

EFEITO DA REFRIGERAÇÃO FORÇADA EM MOTORES TERMOELÉTRICOS ROTATIVOS ACIONADOS POR MOLAS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA

JORDASHE, BEZERRA, I. S.; CÍCERO, SOUTO, R.; SIMPLÍCIO, ARNAUD, S.; JOSÉ, SOBRINHO, M. B.; MAXSUEL, CUNHA, F.; BRUNO, ARAÚJO, A.

Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas - LaSEA, CEAR, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Cidade Universitária, s/n - Castelo Branco III, João Pessoa - PB, CEP: 58051-085

E-mails: jordashe.bezerra@cear.ufpb.br, cicerosouto@cear.ufpb.br, sarnaud@cear.ufpb.br, josemarquesbasilio@gmail.com, maxsuel.cunha@cear.ufpb.br, bruno.araujo@cear.ufpb.br

Abstract— The possibility of using shape memory alloys (SMA) has been currently studied in development of actuators and thermoelectric motors. Usually, these devices use the SMA characteristics of high strain or force capability to produce the displacement and, in this case, the displacement is produced by supplying heat to the actuator element. Their applications are still limited to low speed, but, with the possibility of high torques. The prototype of the motor has been built using mini SMA springs as active elements. The geometry of the motor and the spring support base have been developed in ABS (acrylonitrile butadiene styrene) polymer. A current amplifier circuit was designed to generate heat and, consequently, produce the motor displacement. The circuit was switched for pulse width modulation (PWM), which has produced the heating by Joule effect. In the activation of the prototype there was strong evidence of the activation levels between each spring. To increase the speed of the motor rotation and to soothe the levels between the movements a micro fan was used, thus reducing the rotation period and increasing its angular velocity. Image processing using a camera positioned perpendicular to the motor shaft was used to measure angular displacement.

Keywords— Electronic Instrumentation, Thermoelectric Motor, SMA Springs.

Resumo— Atualmente tem sido estudado a possibilidade de utilização das ligas com memória de forma (LMF) para o desenvolvimento de atuadores e motores termoeletrônicos. Geralmente, são dispositivos que utilizam a característica de elevada deformação ou capacidade de força que as LMF possuem para produzir o movimento, neste caso, produzido pela aplicação de calor no elemento atuador. Suas aplicações ainda se limitam a baixas velocidades, mas, com a possibilidade de elevados torques. Um protótipo do motor foi construído utilizando mini molas de LMF como elemento ativo para o acionamento. A geometria do motor e a base de sustentação das molas foram desenvolvidas em polímero ABS (acrylonitrile butadiene styrene). Para a geração do calor e consequentemente produção do movimento do motor foi desenvolvido um circuito amplificador de corrente, chaveado por modulação por largura de pulso (PWM), que produziu o calor por efeito Joule. No acionamento do protótipo havia uma forte evidência dos patamares de acionamento entre cada mola. Pela necessidade de aumentar a velocidade de rotação do motor e suavizar os patamares entre os acionamentos foi utilizado um micro ventilador, assim diminuindo o período de rotação e aumentando sua velocidade angular. Para as medições de deslocamento angular foi utilizado o processamento de imagem com uma câmera posicionada perpendicular ao eixo do motor.

Palavras-chave— Instrumentação Eletrônica, Motor Termoeletrônico, Molas de LMF.

1 Introdução

Atualmente, a utilização de materiais inteligentes tem atraído amplo interesse acadêmico, assim vêm sendo desenvolvidas novas tecnologias, principalmente acerca de motores termoeletrônicos, consequentemente aumentaram o número de publicações sobre o tema.

