

DESENVOLVIMENTO DE UMA GARRA ROBÓTICA ACIONADA POR UM MÚSCULO PNEUMÁTICO

Eduardo André Perondi

UFRGS – EE – DEMEC Av. Sarmento Leite 425 - Porto Alegre - RS – Brasil -CEPP: 90050-170
perondi@mecanica.ufrgs.br

Flávio José Lorini

UFRGS – EE – DEMEC - lorini@mecanica.ufrgs.br

José Antônio Esmerio Mazzaferro

UFRGS – EE – DEMEC - mazzaferro@mecanica.ufrgs.br

Juarez Arigony de Castro Lucas

UFRGS – EE – DEMEC

Resumo. *Este trabalho tem por objetivo apresentar a concepção de uma garra pneumática para um robô manipulador de seis graus de liberdade. A citada garra é acionada pela variação da pressão do ar num dispositivo elástico conhecido como “músculo pneumático”. Além da concepção, foi construído um protótipo para a garra que testado e mostrou-se plenamente operacional. Também foram realizados testes de laboratório com o objetivo de obter o comportamento força versus deformação do músculo (atuador) pneumático. Os resultados destes ensaios indicaram que o músculo construído no Laboratório de Robótica da UFRGS apresenta comportamento compatível com os músculos pneumáticos descritos por outros autores.*

Palavras-chave: Garra robótica, músculo pneumático, atuador pneumático, controle de atuadores pneumáticos.

1. INTRODUÇÃO

Considerando-se que uma garra mecânica simples normalmente emprega a mesma força tanto para segurar um objeto leve e de baixa consistência, quanto uma peça mais pesada e resistente, buscou-se estudar o problema visando definir uma solução que levasse ao desenvolvimento de uma garra que permita superar estas deficiências.

Uma solução técnica é a utilização, como atuador, de um equipamento acionado através da variação de pressão do ar em um dispositivo elástico conhecido como “músculo pneumático”. Esta decisão fundamentou-se no baixo custo de construção de tal dispositivo, conforme será demonstrado oportunamente, e pela possibilidade de variar a força aplicada através do controle da pressão de suprimento. A utilização de uma garra deste tipo propicia maior agilidade e economia de tempo nas atividades industriais, pois a adaptação a ser feita para se trabalhar com diferentes objetos pode ser rapidamente realizada com uma simples regulagem da pressão do ar comprimido que supre o sistema de atuação.

Através do estudo realizado e do protótipo desenvolvido em laboratório, constatou-se a viabilidade do projeto, obtendo-se uma garra capaz de prender com segurança objetos com variações na pressão de contato. Verificou-se que com a utilização de mais alguns poucos recursos, como a regulagem da pressão de suprimento e tendo disponibilidade de tempo necessário para o *setup*, pode-se obter a adaptação adequada para o correto manuseio de peças para materiais de diferentes pesos e resistências mecânicas.

O elemento que pode vir a tornar competitivo o sistema aqui apresentado, se comparado a outras tecnologias de acionamento de garras robóticas, é o chamado “músculo pneumático”, utilizado como atuador no mecanismo proposto. Este tipo de atuador constitui uma alternativa importante para a movimentação de partes móveis de robôs e outros dispositivos mecatrônicos.

2. MÚSCULOS PNEUMÁTICOS

A habilidade para operar num ambiente não controlado é um dos problemas mais difíceis da pesquisa robótica. Uma abordagem para solucionar este problema envolve a cópia de modelos humanos e animais tais como ambos interagem regularmente com o meio. Na esteira desta tendência, foram desenvolvidos músculos pneumáticos nos anos cinqüenta e sessenta em meio à pesquisa de membros protéticos por Schulte, Gavrilovic e Maric (1961, 1969 apud Chou e Hannaford, 1996).

