ser um polímero com memória de forma, ele pode ser modelado para obter uma contração ainda maior. Uma forma que proporciona isso é o modelo bobinado, como na Figura 1, chamado, entre outros nomes, de Atuador Polimérico Bobinado [*Coiled Polymer Actuator* (CPA)]. Ele sofre uma contração axial de 10 a 20 % do seu

tamanho original em menos de 30 ms em alguns casos (Yip and Niemeyer (2015)), transformando energia térmica em energia cinética. Em contrapartida, quando submetido a uma temperatura inferior a ambiente, ele relaxa.

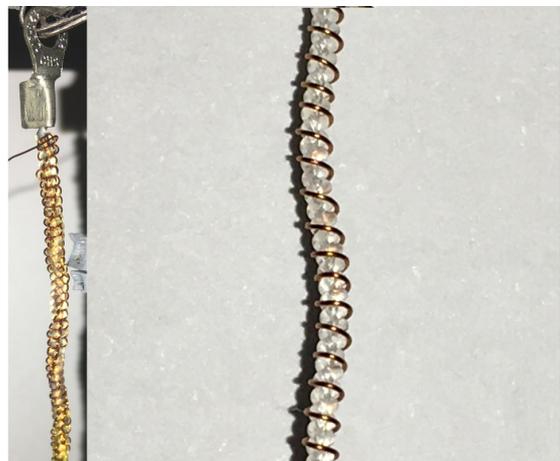


Figura 1. Atuador de nylon bobinado envolto com fio de cobre.

\* Esse trabalho foi apoiado por PPgEE/UFCG e CAPES.

Em pesquisa para o controle de posição do CPA, Arakawa et al. (2016) mostram que se faz necessário adicionar um peso extra à extremidade do atuador, que cause um deslocamento inicial, para que ele contraia adequadamente. Uma vez que, para contrair ele tem que sair da posição de relaxamento em que todas as bobinas já estão próximas umas das outras ao máximo, como na Figura 2 (a). Assim, ao desejar que a contração do atuador seja máxima, é proveitoso fazer um estudo de qual deslocamento inicial proporcionaria isso e a carga extra responsável por tal.

Dessa forma, Arakawa et al. (2016) realizaram um experimento acoplando uma massa ao atuador, que foi submetido a uma temperatura em torno de  $150^{\circ}\text{C}$ . O deslocamento foi medido quando este contraiu. Esse procedimento foi feito para sete massas diferentes aplicando-se em todos os casos a mesma variação térmica ao dispositivo. Esses autores verificaram experimentalmente que, para uma determinada massa, obteve-se um deslocamento máximo do CPA. No entanto, não houve a realização de um estudo analítico de dimensionamento da posição inicial, de modo que os resultados podem não ter indicado a posição que proporcionasse a máxima contração do atuador.

Pesquisas realizadas em atuadores, seja qual for a forma de atuação, buscam encontrar condições que contribuam para otimizar o desempenho do dispositivo. Messine et al. (1998) desenvolveram um algoritmo que otimiza o projeto de atuadores eletromecânicos. Diferentemente de trabalhos que abordam a otimização de forma empírica e intuitiva, esses autores propõem uma formulação totalmente voltada para a otimização desde o início. Em se tratando de atuadores poliméricos bobinados, apesar de haver abordagens empíricas e intuitivas, a proposição formal de otimização de parâmetros de atuação ainda é escassa.

Por isso, neste artigo, propõe-se uma solução para o problema de otimização do deslocamento máximo do CPA. Mediante o dimensionamento da posição inicial ótima, demonstra-se uma formalização do problema, apresentando as restrições que devem ser consideradas, e formula-se um algoritmo de busca da melhor posição inicial para o atuador. Considerou-se o modelo não linear proposto por Araújo et al. (2019), apresentado na seção seguinte. Os experimentos sugeridos por esses autores foram realizados enrolando-se fio de cobre no atuador de nylon, e aplicando uma corrente elétrica para aquecê-lo por efeito joule. Por meio dos resultados destes experimentos, estimou-se parâmetros para o modelo adotado.