Na literatura podem ser encontrados alguns motores, como um atuador servo rotativo usando fio de 0,3mm de diâmetro. Devido a sua geometria, o movimento é limitado a uma rotação de aproximadamente 60 graus. Assim, a medição da rotação angular do atuador foi alcançada através da variação de resistência elétrica de um potenciômetro posicionado no eixo motor. Para a leitura da temperatura foi utilizado termopar devidamente condicionado. Para o controle do movimento angular foi desenvolvido um controlador PID, controlador proporcional integral derivativo, utilizando a temperatura do fio como o parâmetro de realimentação do controlador. A corrente elétrica produzida por um sinal PWM é fornecida para

aquecimento do fio por efeito Joule. Resultados experimentais mostram que o atuador de LMF produziu deslocamento angular de ± 15 graus, velocidade angular máxima de 15 graus por segundo e torque máximo de 2,1 quilogramas centímetro. (Tanaka, 1991)

De forma semelhante, um motor linear foi apresentado utilizando fio de SMA de 0,015 polegadas sobre um tambor de 1,15 polegadas. Uma extremidade do fio foi fixada ao tambor e outra fixada à placa de base. Por aquecimento, o fio de SMA contrai e o tambor gira proporcionalmente a contração do fio. Já com o resfriamento do fio de SMA o rotor volta para a posição inicial pela ação de uma mola de compressão. Dessa forma, uma corrente elétrica amplificada é utilizada para energizar o fio e provocar o aquecimento. Um transformador rotativo de indutância variável, RVIT, foi utilizado para medição de deslocamento do fio. Foi utilizado um dSPACE para aquisição de dados e controle do sistema em tempo real, utilizando Matlab/Simulink a partir da implementação de algoritmos de controle. O motor servo rotativo obteve um deslocamento angular de 100 graus, com um erro de estado estacionário de 0,2 grau.

Resultados experimentais também demonstraram as vantagens do controle robusto PD desenvolvido. (Song, 2001)

Outros servomotores são apresentados com a possibilidade de girar completamente mantendo o movimento contínuo. Neste trabalho, os autores mostraram algumas configurações de motores utilizando pequenas vigas de LMF compressivas como molas em modo de flexão. As relações geométricas dos motores propostos neste trabalho foram definidas através das propriedades dinâmicas dos atuadores de LMF. O deslocamento angular medido é utilizado como parâmetro de controle de acionamento do motor. Assim, o motor apresentou um torque por unidade de massa de 1,384Ncm/g e uma velocidade máxima de rotação de 0,6rad/s. (Kuribayashi, 1989)

A comparação de desempenho em termos de vantagens e limitações dos atuadores baseados em ligas com memória de forma foi apresentado em várias literaturas. Pesquisadores desenvolveram um atuador para promover um máximo deslocamento angular de 90°, a ser utilizado em um dedo robótico. Os deslocamentos do atuador foram medidos com um LVDT, transformador diferencial variável linear. Para os cálculos de torque e temperatura foi analisada a potência consumida pelos atuadores e, através de equações, foram empregadas as conversões adequadas. Foi implementado um controlador do tipo PID para acionamento do protótipo. Por fim, verificaram que a relação potência/peso e a relação potência/volume de um motor de LMF é de 1,1 e 7,0, mostrando que são superiores ao de um motor DC que são de 0,13 e 0,3, respectivamente. (Reynaerts, 1998)

Nesta pesquisa, foram analisados os efeitos da refrigeração forçada em um protótipo de motor termoeletrico rotativo acionado por molas LMF, assim como a otimização de seu funcionamento.

Para o funcionamento da estrutura, foi projetado um circuito de potência utilizando transistor MOSFET BUK 465 na condição de chave. Nesse caso, o gate do MOSFET foi excitado por um sinal em modulação por largura de pulso (PWM), e do dreno para a fonte passou a corrente elétrica que produziu o calor no atuador de SMA. O sinal PWM foi gerado através de uma saída digital de uma placa controlada. O sensor de temperatura foi diretamente conectado a placa de condicionamento de sinal para termopar do tipo K. Para a medição de deslocamento foi utilizada uma câmera conectada diretamente na porta USB do computador. As imagens de movimento do motor foram capturadas pela câmera e dentro da matriz de pixels foram identificados estes parâmetros de movimento de um ponto específico marcado no eixo do motor. A mesma metodologia foi utilizada para medição de deslocamento individual dos atuadores. Para a identificação da força do atuador foi utilizada uma célula de carga com capacidade máxima de 5 kgf, devidamente condicionada. Para as capturas dos sinais dos sensores no acionamento do motor por sinal PWM foi desenvolvido um software específico em ambiente LabView. (Basilio Sobrinho, 2017)

Para o resfriamento forçado do motor foi feito o acoplamento de um mini ventilador à frente das minis molas de SMA. Para a aquisição dos dados foi desenvolvido um software em ambiente Labview utilizando uma câmera. A otimização foi feita adequando os chaveamentos dos PWM do Arduino ligados a cada mola para a situação refrigerada.