Atualmente, os músculos pneumáticos vêm sendo bastante utilizados na construção de robôs e braços mecânicos inspirados na arquitetura biológica humana. Em geral, o músculo artificial conhecido como músculo McKibben, por ter sido este, segundo Gaylord (1958 apud Klute e Hannaford, 2000) o pesquisador a primeiro retratar a sua aplicação, é mais parecido com os músculos biológicos do que os outros tipos de atuadores artificiais. O músculo artificial McKibben é um atuador pneumático cujas propriedades incluem uma força muito grande em relação ao peso. Esta característica torna-o bastante interessante para uma vasta gama de aplicações tais como os já mencionados robôs e próteses para deficientes. Com o suporte desta abordagem, o presente trabalho está baseado num atuador muscular que inclui este dispositivo pneumático já usado, por exemplo, por Nickel, Perry e Garret (1963 apud Klute e Hannaford, 2000) como recurso ortopédico em pacientes portadores de poliomielite.

Não é feito aqui um estudo sobre outros tipos de atuadores, pois a intenção do trabalho é deliberadamente usar os músculos pneumáticos McKibben, devido ao fato de serem leves (cerca de 15 gramas), possuírem alto amortecimento e terem baixo custo de fabricação e apresentarem comportamento resiliente apropriado para a manipulação de materiais frágeis.

Os músculos pneumáticos consistem de uma câmara interna envolvida por uma camisa de malha trançada (com fibras flexíveis não-extensíveis) encaixada em suas extremidades por uma estrutura semelhante a um tendão (Figura 1).

Quando a câmara interna é pressurizada, a alta pressão do ar atua contra a superfície interna e contra a camisa externa e tende a aumentar seu volume. Devido à elevada rigidez longitudinal das fibras da camisa de malha trançada, o atuador encurta de acordo com seu aumento de volume e produz uma tensão de tração longitudinal se estiver acoplado a uma carga mecânica. Esta configuração física faz com que os músculos McKibben tenham características semelhantes às de uma mola, com elasticidade passiva não-linear e com alta flexibilidade física e baixíssimo peso se comparado a outros atuadores artificiais (Hannaford e Winters, 1990). Características a fadiga de diferentes tipos de látex, incluindo dados de limite de fadiga, para testes de tensão uniaxial são apresentados em Lake, 1983, Ellul, 1992 e em Caldwell et al., 1995.

À pressão ambiente, o atuador está com seu comprimento de repouso (Fig. 1a). À medida que a pressão aumenta, o atuador diminui proporcionalmente até alcançar seu estado de máxima contração que ocorre à pressão máxima (Fig. 1b). Tanto o comprimento da fibra (B) quanto o número de voltas que uma fibra individual dá sobre o diâmetro (N) são constantes. A contração é descrita pela razão de alongamento longitudinal do atuador dada por $I_i = L_i / L_0$ onde L é o comprimento do atuador, o índice i refere-se à dimensão atual do ensaio e o índice 0 à dimensão original de repouso segundo nomenclatura adotada por Klute e Hannaford (2000).