### 1.1 Revisão Bibliográfica

A fabricação do CPA consiste em torcer o fio de nylon até que ele fique completamente bobinado. Para isso, autores como Almeida et al. (2018) desenvolveram plataformas de fabricação para facilitar e padronizar o processo. Em alguns métodos, após enrolado, o fio é submetido a dez ciclos de aquecimento para memorizar a forma. Nesta pesquisa, depois de pronto, o atuador foi submetido a experimentos de estimação e validação dos parâmetros do modelo proposto por Araújo et al. (2019), apresentado na seção seguinte.

## 2. MODELO DO ATUADOR

Para a análise do CPA, neste trabalho é considerado o sistema apresentado na Figura 2, composto por um atuador preso verticalmente por uma das extremidades a uma base fixa. Inicialmente, sem massa, ele está relaxado, como na Figura 2(a). Em seguida, ao acoplar uma massa  $m$  à extremidade livre do atuador, ele sofre uma deformação elástica  $x_0$  e repousa em uma nova posição de equilíbrio, Figura 2(b). Ao submetê-lo a uma corrente, ele é aquecido, surgindo uma força térmica, que provoca a contração de modo que ele assume uma nova posição  $x$ , Figura 2(c). Neste artigo, o deslocamento elástico  $x_0$  é denominado *deformação inicial*.

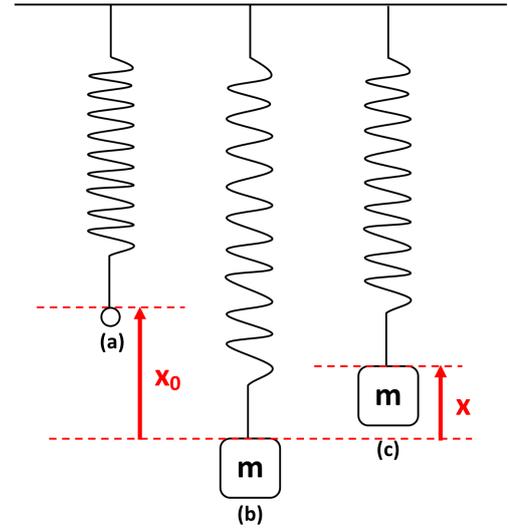


Figura 2. Sistema Massa-Atuador: (a) atuador livre de carga; (b) atuador com carga; (c) atuador com carga e corrente não nula.

### 2.1 Modelo Termoelétrico

O modelo termoelétrico é representado em (1), onde a entrada  $i$  (A) é a corrente que aquece o atuador por efeito Joule, a saída  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) é a temperatura do nylon,  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) é a temperatura ambiente,  $C$  ( $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ ) é a capacidade térmica,  $G$  ( $\text{J}/^{\circ}\text{C}\text{s}$ ) é a condutividade térmica, e  $r_e$  ( $\Omega$ ) é a resistência elétrica do condutor. Estas duas últimas grandezas são funções da temperatura, como representado em (2) e (3), em que  $\alpha$  e  $r_0$  são, respectivamente, o coeficiente de temperatura do fio e a resistência elétrica do condutor à temperatura ambiente.

$$\dot{T} = \frac{i^2 r_e(T)}{C} - \frac{G(T)}{C}(T - T_a) \quad (1)$$

$$r_e(T) = r_0[1 + \alpha(T(t) - T_a)] \quad (2)$$

$$G(T) = G_0 + G_1 T. \quad (3)$$

Em (3),  $G_0$  e  $G_1$  são os parâmetros de condutividade térmica que constituem a função linear de  $G(T)$ , sendo  $G_0$  ( $\text{W}/^{\circ}\text{C}$ ) o coeficiente constante, e  $G_1$  ( $\text{W}/^{\circ}\text{C}^2$ ) o variável.

## 2.2 Modelo Termomecânico

Analisando o modelo termomecânico desse sistema, têm-se a atuação da força peso ( $F_L = -mg$ , onde  $g$  é a aceleração da gravidade), da força elástica do atuador ( $F_K(x) = \beta_1(x_0 - x)^{\beta_2}$ , onde  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são parâmetros), da força térmica devido ao aquecimento por efeito Joule ( $F_T(T) = \beta_3(T - T_a)^{\beta_4}$ , onde  $\beta_3$  e  $\beta_4$  são parâmetros) e da força de atrito dinâmico que atua sobre a massa quando em movimento ( $F_D(\dot{x}) = -\beta_5\dot{x}$ , onde  $\beta_5$  é um parâmetro). Assim, o modelo termomecânico pode ser representado em (4).