2 Materiais e Métodos

2.1 Estrutura

A estrutura utilizada é o protótipo de um servomotor utilizando atuadores do tipo mola helicoidal de SMA, nesse caso molas de NiTi (Liga Ni-45%Ti). Essas minis molas possuem 1,27 mm de diâmetro externo com fio de 0,22 mm de diâmetro. Na Figura 1 estão demonstrados os comprimentos da mini mola denominada de M12. A distância entre olhais é de 12mm com comprimento útil de 7,5 mm, aproximadamente com 27 espiras ativas. (Grassi, 2013)

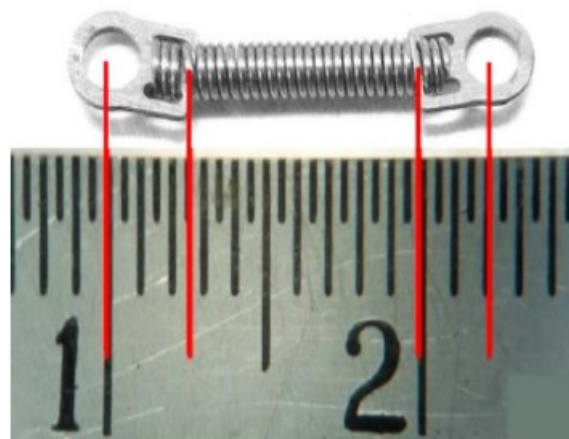


Figura 1. Foto microscópica da mini mola M12 de NiTi com destaque para os comprimentos total e útil. (Emiliavaca, 2016)

Esses atuadores tipo molas tem capacidade de deslocamento de até 600% do seu tamanho original, assim permitindo uma estrutura de tamanho reduzido e leve.

Além disso, a estrutura de sustentação dos atuadores e do eixo rotor do motor foi impresso em polímero ABS. Um mini rolamento foi usado para redução do atrito no eixo do motor. Na Figura 2 é demonstrado o protótipo.



Figura 2. Motor com atuadores tipo mola helicoidal de NiTi.

2.2 Caracterização do atuador

Os atuadores utilizados no protótipo do motor quando descarregados mecanicamente, sob temperatura ambiente em torno de 24°C, se encontram na forma superelástica, ou seja quando o material está abaixo da temperatura máxima na qual pode ocorrer a fase martensita induzida por tensão, a superelasticidade e pseudoplasticidade são características das LMF, ou seja, durante a fase superelástica o material através da reorientação da fase martensita consegue manter plasticidade temporária, porém sob efeito de temperatura a estrutura é reorientada para o seu formato original, assim, não havendo deformação plástica permanente, sendo esse o efeito da pseudoplasticidade, ou seja LMF possuem curvas de elásticas maiores do que os materiais convencionais, assim sendo a superelasticidade.

Nesse caso, para que haja trabalho mecânico, precisam gerar força e/ou deslocamento quando submetidos a um carregamento térmico. Portanto, para que o efeito memória de forma pudesse ser observado, foi necessário aplicar uma carga mecânica suficiente para que houvesse indução da fase martensita e posterior aquecimento do material para que retornasse a sua fase austenita com geração de força e deslocamento.

Para a identificação do ponto de equilíbrio, conhecido por martensita final, induzida por tensão mecânica, foi realizado um ensaio de carregamento quase estático. O deslocamento da mola nesse ponto foi utilizado para dimensionar a distância do ponto de fixação da mola ao centro do eixo de rotação que, neste caso, foi de 38,25 mm, resultando em uma deformação de 350 % de cada mola.

