

MODELAGEM E CONTROLE NÃO-LINEAR DE FORÇA PARA ATUADORES BASEADOS EM POLÍMEROS DIELÉTRICOS ELETROATIVOS

PEDRO F.C.B. ASSIS, MARCO A. MEGGIOLARO

*Laboratório de Robótica, Depto. De Engenharia Mecânica, PUC-Rio
Rua Marquês de São Vicente 225 Gávea, 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL
E-mails: prblois@gmail.com, meggi@puc-rio.br*

Abstract— Traditional actuation technologies, such as electric motors, have greater speed and force when compared to natural or artificial muscles, but their dimensions and weight are much larger. Therefore, traditional technologies demand a higher energy to be actuated. The use of systems actuated by electroactive polymers, on the other hand, can greatly reduce this energy requirement, as well as the overall weight. However, the control of such systems is not a trivial task, due to actuator non-linearities. This work presents a non-linear force control methodology for electroactive polymers based on dielectric elastomers (VHB4905). Experiments are performed on a specially developed test bench with a force transducer and the elastomer powered by a high voltage circuit (10kV maximum). It is shown that the proposed non-linear control results in a better step response when compared to a standard PID controller. The latter does not take into account the system non-linearities, therefore it cannot avoid oscillations in the step response when subjected to high voltages, close to the dielectric breakdown of the polymer. The effectiveness of the proposed control technique is proven experimentally.

Keywords— Dielectric Elastomers, Electroactive Polymers, Force Control.

Resumo— Os atuadores tradicionais utilizados em robótica possuem grande agilidade e força quando comparados a músculos naturais, porém suas dimensões e peso são elevados em relação à força que são capazes de exercer, além de demandarem muita energia para cumprir suas tarefas. Sistemas robóticos menores e mais baratos poderiam existir se pudessem utilizar polímeros dielétricos para impulsioná-los, reduzindo o consumo de energia e o peso próprio. No entanto, o controle destes sistemas não é uma tarefa trivial, devido às não-linearidades intrínsecas. Este trabalho apresenta uma metodologia para controle não-linear de força em polímeros dielétricos baseados no elastômero acrílico VHB4905. Experimentos são conduzidos em uma bancada de testes especialmente desenvolvida, contendo um sensor de força e o atuador polimérico acionado por um circuito de alta tensão (até 10kV). Demonstra-se que o controle não-linear proposto gera melhores resultados a entradas em degrau que um controle PID padrão, o qual não leva em consideração a não-linearidade e a alta sensibilidade do atuador quando submetido a tensões próximas da tensão de quebra do dielétrico. A eficácia da técnica de controle proposta é comprovada experimentalmente.

Palavras-chave— Elastômeros Dielétricos, Polímeros Eletroativos, Controle de Força.

1 Introdução

Polímeros eletroativos com características similares aos músculos biológicos são uma grande promessa para o desenvolvimento de sistemas biologicamente inspirados (o biomimetismo). Baixa rigidez e grandes deformações são algumas das características similares ao músculo natural. Eles geram sistemas mais flexíveis que aqueles acionados por motores convencionais, e podem agir como amortecedores de impactos e vibrações. Essas características habilitam o desenvolvimento de dispositivos mecânicos sem embreagens, rolamentos ou outros mecanismos responsáveis pelos grandes custos e complexidades (Bar-Cohen, 2003).

Uma área de aplicação onde essa tecnologia seria de suma importância é a próstética. Pessoas acidentadas que perderam um ou ambos os membros superiores enfrentam duas principais conseqüências. A primeira conseqüência é funcional, a partir do momento em que o amputado fica impossibilitado de exercer tarefas como manipular e segurar objetos. A segunda conseqüência é psicológica, pois a amputação modifica a sua aparência. Apesar dos anos de pesquisas e inovações, as próteses para mão, dispo-

níveis atualmente, não lidam com esses problemas adequadamente pois possuem atuadores grandes e pesados.

Uma tecnologia que propõe suprir as deficiências apontadas é a de polímeros ativos, em particular os DEAP - Polímeros Dielétricos Eletroativos - pois são leves, baratos, resilientes, silenciosos, de acionamento rápido, e necessitam de pouca potência.