$$m\ddot{x} = F_T(T) + F_K(x) + F_L + F_D(\dot{x}) \quad (4)$$

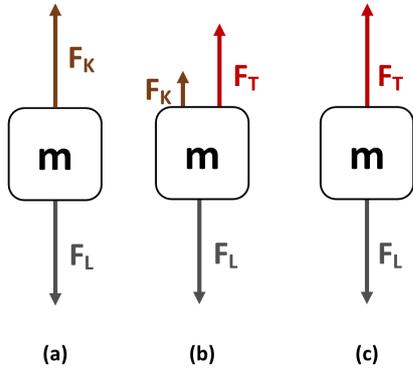


Figura 3. Diagramas de forças: (a) na deformação inicial em que não há contração do atuador, i.e.  $x = 0$ ; (b) no ponto de equilíbrio em que  $0 < x < x_0$ ; e (c) no ponto de equilíbrio em que o atuador sofreu uma contração máxima, i.e.  $x = x_0$ .

Analisando as forças atuantes no ponto de equilíbrio ( $x = 0$ ,  $\dot{x} = 0$  e  $\ddot{x} = 0$ ) apresentado na Figura 3(a), percebe-se que as únicas forças atuantes são a força peso e a força elástica. Assim,

$$F_K(x) + F_L = 0. \quad (5)$$

Substituindo as expressões de  $F_K(x)$  e  $F_L$  em (5), temos

$$\beta_1(x_0 - x)^{\beta_2} = mg. \quad (6)$$

Visto que, na Figura 3(a) não há contração do atuador,  $x = 0$ , tem-se

$$\beta_1(x_0)^{\beta_2} = mg. \quad (7)$$

No ponto de equilíbrio ( $0 < x < x_0$ ,  $\dot{x} = 0$  e  $\ddot{x} = 0$ ) apresentado na Figura 3(b), em que o atuador com carga foi submetido a uma corrente que o aquece por efeito Joule fazendo-o contrair, tem-se:

$$F_T(T) + F_K(x) + F_L = 0. \quad (8)$$

Substituindo as expressões de  $F_T(T)$ ,  $F_K(x)$  e  $F_L$  em (8), temos

$$\beta_3(T - T_a)^{\beta_4} + \beta_1(x_0 - x)^{\beta_2} - mg = 0. \quad (9)$$

Na Figura 3(c), há um ponto de equilíbrio ( $x = x_0$ ,  $\dot{x} = 0$  e  $\ddot{x} = 0$ ) em que o atuador contraiu ao máximo e por isso a força elástica é nula, permanecendo apenas a força térmica e o peso:

$$F_T(T) + F_L = 0 \quad (10)$$

Substituindo as expressões de  $F_T(T)$  e  $F_L$  em (10), temos

$$\beta_3(T - T_a)^{\beta_4} = mg. \quad (11)$$

## 3. ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO INICIAL DO ATUADOR

Sendo os modelos termoelétrico e termomecânico do CPA conhecidos, pode-se então determinar uma condição inicial para que o movimento de contração seja otimizado. Uma vez que a máxima contração é desejada e ela é função da deformação inicial do atuador, que no sistema em análise depende da massa acoplada, é possível encontrar um  $x_0$  denominado  $x_{0otimo}$  que permita essa contração ótima, como apresentado na Figura 4.

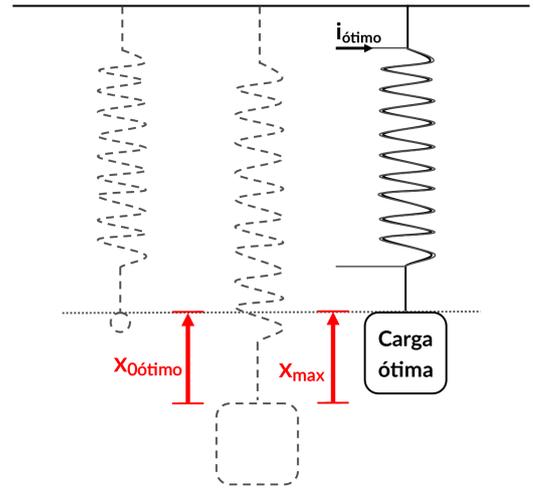


Figura 4. Atuador submetido à carga que proporciona a deformação inicial ótima, e à corrente, correspondente a este, que permitem a máxima contração.