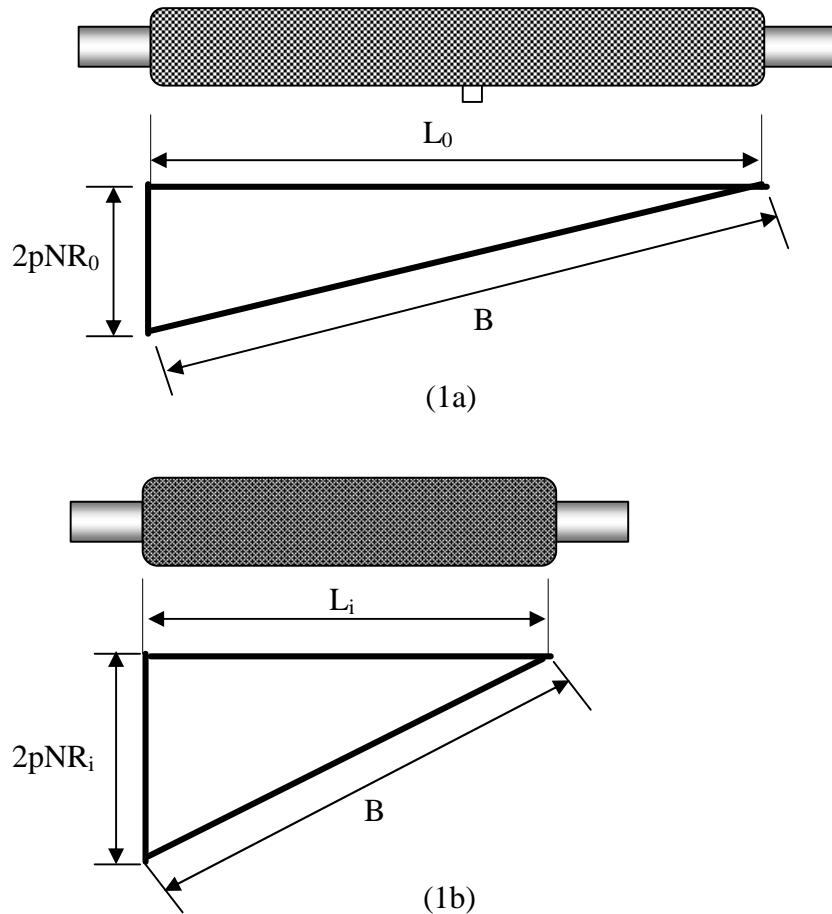


Figura 1 – Atuadores McKibben (Klute e Hannaford, 2000).

A bibliografia relata projetos de atuadores biorobóticos cujos requisitos biológicos são extraídos da literatura sobre fisiologia muscular com parâmetros definidos de acordo com modelos de músculos orgânicos. Em Klute, Czerniecki e Hannaford (1999), dados de diversas espécies de vertebrados (ratos, sapos, gatos e humanos) são usados para avaliar o desempenho de atuadores pneumáticos McKibben. Os resultados experimentais demonstram que as propriedades de força-comprimento do atuador são semelhantes às do músculo orgânico, mas as de força-velocidade não. A utilização de um amortecedor hidráulico com orifícios fixos, localizado paralelamente ao atuador McKibben, é proposta para melhorar o desempenho força-velocidade. Os resultados de simulações indicaram uma melhor aproximação das características força-velocidade.

A pesquisa biorobótica busca desenvolver novas tecnologias baseadas no desempenho dos sistemas neuromusculares humanos e de animais. Um artigo escrito por Klute, Czerniecki e Hannaford (2002) descreve o desenvolvimento de um componente de um sistema biorobótico, um músculo e tendão artificiais. O dispositivo é baseado nas conhecidas propriedades estáticas e dinâmicas dos músculos e tendões biológicos que foram extraídas da literatura e usadas para descrever matematicamente as relações de força, comprimento e velocidade. Um atuador pneumático flexível é proposto como elemento contráctil de um músculo artificial e resultados experimentais mostram que as propriedades força-comprimento do atuador são como as do músculo, diferentemente das propriedades força-velocidade. A adição de um amortecedor hidráulico melhora as propriedades do atuador dependentes da velocidade. Além disso, um tendão artificial é mostrado com a função de servir como tecido de conexão entre o músculo artificial e a estrutura do esqueleto. Um modelo completo do sistema músculo-tendão artificial é apresentado com capacidade de prever o desempenho esperado força-comprimento-velocidade do sistema artificial. Resultados experimentais do dispositivo construído indicam a seguinte performance do

músculo em geral: maiores pressões de ativação levam a maiores forças de saída, contrações concêntricas mais rápidas resultam em menores forças de saída, contrações excêntricas mais rápidas produzem maiores forças de saída e forças de saída são tanto maiores quanto mais longos forem os músculos.

Já, em Chou e Hannaford (1996) são relatadas as comparações dos resultados de testes e modelagens dos músculos artificiais McKibben com atuadores pneumáticos. Apresentam-se os resultados dos testes estáticos e dinâmicos de comprimento-tensão e obtenção de um padrão linearizado destas propriedades para três diferentes modelos. Os resultados são brevemente comparados com as propriedades dos músculos humanos para que se possa avaliar a conveniência do uso dos atuadores McKibben em braços robóticos.

Muitos esforços foram feitos para desenvolver um modelo teórico do atuador McKibben recaindo exclusivamente nas características do tecido trançado e ignorando as propriedades da câmara interna (Tondu et al., 1994, Paynter, 1996). Alguns investigadores compararam as simulações obtidas através de seus modelos com os resultados experimentais, mas nenhum modelo teórico alcançou ainda resultados considerados satisfatórios pela grande maioria dos autores. Klute e Hannaford (2000) apresentam um estudo onde propõem um modelo que inclui uma descrição matemática não-linear da câmara interna do atuador. Resultados experimentais mostram que o modelo permite descrever a saída de força do atuador. Contudo, ainda existe uma discrepância entre a modelagem e a experimentação, embora menor que em modelos anteriores.