Este trabalho tem como objetivo o estudo do controle de força de atuadores dielétricos poliméricos, com o auxílio de uma bancada de testes com sensor de força. Um controlador não-linear é proposto para melhorar a resposta do sistema a degraus. Na próxima seção, o princípio de atuação destes polímeros é descrito.

2 Polímeros Eletroativos (EAP)

Assim como nos músculos naturais, a força produzida por polímeros eletroativos (EAP) varia com o nível de estímulo. Resultados preliminares mostram que o valor máximo de tensão obtido por polímeros ativos, $800 \times 10^3 \text{ Nm}^{-2}$, situa-se acima da faixa de valores medidos para músculos naturais. A deformação para a qual esses materiais mostram maior potência, 2,5%, encontra-se próxima ao limite inferior

da faixa dos valores medidos para músculos naturais (Bar-Cohen, 2004). Deve-se levar em consideração que EAPs são capazes de deformações (quando estimulados) maiores que 100% (Pelrine et al., 2000).

Os atuadores EAP possuem a capacidade tanto de geração quanto de absorção de energia semelhante à dos músculos naturais. Uma potência máxima de $40 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ foi alcançada em um ciclo de 10Hz, com deformação de 2,5% a uma tensão de estímulo de 6kV (Bar-Cohen, 2004). Esses resultados mostraram que a potência gerada pelo atuador encontra-se dentro da fronteira dos valores para os músculos naturais quando próximos da ativação máxima.

Um tipo de atuador EAP em especial estudado neste trabalho é o Polímero Dieletrico Eletroativo (*Dielectric Electroactive Polymer - DEAP*). Este material consiste em uma fita adesiva acrílica de dupla face (VHB4905 da 3M), e é capaz de deformar bem mais de 100% (Wingert, 2002).

Os DEAP são atuados através de campos elétricos de alta intensidade pelo princípio do efeito capacitivo entre eletrodos flexíveis, compostos de uma graxa condutora aplicada em ambas as superfícies da fita VHB4905. Seu funcionamento como atuador pode ser explicado pela força de atração eletrostática (força de Maxwell) entre as placas do capacitor, formadas pela graxa condutora flexível depositada no polímero, gerada através da grande diferença de potencial aplicada nas mesmas (da ordem de kV). Isso ocorre devido às cargas elétricas opostas que se acumulam nas superfícies do dielétrico. Essa atração entre as superfícies do polímero comprime o mesmo na direção de sua espessura. Como esse material possui um coeficiente de Poisson muito próximo de 0,5 (o volume se conserva), as outras duas dimensões livres (comprimento e largura) expandem como mostra a Figura 1. Superposta a força de Maxwell, existe a força de repulsão entre cargas elétricas iguais existentes em cada eletrodo, contribuindo para a expansão das dimensões livres (Pelrine et al., 2000).

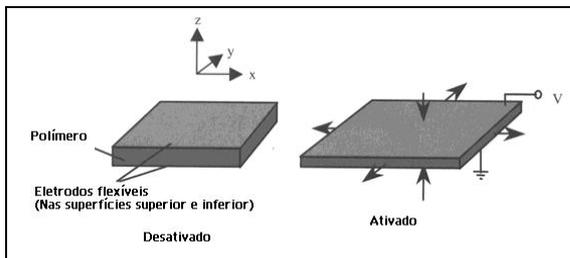


Figura 1: Princípio de operação de atuadores com polímeros dielétricos (Bar-Cohen, 2004).

A pressão efetiva responsável pela deformação do material durante a estimulação do atuador pode ser expressa pelo modelo eletrostático

$$P = \epsilon_r \epsilon_0 (V/z)^2 \quad (1)$$

onde a pressão P é função da tensão elétrica aplicada, ϵ_r é a permissividade relativa do polímero (constante dielétrica), ϵ_0 é a permissividade do vácuo, V é a tensão elétrica aplicada, e z a espessura do polímero.

3 Modelagem do Atuador

O atuador considerado nesse trabalho consiste do polímero VHB4905 preso a dois pares de barras de fenolite (as barras horizontais na Figura 2) presas a anteparos, e a uma delas é acoplado um sensor de força, representado pela letra F .