Por fim, foram aquecidas por corrente elétrica para que os atuadores atingissem uma temperatura de 50°C, retornando a fase austenita. Devido à restrição da deformação na volta para a fase

austenita, quando aquecidas, as molas geraram forças proporcionais a temperatura aplicada. (Basílio Sobrinho, 2017)

2.3 Circuito Controlador

Para o controle da rotação do motor, foi utilizado um circuito para a manutenção de corrente constante, nesse caso de 400 mA, aquecendo as molas e fazendo-as transitar da fase martensita para a austenita, contraindo a mola e causando o movimento circular no eixo rotativo.

A passagem de corrente para as molas foi feita utilizando um microcontrolador, Arduino, pois as molas devem ser acionadas separadamente e de forma que a mola seguinte só seja acionada após a anterior já ter retornado à fase superelástica, para que não interfira na rotação do eixo.

Dessa forma, foram ajustados os ciclos de trabalho de cada PWM referente às molas, escolhendo tempos de 1250, 1250 e 750 milissegundos, como demonstrado na Figura 3, em três experimentos diferente de 0, 20 e 40 milissegundos entre os acionamentos, para visualizar as diferenças de suavidade entre as curvas de deslocamento angular em cada uma das situações.

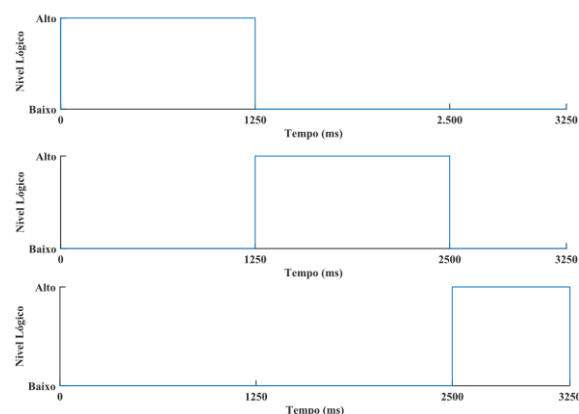


Figura 3. PWM de acionamento das molas sem intervalo de tempo entre os acionamentos.

2.4 Instrumentação

Para a refrigeração forçada do protótipo foi utilizado um micro ventilador, ou *cooler*, alimentado por uma fonte de 12V, posicionado à frente das molas do servomotor.

A refrigeração forçada aumenta a dissipação de calor das molas diminuindo o tempo necessário para que retornassem à fase superelástica. De forma que, para comprovar esse efeito foi utilizado o software Labview, associado a um circuito capaz de fornecer 400 mA, utilizando uma mola de liga NiTi com deformação de 300% do seu tamanho original, fixa e em regime estático, como carga, sendo aquecida pela corrente através de efeito Joule. Dessa forma, fixo na carga um termopar do tipo K, o sensor de temperatura foi diretamente conectado a placa de condicionamento de sinal.

No software Labview foi desenvolvido uma rotina para a medição dos deslocamentos angulares. Utilizando uma câmera com foco fixo, a qual sua lente foi posicionada perpendicular ao eixo rotativo. No programa foi realizada a captura, o processamento das imagens e a coleta de dados.

Na Figura 4 visualiza-se a bancada experimental com o motor e toda a instrumentação utilizada para coleta dos resultados. Na figura se destacam o motor e o posicionamento da câmera para aquisição das imagens de rotação, também, o circuito controlador do motor e o posicionamento do cooler.

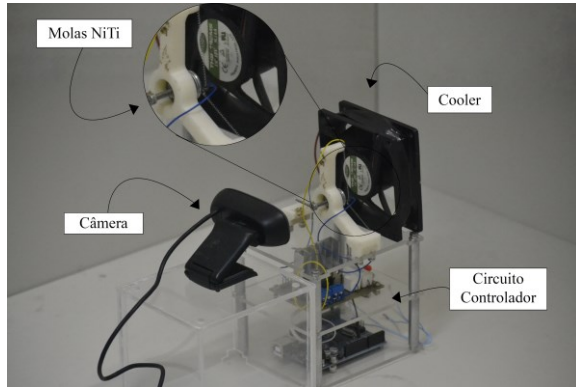


Figura 4. Montagem para aquisição, controle e processamento dos dados experimentais.