Aplicações típicas freqüentemente requerem um número significativo de contrações e extensões ou ciclos repetidos do atuador. Esta repetição leva à fadiga e consequente falhas do atuador, com uma vida curta, menor que a de seus concorrentes mais comuns, tais como motores elétricos ou cilindros pneumáticos. Assim, foi desenvolvido um modelo que prediz o número máximo de ciclos do atuador baseado nas propriedades de tensão uniaxial da câmara interna do atuador. Resultados experimentais, que validam o modelo, revelam que os atuadores McKibben cujas câmaras internas são fabricadas com látex natural têm um limite de fadiga 24 vezes maior que os fabricados com silicone (Klute e Hannaford, 1998).

Dentre as diversas aplicações dos músculos pneumáticos destaca-se o trabalho de Mattiazzo et al. (1995) que desenvolveu uma unidade de força para colheita de espargos baseado numa garra pneumática disponível comercialmente. Sensores tátteis altamente seguros e de baixo custo foram desenvolvidos para determinar a pressão de contato durante o aperto. Testes experimentais, realizados em todos os componentes do sistema, permitiram o completo conhecimento do fenômeno físico envolvido no comportamento. Um sistema de controle difuso foi desenvolvido com base nestes dados experimentais. São discutidos os resultados experimentais de testes de força realizados com diferentes tamanhos de espargos e diferentes pressões de contato demonstrando a versatilidade e robustez do sistema.

Outros trabalhos encontrados na literatura descrevem uma arquitetura de controle inspirada na biologia para os membros de um robô humanoíde atuado por músculos McKibben. É relatado, por exemplo, uma aplicação em que juntas interconectadas são atuadas usando um modelo de controle biológico observado através da medição de eletromiogramas de músculos humanos durante movimentos no plano vertical. O sistema de controle usa a soma dos sinais gerados pelo sistema nervoso para ativar os músculos humanos. Os músculos do robô humanoíde, atuados por controle de pressão, são controlados usando um esquema com sinal avante (*feedforward*) com padrões de força análogos aos do modelo humano (Notrhrup, Sarkar, Kawamura, 2001).

3. MONTAGEM DO MÚSCULO PNEUMÁTICO

Foi montado um músculo artificial McKibben especificamente para a utilização na garra desenvolvida. A seguir são apresentados os componentes mecânicos, utilizados na sua construção, e descritas as suas principais características funcionais.

3.1. Componentes Utilizados nos Músculos Pneumáticos Construídos

Câmara interna expansível (essencialmente, um tubo elástico de látex Ref. 202 de 10 mm de diâmetro externo e parede com 2,5 mm de espessura), *camisa trançada externa* (de lã de vidro com 8 mm de diâmetro), *parafuso sextavado interno* (de aço inoxidável 8 x 20 mm), *arruela lisa, espiga de mangueira* (1/4 Rosca de 1/8), *abraçadeira AC* (MAB 9-13 de 9 mm).

A aquisição de uma empresa comercial de um músculo pneumático aproximadamente das mesmas proporções do projetado acima custaria cerca de R\$ 600,00 (seiscentos reais), enquanto o custo com materiais, no músculo descrito, foi de R\$ 4,14.

3.2. Características dos Músculos Pneumáticos

Com o propósito de se obter informações sobre o comportamento do atuador construído, realizaram-se testes com o mesmo em laboratório de medições mecânicas. O teste foi realizado na Máquina de tração ZD-10 (fundo de escala de 500 N, resolução de 5 N), à pressão constante de quatro bar.

Um músculo de comprimento de 455 mm, fixado por duas garras da referida máquina, sem carga e completamente distendido, foi submetido a uma pressão de 4 bar, para o acionamento. Nesta condição o ponteiro do aparelho indicou uma força de 133 N. Na seqüência de teste reduziu-se de 10 em 10 mm a distância entre os extremos do músculo, executando-se o mesmo procedimento descrito acima e anotando-se os resultados.