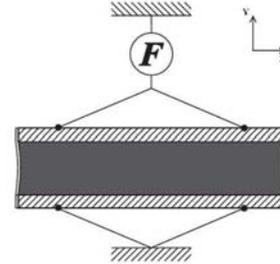


Figura 2: Esboço da montagem do experimento de teste da força de blocagem do atuador (Kofod, 2001).

As extremidades superior e inferior ao longo da direção x estão engastadas nas barras, portanto nestas posições não é possível haver deformações em x , logo temos $\epsilon_x = 0$. Como o atuador foi construído de maneira que a dimensão em y é muito menor do que em x , pode-se assumir que a deformação ϵ_x em todo o polímero seja pequena, ou mesmo que $\epsilon_x \cong 0$ para todo o polímero, mesmo em sua região central.

Como ambas as barras não podem se movimentar na direção y por estarem engastadas, obtém-se também que $\epsilon_y = 0$, e assim

$$\epsilon_x = 1/E [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] = 0 \Rightarrow \sigma_x = \nu(\sigma_y + \sigma_z) \quad (2)$$

$$\epsilon_y = 1/E [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] = 0 \Rightarrow \sigma_y = \nu(\sigma_x + \sigma_z) \quad (3)$$

A tensão na direção z , por sua vez, corresponde à componente da pressão responsável pela atração entre os condutores, e vale $\sigma_z = -P/2$. Substituindo a Equação (3) na Equação (2), tem-se então

$$\sigma_x = \sigma_y = -\nu P / [2(1-\nu)] \quad (4)$$

Pode-se ver que as tensões mecânicas nas direções x e y são compressivas, como deveriam ser, pois foi assumido que nessas direções não haveria deformações. O polímero está livre para se deformar apenas em z , a direção associada à sua espessura, resultando em

$$\epsilon_z = 1/E [\sigma_z - \nu(\sigma_y + \sigma_x)] = P/E [\nu^2/(1-\nu) - 0,5] \quad (5)$$

Estudos feitos mostram que um pré-tensionamento do polímero a ser utilizado como atuador aumenta a sua constante dielétrica, permitindo estímulos elétricos maiores. Como esse pré-tensionamento não é exatamente igual em todas as direções, o módulo de elasticidade do material passa a ser diferente para as 3 direções (Kofod, 2001). Como o comportamento do polímero é não-linear, na presença de altas deformações o Módulo de Young E nas equações precisa ser substituído pelos valores E_x , E_y e E_z medidos nas direções x , y e z após o pré-tensionamento. Desse modo, pré-tensionamentos de intensidades distintas em x e y irão provocar um comportamento anisotrópico do polímero. Ao incluir

a anisotropia do material, as Equações (2-5) resultam em

$$\epsilon_x = \sigma_x/E_x - \nu(\sigma_y/E_y + \sigma_z/E_z) = 0 \tag{6}$$

$$\epsilon_y = \sigma_y/E_y - \nu(\sigma_x/E_x + \sigma_z/E_z) = 0$$

$$\sigma_x = -\nu PE_x / [2(1-\nu)E_z] \tag{7}$$

$$\sigma_y = -\nu PE_y / [2(1-\nu)E_z] \tag{7}$$

$$\epsilon_z = P/E_z [\nu^2/(1-\nu) - 0,5] \tag{8}$$

Note que o valor de ϵ_z no caso anisotrópico não depende de E_x nem de E_y . Como não há pré-tensionamento na direção z (direção da espessura), pode-se assumir que E_z é igual a E, o Módulo de Young para baixas deformações.

Se for considerado o coeficiente de Poisson ν como 0,5, de acordo com as Equações (5) e (8) tem-se $\epsilon_z = 0$, como seria esperado. Isto porque quando $\nu = 0,5$ o material é incompressível, e assim deformações nulas em x e y implicam em $\epsilon_z = 0$ para não violar a conservação de volume.

No entanto, mesmo os elastômeros possuem ν um pouco abaixo de 0,5, resultando em deformações em z pequenas mas não nulas. Experimentos conduzidos durante a pesquisa com o elastômero estudado resultaram em um valor calibrado de 0,495 para o coeficiente de Poisson.