2.5 Movimento Circular

Como o motor desempenha um movimento circular, devido ao seu eixo rotativo, foi necessário utilizar as equações de movimento circular.

O período de rotação (T) se caracteriza pelo tempo necessário para completar uma rotação completa.

A frequência de rotação em rotações por segundo, ou RPS, é calculada como o inverso do período, como pode ser demonstrado na equação (1).

$$f = T^{-1} \quad (1)$$

A velocidade angular é a variação do deslocamento angular pelo tempo, pode ser calculado como na equação (2).

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

A quantidade de rotações por minuto, RPM, é calculada através da equação (3).

$$RPM = 60 \cdot f \quad (3)$$

3 Resultados e Discussões

Devido ao efeito da refrigeração forçada, foi possível reduzir o período rotação do motor, pois diminui o tempo necessário para o retornar à fase superelástica.

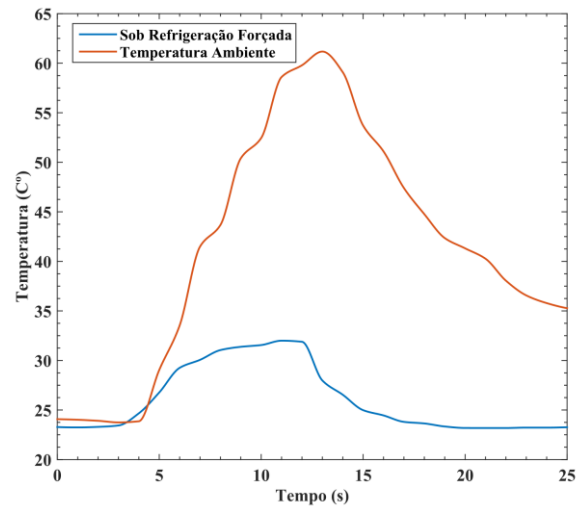


Figura 5. Temperatura da Mola de liga NiTi através do tempo.

Os resultados mostrados na Figura 5, obtidos através do sensor de temperatura, aplicando a corrente de 400 mA durante 8 segundos, é possível concluir que sob temperatura ambiente, há um rápido aumento de temperatura ultrapassando 60°C e então uma lenta queda de temperatura. Já quanto ao efeito da ventoinha o aumento de temperatura é mais lento, mantendo-se estável na faixa de 30°C e sua queda de temperatura é mais rápida.

Ou seja, utilizando a ventoinha durante o regime transitório a mola de NiTi atinge as temperaturas de transição de fase mais rapidamente, reduzindo o período de rotação do motor.

Ademais, através da captura e processamento das imagens de vídeo foi possível obter dados de deslocamento angular do rotor em tempo real.

Em todos os gráficos é evidente três patamares de velocidade angular, os quais demonstram a mudança de acionamento de cada atuador até completar um ciclo de rotação, pois é o momento que a mola está aquecendo e transitando de fase.

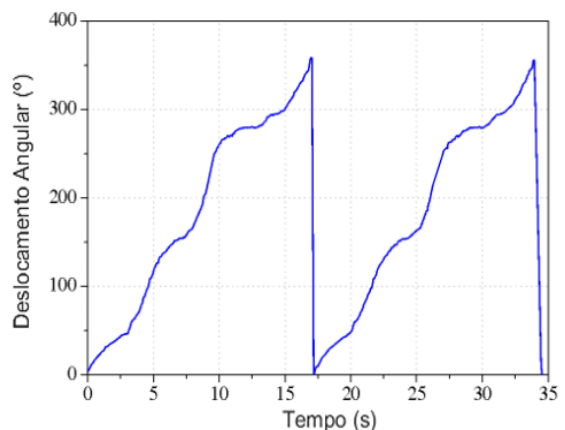


Figura 6. Deslocamento angular durante dois ciclos de rotação, sem refrigeração forçada.