Os testes foram realizados a 4 bar de pressão por ser esta a máxima pressão suportada pelas braçadeiras e parafusos sextavados componentes do dispositivo. Na Tabela 1 estão apresentados os resultados dos testes.

Tabela 1 – Medição da força do atuador em função de seu comprimento.

L_0 (mm)	F (Newton)	λ_1 (Adimensional)
455	131,27	1,00
445	93,77	0,98
435	78,96	0,96
425	64,16	0,93
415	50,34	0,91
405	43,43	0,89
395	33,56	0,87
390	28,62	0,86
385	24,68	0,85
375	11,84	0,82
365	2,96	0,80
355	0,00	0,78

Onde $L_0 = 455$ mm = Comprimento inicial do músculo em repouso, $\lambda_1 = L_i / L_0$ e L_i é o comprimento final.

Força x Deformação

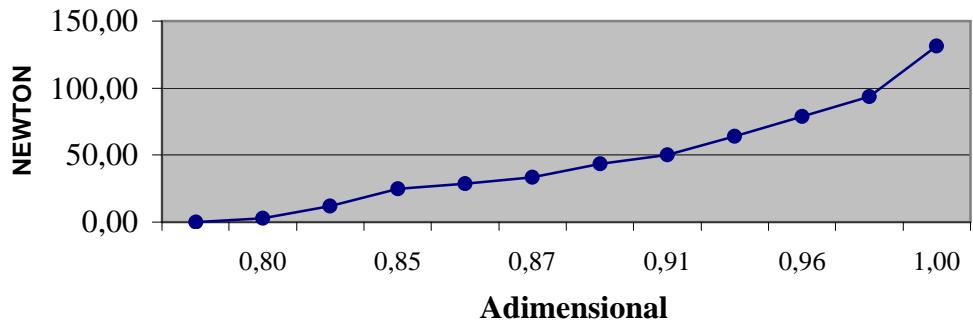


Figura 2 – Relação força *versus* deformação do músculo pneumático construído.

4. MONTAGEM DA GARRA PNEUMÁTICA ROBÓTICA

O conjunto garra pneumática projetado (Fig. 3) é composto das seguintes peças: uma cantoneira (1), duas garras propriamente ditas (2), uma barra síncrona (3), dois pinos para fixação da mola (4), um batente (5) e um músculo pneumático (6). Para fins de testes em laboratório, conjunto foi afixado ao braço do robô ABB modelo IRB 1400 M94A através de um flange.

A cantoneira tem cinco furos em sua chapa horizontal, onde são colocados pinos para fixação das garras, do batente e de um dos pinos da mola. Em sua chapa vertical, a cantoneira tem quatro furos que permitem que ela seja presa ao flange da extremidade do braço do robô.

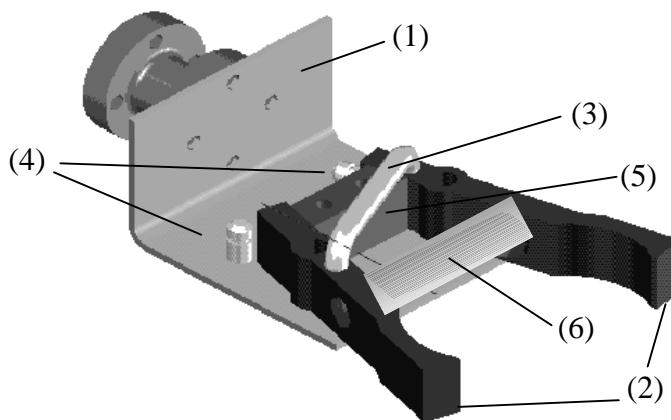


Figura 3 – Conjunto garra pneumática robótica.

Todas as peças, com exceção da mola foram fabricadas através dos seguintes processos de fabricação: a cantoneira e a barra síncrona sofreram conformação a frio, as duas garras foram cortadas e furadas na máquina CNC (Controle Numérico Computacional), o batente foi fresado e os pinos foram torneados. Todas as peças aqui citadas são feitas de alumínio.

5. TESTES DA GARRA PNEUMÁTICA ROBÓTICA

Foram realizados testes preliminares para verificação do funcionamento da garra desenvolvida. A garra foi montada no robô e utilizada para manusear algumas peças, tais como a garrafa ilustrada a seguir (Fig. 4).