4 Controle de Força

Para controlar a força exercida pelo atuador, foi implementado via *software* um controlador padrão PID com ganhos $K_p=5 \times 10^{-3}$, $K_i = 150 \times 10^{-6}$ e $K_d = 20 \times 10^{-3}$ de forma a obter-se uma resposta adequada, i.e., estável, com rápida convergência e *overshoot* máximo de 1%. A Figura 3 mostra a malha de controle representativa do sistema.



Figura 3: Diagrama de blocos do sistema de controle de força do atuador polimérico.

Desse diagrama pode-se estabelecer uma relação entre a força desejada (representada por uma tensão de referência S_p , em V, proporcional à força desejada) e a força de saída do sistema (F, em N) depois de lida pelo transdutor e convertida no sinal V_f , em V:

$$e = S_p - V_f \tag{9}$$

$$V_{sig} = K_p \left(e + K_d \dot{e} + \int e/K_i \right) \tag{10}$$

$$V_{kv} = V_{sig} C_{10} + C_{11} \tag{11}$$

$$F = AP = x_0 z e_r e_0 V_{kv}^2 / z^2 = x_0 e_r e_0 V_{kv}^2 / z \tag{12}$$

$$V_f = C_2 F \tag{13}$$

A Equação (9) mostra o sinal de erro e da malha de controle onde são comparados o valor desejado de força S_p e a força atual lida V_f . Esse sinal de erro é então avaliado pelo controlador PID de acordo com a Equação (10), onde K_p é o ganho proporcional, K_d é o ganho derivativo, K_i é o ganho integral e V_{sig} é o sinal de saída do controlador. A Equação (11) mostra o modelo adotado para o gerador de alta tensão, onde o sinal de saída V_{kv} é uma função linear da entrada V_{sig} com taxa de proporcionalidade C_{10} e termo independente C_{11} . A força F exercida pelo atuador é modelada de acordo com a Equação (12), onde x_0 e z são respectivamente a largura e a espessura do atuador. Finalmente, a Equação (13) mostra a relação linear entre a força F do atuador e o sinal de tensão do sensor V_f através da constante C_2 .

Com essas equações, chega-se à força de saída do sistema quando controlada por um PID linear

$$F = A/z \left(K_p \left(e + K_d \dot{e} + 1/K_i \int e \cdot dt \right) C_{10} + C_{11} \right)^2 \tag{14}$$

onde $A = x_0 \cdot e_r \cdot e_0$. As Equações (12) e (14) mostram as não-linearidades do sistema, que podem prejudicar o desempenho do controlador. Analisando a Equação (12), nota-se que a força exercida pelo atuador é proporcional não só ao quadrado da tensão elétrica aplicada, mas também ao inverso da espessura do polímero. Isso torna o sistema mais sensível a erros nas tensões próximas à tensão elétrica limite do atuador (tensão de quebra do dielétrico), em comparação ao comportamento do mesmo quando submetido a baixas tensões. O ajuste dos ganhos de um controlador PID linear para otimizar a resposta a degraus de baixas tensões elétricas resulta, em geral, em respostas oscilatórias ou até instáveis para degraus de tensões mais altas.

Note que o atuador retangular duplamente engastado exerce maior força sobre o sensor para baixas tensões elétricas aplicadas, pois o polímero se encontra pré-tensionado na bancada de teste. Com isso, quanto maior a tensão aplicada no polímero, maior é a sua tendência de expandir e conseqüentemente menor será a força medida pelo sensor. Portanto, o comportamento oscilatório observado no PID linear é mais pronunciado nas menores forças, associadas a tensões elétricas mais altas.

Para compensar as não-linearidades descritas, é proposto ajustar os ganhos do controlador de acordo com o estado (F, z) do sistema. A malha de controle resultante é mostrada na Figura 4.

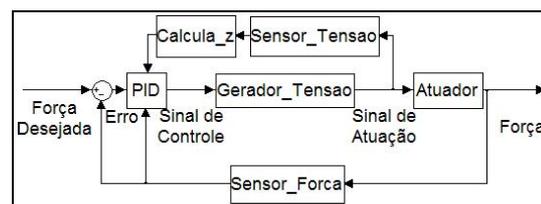


Figura 4: Malha de controle do sistema com a utilização de um controlador PID com ganhos variáveis.