### 3.1 Restrições

Neste trabalho, consideram-se as seguintes restrições do atuador:

- (1) Por meio da passagem da corrente elétrica pelo fio condutor em torno do nylon, só é possível aquecer o condutor por efeito Joule, não resfriá-lo, implicando que a temperatura do nylon é maior ou igual à temperatura ambiente. Se  $T \geq T_a$  então  $F_T(t) \geq 0$ , e (9) implica que  $x \geq 0$ .
- (2) Sabe-se experimentalmente que o atuador deve contrair apenas até a posição de relaxamento ( $x = x_0$ ), pois, se o atuador contrai além dessa posição, ele se

contorce, e não se contrai mais linearmente, na forma de segmento de reta. Isso estabelece uma restrição ao movimento de contração:  $x \leq x_0$ .

- (3) Caso uma massa  $m$  grande o suficiente seja acoplada ao atuador, a deformação inicial  $x_0$  determinada por meio de (7) provocará uma deformação plástica, deformando permanentemente o nylon. Portanto, a deformação inicial não pode ultrapassar o limite de deformação elástica  $x_{deform}$  que garante a integridade do dispositivo:  $x_0 < x_{deform}$ .
- (4) O nylon suporta uma temperatura limitada, acima da qual ele pode derreter. Uma vez que, quanto maior a massa acoplada, maior é a temperatura necessária para que a equação (10) seja satisfeita, é importante estabelecer a restrição  $T \leq T_{limite}$ , em que  $T_{limite}$  seria uma temperatura confiável para a qual o CPA não derreteria.

Portanto, as restrições de uso do atuador são:

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq x_0 \leq x_{deform} \\ T_a \leq T \leq T_{limite} \end{aligned}$$

### 3.2 Formulação do problema

*Caso 1* ( $T < T_{limite}$  e  $x_0 \leq x_{deform}$ ): Quando ocorre a máxima contração,  $x = x_0$ , a força elástica em (4) será nula e neste ponto o sistema está em equilíbrio, apresentado em (10). Substituindo (7) em (11), tem-se:

$$\beta_3(T - T_a)^{\beta_4} = \beta_1(x_0)^{\beta_2}. \quad (12)$$

Desse modo, para que a contração seja máxima, é necessário que a temperatura seja suficientemente grande para a força térmica se igualar em módulo à força peso. De (12), tem-se que essa temperatura  $T = T_{Xmax}$  é:

$$T_{Xmax} = \left( \frac{\beta_1}{\beta_3} x_0^{\beta_2} \right)^{\frac{1}{\beta_4}} + T_a. \quad (13)$$

Essa temperatura é atingida pelo atuador devido ao aquecimento por efeito Joule por uma corrente que pode ser obtida manipulando-se (1), em que, para o regime permanente ( $\dot{T} = 0$ ), tem-se:

$$\begin{aligned} i_{Xmax}^2 \frac{r_e(T)}{C} - \frac{G(T)}{C} (T_{Xmax} - T_a) = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow i_{Xmax} = \sqrt{\frac{G(T)}{r_e(T)} (T_{Xmax} - T_a)} \end{aligned} \quad (14)$$

Assim, para cada posição inicial a que o atuador for submetido, deve haver uma corrente  $i_{Xmax}$  que o proporcione contrair até a posição  $x_0$ .

Em resumo, para as restrições propostas e o modelo considerado, pode-se enunciar que existe um  $T$  menor que  $T_{limite}$  tal que a equação (9) é satisfeita para  $x = x_0$ :

$$\begin{aligned} \exists T < T_{limite} \text{ e } x_0 \leq x_{deform} \mid \\ \beta_3(T - T_a)^{\beta_4} + \beta_1(x_0 - x)^{\beta_2} - \beta_1(x_0)^{\beta_2} = 0 \Rightarrow x = x_0 \end{aligned} \quad (15)$$

*Caso 2* ( $T = T_{limite}$  e  $x_0 \leq x_{deform}$ ): Por outro lado, se a temperatura  $T = T_{limite}$  for menor que a temperatura que proporciona a contração máxima,  $T_{Xmax}$ , então existe um  $x < x_0$  tal que um ponto de equilíbrio é alcançado, determinado por (16):

$$\begin{aligned} \exists x < x_0 \leq x_{deform} \mid \\ \beta_3(T_{limite} - T_a)^{\beta_4} + \beta_1(x_0 - x)^{\beta_2} - \beta_1(x_0)^{\beta_2} = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow x = x_0 - \left( -\frac{\beta_3}{\beta_1} (T_{limite} - T_a)^{\beta_4} + x_0^{\beta_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}} \end{aligned} \quad (16)$$