O motor sem efeito de refrigeração forçada, como pode ser visto na Figura 6, para conseguir desempenhar ciclos sem falhas tem período de rotação

de 17 s aproximadamente, ou seja, desempenha 3,52 RPM. De forma que, reduções nesse período de rotação não eram eficientes pois após alguns ciclos o motor deixava de funcionar apropriadamente por causa da temperatura das molas.

À vista disso, em busca de solucionar o problema, foi utilizada uma ventoinha para causar refrigeração forçada, analisando em três diferentes testes, o comportamento do motor após 4 ciclos de funcionamento.

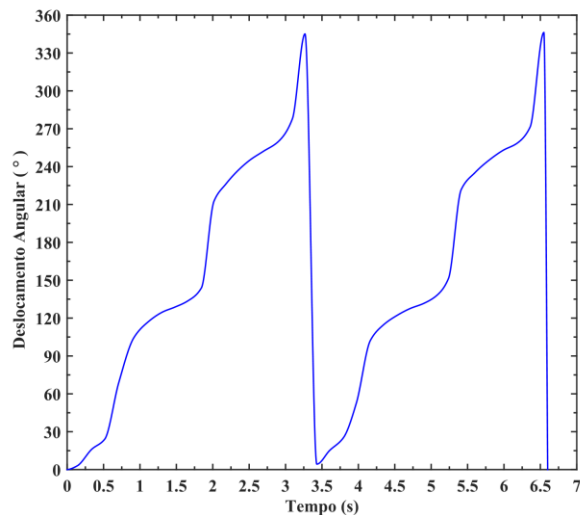


Figura 7. Deslocamento angular durante dois ciclos e 0 milissegundos de intervalo entre acionamentos.

Na Figura 7 tem-se as curvas de deslocamento angular do motor sob refrigeração e 0ms entre cada acionamento. O motor completa uma volta a cada 3,35 s aproximadamente, assim, produzindo uma frequência de aproximadamente 0,30 hz, e velocidade angular de 1,89 rad/s, desempenhando 18,00 RPM.

Ou seja, foi possível observar que, com a refrigeração forçada, houve um aumento de 5,11 vezes na frequência do motor.

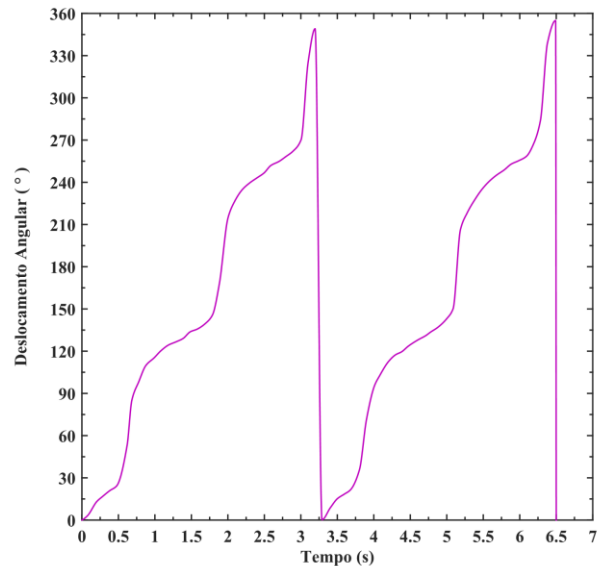


Figura 8. Deslocamento angular durante dois ciclos e 20 milissegundos de intervalo entre acionamentos.

Na Figura 8 é possível observar no segundo experimento o comportamento da curva do deslocamento angular com 20 ms de intervalo entre os acionamentos. Nela observa-se que a curva tem um formato mais suave do que o anterior, devido ao intervalo entre os acionamentos, facilitando a transição para a fase superelástica.