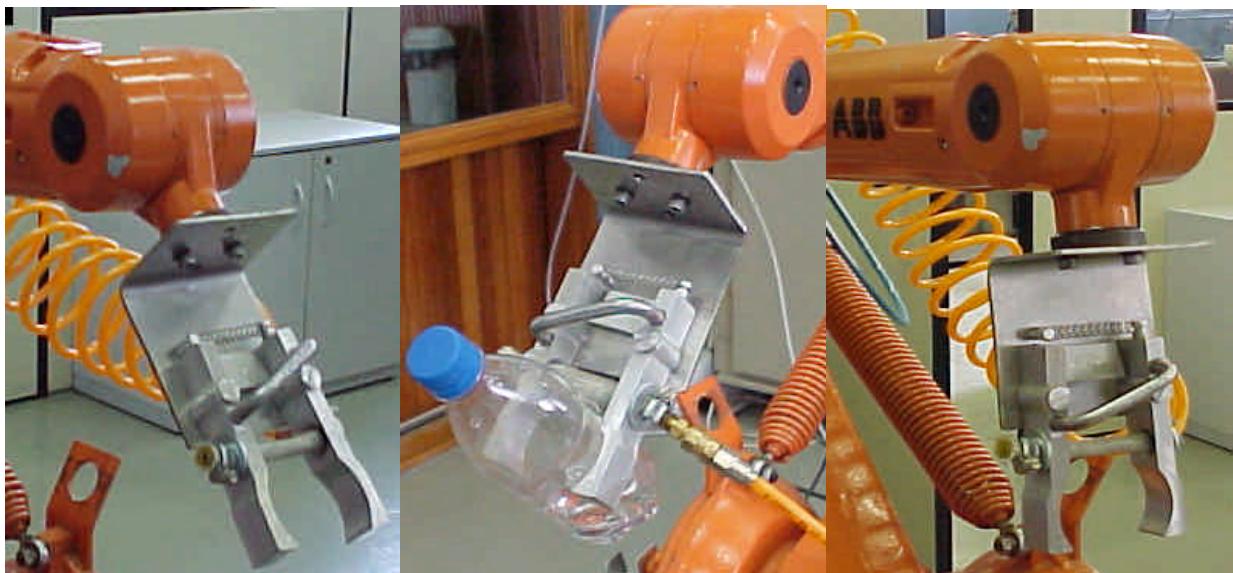


Figura 4 – Garra pneumática acoplada ao robô.

Os resultados dos testes preliminares foram satisfatórios. A garra prendeu com segurança e firmeza as peças testadas, sem danificá-las, mostrando a viabilidade do sistema desenvolvido. Futuros teste deverão ser realizados visando levantar características do agarramento (dependência das forças de compressão e da força de atrito com relação à pressão de suprimento e do diâmetro efetivo da peça manipulada).

6. CONCLUSÕES

A realização do presente trabalho comprova a adequação da utilização dos músculos artificiais pneumáticos para a confecção de garras robóticas providas de controle de força, desde que seja adicionada uma válvula de alívio para controle de pressão.

O custo do referido equipamento é muito baixo e, com pequenas adaptações na montagem, como a substituição da mola por outras com diferentes constantes de elasticidade, ele pode ser ajustado para operar com uma grande quantidade de objetos. Sua utilização em atividades industriais proporciona agilidade, flexibilidade e economia de tempo ao seu operador.

Avanços na modelagem teórica do atuador McKibben têm sido apresentados com o objetivo de identificar a dependência do desempenho das propriedades tanto do tecido trançado externo quanto da câmara interna. Portanto, futuros estudos deverão ser dedicados a compatibilizar os resultados dos testes experimentais a estes modelos, contemplando estudos mais aprofundados das características dos músculos pneumáticos (problemas de fadiga, fluências lenta e outras alterações que possam vir a deteriorar o seu comportamento ao longo do tempo).