Esta contração é atingida por meio de uma corrente  $i_{limite}$ :

$$i_{limite} = \sqrt{\frac{G(T_{limite})}{r_e(T_{limite})} (T_{limite} - T_a)} \quad (17)$$

*Conclusões parciais:* Na Figura 5 é apresentada a contração  $x$  do atuador em função da deformação inicial  $x_0$  para os Casos 1 e 2, e considerando-se que  $x_{otimo} < x_{deform}$ . O segmento de reta  $x = x_0$  onde  $0 \leq x_0 < x_{otimo}$  corresponde ao Caso 1, onde a corrente é  $i_{Xmax}$  definida em (14), a qual permite a máxima contração  $x = x_{max} = x_0$ , que é crescente com  $x_0$ . A deformação inicial ótima  $x_{otimo}$  é atingida para  $T = T_{limite}$  no caso específico da Figura 5 em que  $x_{otimo} < x_{deform}$ . O segmento de curva onde  $x_0 \geq x_{otimo}$  corresponde ao Caso 2, em que a temperatura atinge o valor limite  $T = T_{limite}$ , a corrente  $i_{limite}$  determinada em (17) permanece constante e a contração  $x$  determinada em (16) é decrescente com  $x_0$ .

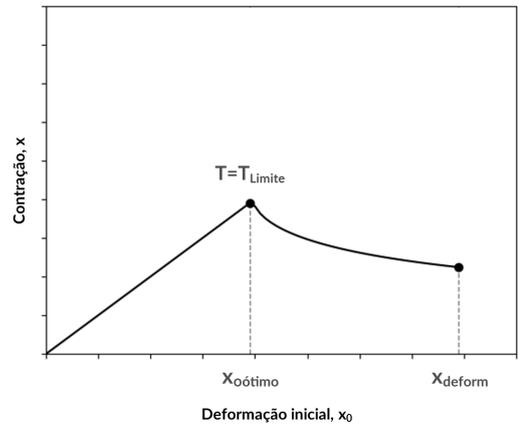


Figura 5. Contração  $x$  versus a deformação inicial  $x_0$ . A linha pontilhada horizontal corresponde ao limite de temperatura ao qual o atuador deve ser submetido. A primeira linha pontilhada vertical corresponde ao  $x_{otimo}$  e a segunda ao  $x_{deform}$ .

Assim, se a deformação inicial  $x_0$  for menor ou igual  $x_{deform}$  e for tal que a temperatura de máxima contração seja igual à temperatura limite, então este será o  $x_0$  ótimo. Substituindo  $T$  por  $T_{limite}$  e isolando  $x_0$  em (12):

$$\begin{aligned} \text{Se } x_0 = \left( \frac{\beta_3}{\beta_1} (T_{limite} - T_a)^{\beta_4} \right)^{\frac{1}{\beta_2}} \leq x_{deform} \text{ então} \\ x_{otimo} = x_0 \end{aligned} \quad (18)$$

Se existe uma deformação inicial  $x_0$  igual a  $x_{deform}$  e para a qual a temperatura correspondente à máxima contração é inferior à temperatura limite, então esse  $x_0$  é o  $x_{otimo}$ :

$$\text{Se } x_0 = x_{deform} < \left( \frac{\beta_3}{\beta_1} (T_{limite} - T_a)^{\beta_4} \right)^{\frac{1}{\beta_2}} \text{ então}$$

$$x_{otimo} = x_{deform} \quad (19)$$

### 3.3 Solução do Problema

Para encontrar o  $x_0$  que proporcionasse a máxima contração do atuador e a respectiva corrente, desenvolveu-se o Algoritmo 1. Inicialmente, as restrições apresentadas foram estabelecidas. Os valores correspondentes a cada restrição são obtidos experimentalmente e recebidos no algoritmo como dados.