O ajuste proposto consiste em multiplicar o ganho proporcional do controlador (e consequentemente a tensão de atuação do polímero) por um fator de ajuste de $(z/F)^{1/2}$, onde a espessura z é encontrada através do modelo matemático desenvolvido. Desta forma, obtém-se uma relação linear entre a força exercida pelo polímero e a sua tensão de atuação

$$F = \left[A(V_{kv} \sqrt{z/F})^2 \right] / z \therefore F = V_{kv} \sqrt{A} \quad (15)$$

No entanto, o sistema (amplificador) gerador de alta tensão fornece uma saída do tipo $V_{kv} = C_{10} \cdot V_{sig} + C_{11}$. Com isso tem-se que

$$V_{kv} = C_{10} K_p e_q \sqrt{z/F} + C_{11} \Rightarrow V_{kv}^2 = (C_{10} K_p e_q)^2 z/F + C_{11}^2 + 2C_{11} C_{10} K_p e_q \sqrt{z/F} \quad (16)$$

onde $e_q = (e + K_d \dot{e} + \int e/K_i dt)$.

Desta forma, a linearização do sistema, proposta acima, não ocorrerá. A solução encontrada para isso é substituir a saída do controlador de uma forma que a alta tensão sobre o polímero seja o produto do sinal de entrada da eletrônica geradora de alta tensão por uma constante, sem a soma de nenhuma outra parcela, conforme a sequência de equações abaixo:

$$V_{Nsig} = (V_{sig} - C_{11}/1000) / (C_{10}/1000) \Rightarrow V_{kv} = C_{10} V_{Nsig} + C_{11} \Rightarrow \Rightarrow V_{kv} = (V_{sig} - C_{11}/1000) / (C_{10}/1000) C_{10} + C_{11} = 1000 V_{sig} \quad (18)$$

Substituindo a Equação (18) na Equação (16) obtém-se a equação do sistema linearizado, dada por

$$F = 1000 \left[K_p \left(e + K_d \dot{e} + \int e/K_i dt \right) \right] \sqrt{A} \quad (19)$$

Na próxima seção, o programa computacional e sistema elétrico para acionamento dos polímeros, e subsequente implementação do controle de força, são descritos.

5 Sistema Experimental

5.1 Sistema Mecânico

O polímero utilizado é a fita acrílica dupla face VHB4905, produzida pela 3M. A composição química não é informada pelo fabricante, e o material está disponível no mercado dos EUA sob encomenda na forma de um rolo com 0,5mm de espessura, e largura e comprimento especificáveis. Todos os testes foram realizados no Laboratório de Robótica da PUC-Rio a uma temperatura aproximada de 23°C.

Suportes usados em bancadas ópticas foram utilizados para fixar o atuador estudado. Estes suportes oferecem ajustes de distâncias com incrementos de décimos de milímetros tanto em altura (suporte-elevador) quanto em comprimento (suporte-separador), e foram montados em uma base de fixação composta de uma placa de alumínio.

Com estes equipamentos, monta-se uma bancada de testes onde se instala um sensor de força LCEB-5 da Omega Engineering Inc. no suporte-elevador e uma conexão para pinos no suporte-separador, para fixar diferentes atuadores poliméricos.

Para os testes são utilizadas 4 placas de fenolite de 170mm de comprimento, 37mm de largura e 4,5mm de espessura. O polímero é esticado em um equipamento desenvolvido no laboratório com perfis de alumínio e preso em cada lado por um par de placas de fenolite. Um par de placas é então preso ao sensor de força enquanto que o outro par é preso diretamente no suporte separador, como mostra o esquema da Figura 2.

Sobre o restante da base coloca-se o conversor A/D-D/A e o circuito amplificador de tensão.

5.2 Sistema Elétrico de Acionamento

O princípio de funcionamento do atuador polimérico estudado envolve altas tensões de até 10kV. O consumo de corrente do atuador é muito baixo, da ordem de 10µA (Bar-Cohen, 2004). Com isso, a potência necessária para excitar o atuador também é baixa, da ordem de 100mW, e poderia ser obtida a partir de uma bateria comum de 9V. Foi adquirido um equipamento específico que converte uma tensão DC baixa (de 0 a 15V) para as altas tensões necessárias para o projeto (de 0 a 10kV também DC). O equipamento escolhido foi o conversor DC-DC da *Emco High Voltage Corporation* modelo E101, que drena uma corrente de até 300mA. Sua tensão de saída chega a até 10kV com uma corrente máxima de 0,2mA.