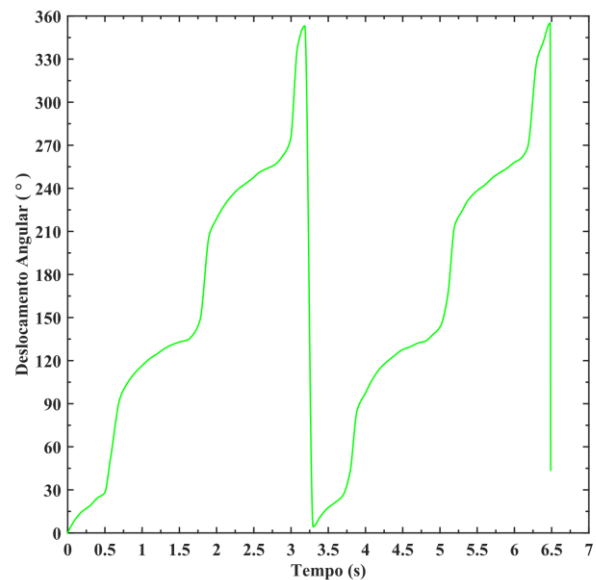


Figura 9. Deslocamento angular durante dois ciclos e 40 milissegundos de intervalo entre acionamentos.

A Figura 9 demonstra o comportamento da curva do deslocamento angular com 40 ms de intervalo entre os acionamentos. Possui um comportamento similar à de 20 ms, observa-se de forma mais nítida os pontos de transição entre os acionamentos.

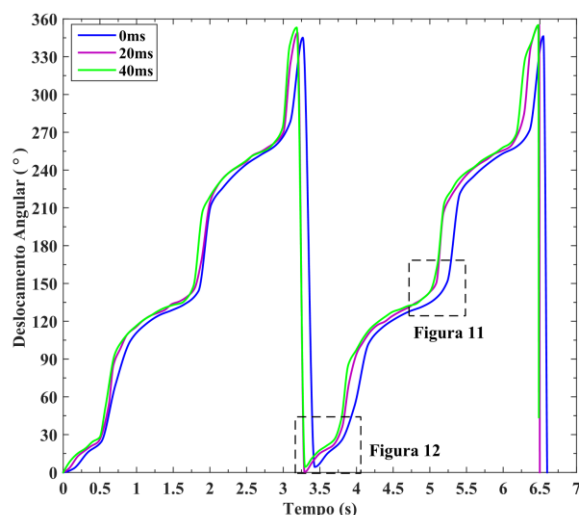


Figura 10. Comparação entre os três experimentos durante dois ciclos.

A Figura 10 demonstra que a curva com 0ms de intervalo entre acionamentos tem período de rotação efetivo maior do que dos outros experimentos, pois como sua rotação acaba ficando prejudicada por causa da temperatura das molas, diferente dos testes de 20 ms e 40 ms entre acionamentos, que têm comportamentos similares pois o intervalo entre acionamentos permite a melhor estabilidade na temperatura.

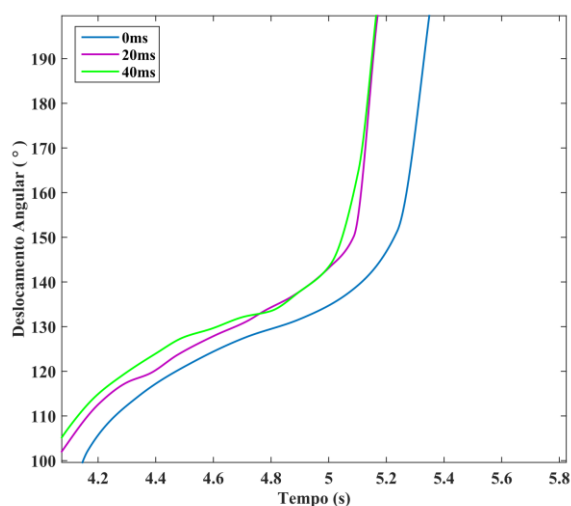


Figura 11. Comparação da suavidade entre os três experimentos.

Na Figura 11, constata-se que as curvas com 20 ms e 40 ms de intervalo entre acionamentos tem comportamento mais linear do que a curva de 0 ms, pois o tempo entre os acionamentos consegue melhorar a manutenção de sua velocidade angular, pois quanto mais próximas todas as molas estiverem da fase superelástica, mais suave e linear será a curva, pois diminui a brusca mudança de velocidade angular entre os patamares de acionamentos, já que na fase superelástica a tração das molas é menor do que quando estão rígidas.