**Entrada:**  $x_{deform}, T_{limite}, T_a$   
**Saída:**  $x_{otimo}, T_{otimo}, i_{otimo}$   
**Dados:**  $b_1, b_2, b_3, b_4, r_0, G_0, G_1$

$x_{otimo} = ((b_3/b_1) \cdot (T_{limite} - T_a)^{b_4})^{1/b_2}$ ;  
**se**  $x_{otimo} = x_{deform}$  **então**  
     $T_{otimo} = T_{limite}$  ;  
     $re = r_0 \cdot (1 + a \cdot (T_{otimo} - T_a))$  ;  
     $G = G_0 + G_1 \cdot T_{otimo}$  ;  
     $i_{otimo} = \sqrt{(G/re) \cdot (T_{otimo} - T_a)}$  ;  
**senão**  
    **se**  $x_{otimo} > x_{deform}$  **então**  
         $x_{otimo} = x_{deform}$  ;  
         $T_{otimo} = ((b_1/b_3) \cdot x_{otimo}^{b_2})^{1/b_4} + T_a$  ;  
         $re = r_0 \cdot (1 + a \cdot (T_{otimo} - T_a))$  ;  
         $G = G_0 + G_1 \cdot T_{otimo}$  ;  
         $i_{otimo} = \sqrt{(G/re) \cdot (T_{otimo} - T_a)}$  ;

**Algoritmo 1:** Cálculo do  $x_0$  que permite a máxima contração do atuador

Primeiro considerou-se a restrição do máximo deslocamento do atuador, em que  $x_{deform}$  é um dado. A segunda restrição considerada foi a da temperatura máxima a qual o atuador deve ser submetido, em que essa temperatura máxima  $T_{limite}$  também é um dado. Implementou-se (3), (2) e (14) para o cálculo da corrente limite.

Em seguida, considerando a restrição  $x \leq x_0$  de contração do atuador, calculou-se, para valores candidatos de  $x_0$ , a temperatura para que o  $x$  seja igual a  $x_0$ , como em (13), sendo as constantes  $\beta$  chamadas de  $b$ . A corrente correspondente também foi calculada, por (14).

Por fim, se o  $x_0$  for menor ou igual a  $x_{deform}$  e a corrente correspondente a ele for menor ou igual à corrente limite,  $x_0$  é considerado como ótimo. Essa análise é repetida até que as restrições sejam violadas.

## 4. ESTUDO DE CASO

Para obter dados de um atuador real que seriam posteriormente usados em simulação, realizou-se os experimentos propostos por Araújo et al. (2019). O atuador foi fabricado com nylon de 4mm de espessura, e 20cm de comprimento. Os valores estimados dos parâmetros do modelo termomecânico foram:

- $\beta_1 = 4.5828 \cdot 10^3$
- $\beta_2 = 1.4161$
- $\beta_3 = 4.3521 \cdot 10^{-2}$
- $\beta_4 = 1.1202$

- $\beta_5 = 1.2732$

Os valores estimados dos parâmetros do modelo termoelétrico foram:

- $\alpha = 3.0869 \cdot 10^{-3} [^{\circ}C^{-1}]$
- $r_0 = 0.5 [\Omega]$
- $G_0 = 4.1674 \cdot 10^{-2} [\frac{W}{^{\circ}C}]$
- $G_1 = 1.0248 \cdot 10^{-4} [\frac{W}{^{\circ}C^2}]$
- $C = 6.2343 \cdot 10^{-1} [\frac{J}{^{\circ}C}]$

Além disso, mediu-se a temperatura ambiente, que foi de  $T_a = 21.99^{\circ}C$ . A temperatura de fusão do nylon (poliamida 6) é de aproximadamente  $220^{\circ}C$ , no entanto, experimentalmente percebeu-se que submeter o atuador a temperaturas superiores a  $120^{\circ}C$  poderia causar danos à estrutura do dispositivo. Isso pode ser atribuído ao fato de o atuador ser enrolado em fio de cobre cujas bobinas podem não estar perfeitamente espaçadas. Assim, a temperatura em alguns pontos pode ser superior a de outros podendo atingir a fusão. O valor aproximado da posição inicial correspondente a uma carga máxima confiável para que o atuador não sofra deformação plástica foi obtido também experimentalmente:  $x_0 = 0.008m$  correspondente a 500g.