Além disso, dos resultados dos testes realizados em laboratório conclui-se que para prender objetos que correspondam à abertura máxima da garra se conseguirá forças maiores. Quanto maior a deformação inicial do músculo provocada pelo menor diâmetro do objeto, menor a força útil resultante obtida. Assim, futuros trabalhos poderão ainda contemplar estudos do comportamento do músculo quando submetido a variações de pressão. Outra possibilidade consiste no projeto de um sistema que permita ao sistema de controle da garra medir a distância que se encontra do objeto a ser preso. Conhecendo esta distância, um sistema projetado adequadamente deverá poder fazer com que o mecanismo da garra forneça uma configuração geométrica que permita obter uma força útil adequada à manipulação de um determinado objeto.

7. REFERÊNCIAS

- Caldwell, D. G., Medrano-Cerda, G. A., G. A., Goodwin, N, M. **Control of Pneumatic Muscle Actuators.** IEEE Control Systems Magazine, Vol. 15, pp. 40-48, 1995.
- Chou, C. P., Hannaford, B. **Measurement and Modeling of Artificial Muscles.** IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, pp. 99-102, 1996.
- Ellul, M. D. **Mechanical Fatigue.** In: Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components, Gent AN (ed). Hanser Publishers, New York, NY, 1992.
- Hannaford, B., WINTERS, J. M. **Actuator Properties and Movement Control: Biological and Technological Models.** In: Multiple Muscle Systems, Winters J., Woo S. (eds). Springer-Verlag, New York, 1990.
- Klute, G. K., Czerniecki, J. M., Hannaford, B. **McKibben Artificial Muscles: Pneumatic Actuators with Biomechanical Intelligence.** IEEE/ ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'99), Atlanta, GA, 1999.
- Klute, G. K., Czerniecki, J. M., Hannaford, B. **Artificial Muscles: Actuators for Biorobotic Systems.** The International Journal of Robotics Research Vol. 21, No. 4, pp. 295-309, Sage Publications, 2002.
- Klute, G. K., Hannaford, B. **Fatigue Characteristics of McKibben Artificial Muscle Actuators.** Proceedings, IEEE/ RSJ International Conference on Intelligent Robotic Systems (IROS'98). Victoria BC, Canada, Vol. 3, pp. 1776-1781, 1998.
- Klute, G. K., Hannaford, B. **Accounting for Elastic Energy Storage in McKibben Artificial Muscle Actuators.** Seattle, WA: ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2000.
- Lake, G. J. **Progress of Rubber Technology.** Vol. 45, pp. 89, 1983.
- Mattiazo, G., Mauro, S., Raparelli, T., Velardocchia, M. **A Fuzzy Controled Pneumatic Gripper for Asparagus Harvesting.** Pergamon, Control Eng. Practice, Vol. 3, No. 11, pp. 1563-1570, 1995.
- Notrhrup, S., Sarkar, N., Kawamura, K. **Biologically-Inspired Control Architeture for a Humanoid Robot.** Center for Intelligent Systems, Vanderbilt University, Nashville, TN, 2001.
- Paynter, H. M. **Thermodynamic Treatment of Tug-&-Twist Technology: Part 1. Thermodinamic Tugger Design.** In: Stelson, K. And Oba, F. (eds): Proceedings, Japan-USA Symposium of Flexible Automation, Boston, MA, pp. 111-117, 1996.
- Tondu, B., Boitier, V., Lopez, P. **Naturally Compliant Robot-Arms Actuated by McKibben Artificial Muscles.** San Antonio, TX, Proceedins, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 3, pp. 2635-2640, 1994.

8. DIREITOS AUTORIAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste artigo.

TITLE: DEVELOPMENT OF A PNEUATIC MUSCLE POWERED ROBOTIC GRIPPER

Abstract. *This paper presents the conception of a pneumatic gripper to be conected to a six freedom degree robot. Robotic Laboratory. This gripper is powered by the air pressure changing in a elastic device known as "pneumatic muscle". Besides the conception, it was assembled a gripper prototype that was proved to be quite operative. There were made laboratory tests to have the pneumatic muscle (actuator) strenght versus stretch behaviour. The results of these essays show that the muscle assembled in the UFRGS Robotic Laboratory has a conduct compatible with the pneumatic muscles found in the bibliography.*

Keywords. *robotic gripper, pneumatic muscle, pneumatic actuator, pneumatic drivers control.*