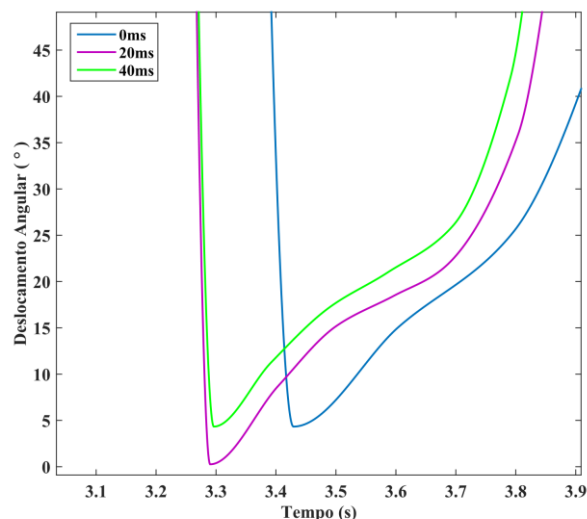


Figura 12. Comparativo do período de rotação entre os três experimentos.

Além disso, na Figura 12 observa-se que o experimento de 20 ms tem período de rotação efetivo menor do que os demais experimentos a longo prazo, pois o de 40 ms, mesmo tendo comportamento similar possui 60 ms adicionais para cada ciclo de rotação.

4 Conclusão

Como pôde ser constatado, através da refrigeração forçada foi possível obter a redução no período de rotação do protótipo. Assim, alcançando 18,46 RPM, 5,68 vezes frequência sem refrigeração.

A partir dos 3 experimentos, foi possível observar que com o intervalo de 20 milissegundos entre os acionamentos houve a suavização da curva de deslocamento angular e o menor período de rotação efetivo.

Portanto a refrigeração forçada se mostrou eficiente, já que alcançou os resultados esperados.

Outros resultados importantes como o torque produzido pelo rotor com diferentes períodos de acionamento dos pulsos de correntes, serão apresentados em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas (LaSEA), Laboratório de Instrumentação e Controle (LINC), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo financiamento da pesquisa. Também a Pedro Ivo, pela assistência no projeto.

Referências Bibliográficas

- Basilio Sobrinho, J., M.; Cunha, M., F.; Souto, C., R.; Silva, S., A.; Santos, A., J., V.; Catunda, S., Y., C., "Electronic instrumentation for the characterization of a rotary thermoelectric motor driven by shape memory alloy springs," 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Turin, 2017, pp. 1-5.
- Emiliavaca, A. "SM Art morphing wing: um protótipo de asa adaptativa acionada por micro molas de liga com memória de forma", Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande Paraiba – Brasil, 2016.
- Grassi, E., N., D., Martinni, H., R., O.; Araújo, C., J. "Influence of annealing treatments on the thermomechanical behavior of sma superelastic mini coil springs", 22nd International Congress of Mechanical Engineering Ribeirão Preto SP – Brazil, 2013.
- Kuribayashi, K. "A new servo motor using shape memory alloy", Industrial Electronics Society 1989. IECON'89. 15th Annual Conference of IEEE. IEEE, pp. 238-243, 1989.
- Reynaerts, D. Van brussel, H. "Design aspects of shape memory actuators", Mechatronics, vol. 8, no. 6, pp. 635-656, 1998.
- Song, G. "Robust position regulation of a rotary servo actuated by a shape memory alloy wire", Industrial Electronics 2001. Proceedings. ISIE 2001. IEEE International Symposium on. IEEE, pp. 1923-1928, 2001.
- Tanaka, Y. Yamada, A. "A rotary actuator using shape memory alloy for a robot-analysis of the response with load", Intelligent Robots and Systems'91. Intelligence for Mechanical Systems Proceedings IROS'91. IEEE/RSJ International Workshop on. IEEE, pp. 1163-1168, 1991.