## 5. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO E DO MODELO

O algoritmo apresentado na Subseção 3.3 foi implementado na linguagem *Python*<sup>1</sup>. Para verificar o resultado do algoritmo, foram também realizadas simulações do modelo apresentado na Seção 2 utilizando-se os valores dos parâmetros apresentados na Seção 4 e estimados a partir de dados experimentais obtidos para o mesmo atuador. O modelo foi representado computacionalmente na forma de diagramas de blocos. Os diagramas dos modelos termoelétrico e termomecânico respectivamente em (1) e (4) são apresentados nas Figuras 6 e 7. A integração destes modelos é representada na Figura 8.

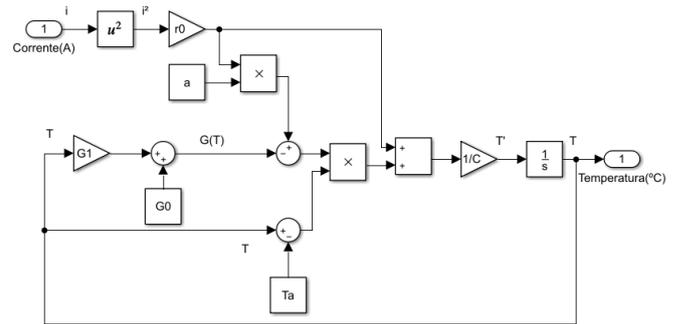


Figura 6. Modelo termoelétrico representado como diagrama de blocos.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do algoritmo à simulação de um atuador real demandou a obtenção dos valores de contração do

<sup>1</sup> Disponível em: <https://github.com/ellenribeiroLucena/Determinacao-da-Deformacao-Inicial-de-um-CPA>. Acesso em 12 set. 2020.

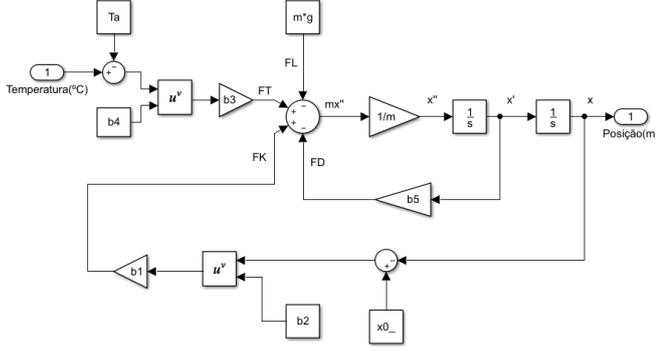


Figura 7. Modelo termomecânico representado como diagrama de blocos.

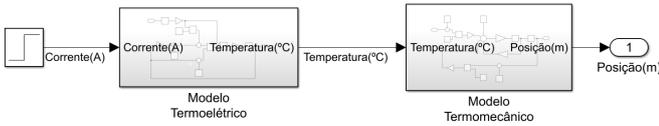


Figura 8. Integração dos modelos termoelétrico e termomecânico.

atuador,  $x$ , em função da posição inicial escolhida para cada ponto, que estão apresentados na Figura 9. A linha pontilhada no gráfico corresponde ao valor de  $x_{deform}$ , que coincide com o valor de  $x_{otimo}$  obtido:  $0.008m$  para uma corrente de  $2.3897A$  que aquece o condutor a  $89.8685^{\circ}C$ . Isso ocorreu porque a temperatura limite correspondia a um alongamento inicial maior que o  $x_{deform}$ , este portanto passou a ser o  $x_{otimo}$ , como no Algoritmo 1.

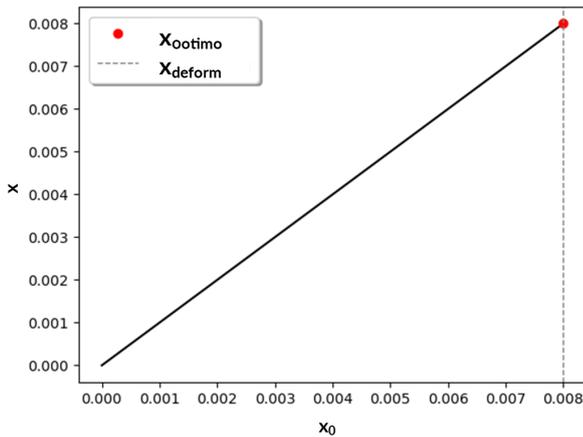


Figura 9. Gráfico da contração do atuador em regime permanente, versus a deformação inicial à qual foi submetido.