Os resultados experimentais obtidos com o sistema desenvolvido são apresentados a seguir.

6 Resultados Experimentais

6.1 Experimentos em Malha Aberta

Os testes em malha aberta têm o objetivo de verificar o modelo matemático desenvolvido da força do atuador em função da tensão elétrica aplicada. Os testes são feitos com um atuador construído com uma camada dupla de polímero VHB4905, pré-deformado de 400% na direção x (deformação de engenharia) e com uma deformação (também de engenharia) de 360% na direção y mostrada na Figura 2. Para verificar o modelo desenvolvido, é aplicada uma tensão com perfil de rampa crescente até a quebra do dielétrico (aproximadamente 7,5kV depois de 2min de teste). A Figura 5 mostra a comparação direta entre a curva experimental e a teórica, obtidas pelas Equações (2-6).

O erro médio quadrático do resultado obtido é de 10,5mN. O erro máximo do modelo desenvolvido é de 26,7mN, cerca de 1% do valor experimental. Esse erro máximo ocorre para uma tensão de aproximadamente 7kV. Isso se deve ao fato de o modelo desenvolvido não contemplar a viscoelasticidade do material. Com isso, o efeito de relaxamento do polímero, sobreposto à atuação, se torna significativo ao final do experimento. Se a taxa de incremento da atuação fosse mais lenta, esse erro final seria maior.

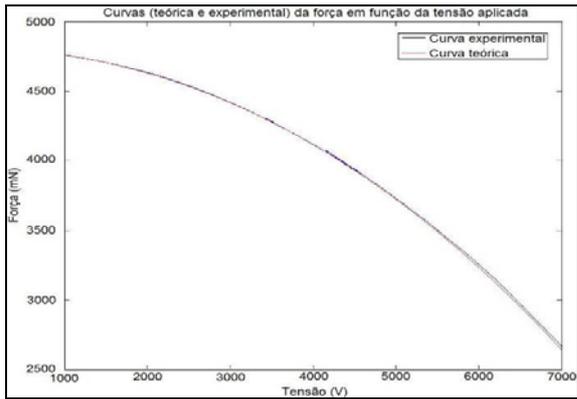


Figura 5: Comparação entre as curvas experimental e teórica da variação da força em função da tensão aplicada no polímero.

6.1 Experimentos com o Controlador Proposto

Experimenta-se aqui o atuador desenvolvido usando um controlador de força PID padrão (linear), onde os ganhos são constantes, e comparam-se os resultados com os do controle não-linear proposto. Por não levar em conta as não-linearidades do sistema, o PID padrão pode prejudicar a estabilidade do atuador, pois com os ganhos constantes o controlador não é capaz de ajustar a saída de um sistema que possui uma dinâmica significativamente diferente dependendo da tensão elétrica aplicada e da sua espessura.

Na realização dos testes, são aplicados diversos degraus de valores desejados de força em diferentes faixas de atuação do sistema, de modo a explorar os efeitos não-lineares detalhados anteriormente.

Os ganhos de um PID linear são ajustados de forma a encontrar uma resposta estável e rápida para a malha fechada de controle de força, baseada nas medições em tempo real do sensor de força utilizado. Nota-se na Figura 6 que os ajustes feitos para altos valores desejados de força não são satisfatórios para baixos valores desejados. O sistema passa a ter um aumento considerável na amplitude das oscilações e um aumento também na sua frequência.

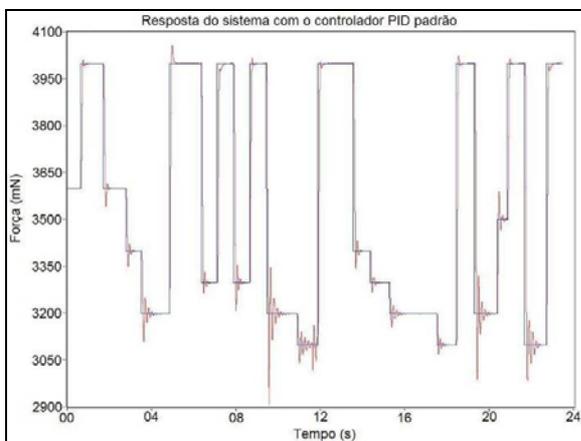


Figura 6: Resposta a diversos degraus do sistema controlado pelo PID padrão, medida experimentalmente, com ganhos ajustados para otimizar a resposta ao degrau de 4000mN. Note o comportamento oscilatório para degraus mais baixos