Foram realizadas simulações alterando-se o valor da massa acoplada  $m$  (que proporciona uma posição inicial correspondente), assim como o valor de corrente que permite a máxima contração do CPA, de modo que  $x = x_0$ , como apresentado na Tabela 1.

Na simulação do modelo de segunda ordem, percebe-se que os valores de corrente realmente garantiram uma contração

de  $x = x_0$ . Além disso, os valores de temperatura foram bem inferiores ao limite, de modo que a restrição usada como condição de parada para a simulação foi o  $x_{deform}$ . A maior contração observada foi a correspondente a  $x_0 = x_{deform}$ , destacada em cinza na tabela, que corresponde a aproximadamente  $0.008m$ , corrente de  $2.3897A$  e uma temperatura de  $89.8685^{\circ}C$ . Sendo assim, os valores de  $x_0$ ,  $T$  e  $i$  ótimos obtidos por meio da simulação computacional foram iguais aos do algoritmo implementado em *Python*.

$T(^{\circ}C)$	$i(A)$	$m(g)$	$x_0(m)$	$x(m)$
30.6846	0.8710	50	0.0016	0.0016
38.1288	1.184	100	0.0026	0.0026
45.1654	1.4151	150	0.0034	0.0034
51.9497	1.6054	200	0.0042	0.0042
58.5525	1.7698	250	0.0049	0.0049
65.0140	1.9161	300	0.0056	0.0056
71.3604	2.0487	350	0.0062	0.0062
77.6099	2.1705	400	0.0068	0.0068
83.7758	2.2837	450	0.0074	0.0074
89.8685	2.3897	500	0.0080	0.0080

Tabela 1. Deformação inicial do atuador ( $x_0(m)$ ) para diferentes cargas ( $m(g)$ ), corrente aplicada ( $i(A)$ ) e respectiva temperatura ( $T(^{\circ}C)$ ). Em que  $x(m)$  é a contração alcançada. Em cinza estão destacados os valores correspondentes à deformação inicial ótima.

## 7. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs uma solução para o problema de determinação da deformação inicial de um atuador polimérico bobinado. A solução proposta é representada na forma de um algoritmo, o qual foi testado com os parâmetros de um atuador real. Os resultados obtidos com o algoritmo foram comparados com os resultados obtidos por simulações dos modelos termoelétrico e termomecânico, verificando que a resposta do algoritmo se adequa ao modelo não linear apresentado. Para trabalhos futuros, considera-se a determinação da deformação inicial para o atuador linear antagonístico e a junta rotacional antagonística, além do dimensionamento do atuador para o atendimento de especificações de regime transitório.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro oferecido por PPgEE/UFCG, CAPES e CNPq.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, K., Luiz, S.O.D., Lima, A.M.N., and de Araújo, J.R.C. (2018). Experimental platform for characterizing a nylon thread thermomechanical actuator. *XXII Congresso Brasileiro de Automática*.
- Arakawa, T., Takagi, K., Tahara, K., and Asaka, K. (2016). Position control of fishing line artificial muscles (coiled polymer actuators) from nylon thread. *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*.
- Araújo, J.R.C., Luiz, S.O.D., Lima, A.M.N., and Almeida, K. (2019). Polymer fiber actuators: manufacturing, modeling and application on an antagonistic joint. *Anais do 14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, 1.

- Haines, C.S., Lima, M.D., Li, N., Spinks, G.M., Foroughi, J., Madden, J.D.W., Kim, S.H., Fang, S., de Andrade, M.J., Göktepe, F., Özer Göktepe, Mirvakili, S.M., Naficy, S., Lepró, X., Oh, J., Kozlov, M.E., Kim, S.J., Xu, X., Swedlove, B.J., Wallace, G.G., and Baughman, R.H. (2014). Artificial muscles from fishing line and sewing thread. *Science* 343, 6173, 868–872.
- Kirkland, K. (2010). *Chemistry: Notable Research and Discoveries*. Kindle, New York.
- Messine, F., Nogarede, B., and Lagouanelle, J.L. (1998). Optimal design of electromechanical actuators: A new method based on global optimization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34.
- Yip, M.C. and Niemeyer, G. (2015). High-performance robotic muscles from conductive nylon sewing thread. *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2313–2318.