Esse comportamento está de acordo com o modelo desenvolvido da malha de controle com o PID padrão. As não-linearidades do sistema o tornam muito sensível para atuações próximas ao estado de quebra do dielétrico. Um pequeno degrau na atuação tem respostas muito diferentes se o atuador encontra-se perto da sua tensão limite ou longe da mesma.

Para compensar estes problemas, testa-se também o controlador não linear proposto, descrito anteriormente. Desta maneira, o controlador é ajustado automaticamente ao sistema, fornecendo um comportamento dinâmico satisfatório para qualquer estado em que o polímero se encontre, vide Figura 7.

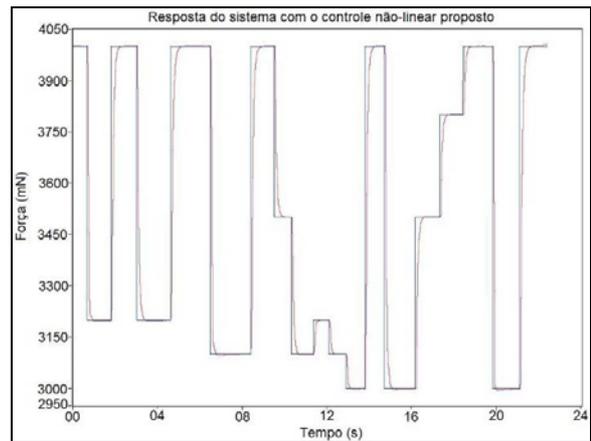


Figura 7: Resposta a diversos degraus do sistema com o controle não-linear proposto.

O controle não-linear ajusta seus ganhos automaticamente de acordo com a espessura e força de atuação do polímero. Para tal, inicialmente os ganhos de um PID tradicional são ajustados para otimizar a resposta medida de um degrau específico. Em seguida, implementa-se o ajuste automático desses ganhos a partir dos modelos não-lineares do sistema, e gravam-se as respostas do sistema a degraus de diversas amplitudes.

Para que possam ser feitas comparações justas e diretas entre os controladores, escolheu-se utilizar no PID tradicional o mesmo ganho proporcional do controle não-linear, $K_p(z/F)^{1/2}$, adquirido para altos valores desejados de força (essa escolha foi feita de modo aleatório e não é determinante para o sucesso do controle proposto). Com isso, espera-se que o comportamento dos dois controladores seja muito parecido para os valores desejados de força nos quais foram calibrados, pois ambos terão ganhos proporcionais, derivativos e integrais muito próximos.

A principal diferença entre os comportamentos mostrados nas Figuras 6 e 7 é a regularidade da atuação do controle não-linear para todos os valores desejados de força, com o mesmo comportamento suave e tempos de ascensão e estabilização similares. O PID padrão, apesar de possuir um bom comportamento para valores desejados próximos a 4000mN, para valores menores gera comportamento muito

oscilatório e com *overshoot* significativo. Já o controle não-linear não apresenta estes problemas.

Outro fator importante é que, devido às grandes oscilações do PID padrão, não é possível alcançar valores desejados de força abaixo de 3100mN, pois as oscilações na tensão de atuação atingem 6kV, próximo do limite de ruptura do polímero. É preciso lembrar que as maiores forças geradas pelo atuador correspondem às menores tensões elétricas aplicadas, como explicado anteriormente.

Nas Figuras 8 e 9 são mostrados os perfis de tensão aplicados experimentalmente no atuador durante os controles PID padrão e não-linear, respectivamente.

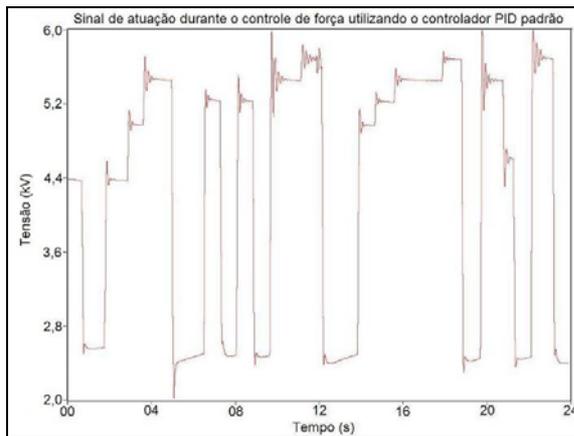


Figura 8: Tensões elétricas aplicadas no atuador durante o controle de força utilizando PID padrão.

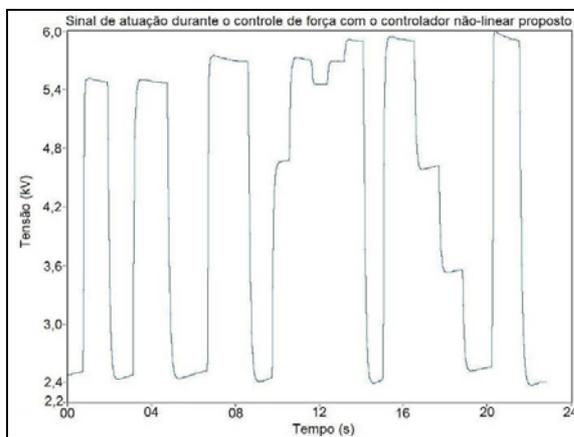


Figura 9: Tensões elétricas aplicadas ao atuador durante o controle de força utilizando a metodologia não-linear proposta. Note a suave variação de tensão exigida para manter o polímero em cada patamar de força, compensando-se assim automaticamente os efeitos viscoelásticos.

Nelas podem-se ver os efeitos da viscoelasticidade do material através da tensão de controle. No controle não-linear, percebe-se na Figura 9 que depois de atingido um baixo valor desejado de força (correspondente a altas tensões elétricas aplicadas vistas na figura), a tensão elétrica comandada decai um pouco. Isso se deve ao relaxamento viscoelástico do material depois de uma mudança nas tensões mecânicas internas. Este relaxamento tenderia a deixar a

força aplicada abaixo do valor desejado, o que é compensado automaticamente pelo controle pela diminuição da tensão elétrica, elevando assim a força até os níveis desejados.

7 Conclusão

Neste trabalho, foi estudado o comportamento de atuadores à base de polímeros dielétricos eletroativos. Testes de força em atuadores baseados no polímero acrílico VHB4905 comprovaram as suas não-linearidades inerentes, identificadas durante a modelagem matemática do sistema. Estas não-linearidades causam excessiva sensibilidade do atuador em altas tensões elétricas. Implementaram-se dois controladores, um PID linear padrão e um controle com um modelo preditivo para compensação das não-linearidades do material. Os resultados mostraram que no PID tradicional a resposta a degrau do sistema, calibrada para um nível de força desejada, torna-se oscilatória para menores níveis desejados, associados a maiores tensões elétricas. No PID linear, quanto menor as forças desejadas, maiores as oscilações tanto em amplitude quanto em frequência para a resposta a degrau. O controlador não-linear proposto corrige estes problemas, apresentando resposta a degrau similar para altos ou baixos valores desejados, sem a necessidade de recalibragem dos ganhos.

Referências Bibliográficas

- Bar-Cohen, Y., "Actuation of biologically inspired intelligent robotics using artificial muscles", *Industrial Robot: An International Journal*, 30(4): 331-337, 2003.
- Bar-Cohen Y., *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: reality, potential, and challenges*, 2nd ed., SPIE, Washington, 2004.
- Kofod, G., "Dielectric elastomers actuators", Ph.D. Thesis, Department of Chemistry, Technical University of Denmark, 2001.
- Pelrine R., Kornbluh R., and Joseph J. P., "Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a mean of actuation", *Sensor Actual. A*, Vol. 64, pp. 75-85, 1998.
- Pelrine R., Kornbluh R., Pei Q. and Joseph J. P., "High-Speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%", *Science* 287, pp. 836-839, 2000.
- Wingert A. R., "Development of a Polymer-Actuated Binary Manipulator", Submitted to the Department of Mechanical Engineering in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering at the Massachusetts Institute of Technology, June, 2002.