

# **Análise comparativa entre o modelo muscular Zajac-modificado e o modelo músculo-reflexo para a predição de forças e torques musculares**

**Éder Alves de Moura**, Laboratório de Engenharia Biomédica, UFU,  
e-mail: [edermoura@gmail.com](mailto:edermoura@gmail.com), home-page: <http://www.biolab.eletrica.ufu.br>

**Eduardo Lázaro Martins Naves**, Laboratório de Engenharia Biomédica, UFU,  
e-mail: [eduardonaves@yahoo.com.br](mailto:eduardonaves@yahoo.com.br), home-page: <http://www.biolab.eletrica.ufu.br>

**Luciano Luporini Menegaldo**, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, IME,  
e-mail: [lmeneg@ime.eb.br](mailto:lmeneg@ime.eb.br), home-page: <http://lmeneg.tripod.com/>

**Liliam Fernandes de Oliveira Oliveira**, Escola de Educação Física e Desportos, UFRJ,  
e-mail: [liliam.oliva@gmail.com](mailto:liliam.oliva@gmail.com), home-page: <http://b200.nce.ufrj.br/~posgrad/lilianfernandes/index.htm>

## **Introdução**

O entendimento, por completo, da estrutura do sistema músculo-esquelético e do sistema de controle empregado no comando do mesmo é um dos grandes desafios que vem despertando o interesse de vários pesquisadores. Vários trabalhos já foram apresentados com modelos de funcionamento das partes constituintes deste complexo sistema. No entanto, há ainda muitos detalhes para serem explorados e entendidos.

Desde o modelo de Zajac (Zajac, 1989), o desenvolvimento da eletrônica e das técnicas de processamento de sinais permitiu melhorar significativamente os processos de medição da atividade elétrica correspondente ao processo de ativação muscular, o aumento da capacidade de processamento dos computadores vem facilitando a simulação de sistemas cada vez mais complexos, contemplando mais elementos de um sistema muscular real, além disso, houve um significativo aprofundamento do entendimento fisiológico, anatômico e dos processos neurais de controle do corpo. Estes fatores têm contribuído para a melhora da aproximação do comportamento dos modelos matemáticos à realidade.

O trabalho apresentado por Zajac, baseado no modelo de A V Hill (Hill, 1938), tem sido um dos modelos mais utilizados para a representação do músculo, pois apresenta em sua modelagem o atuador músculo-tendíneo, que permite efetuar o controle artificial da própria força de contração artificial, como analisado por (Coelho, 2005). Entretanto, este modelo não contempla uma boa resposta para todos os níveis de ativação muscular, além de não levar em consideração o sistema muscular intrafusal e as respostas reflexas do sistema neuromuscular (Winters, 1995).

Em trabalhos recentes, Menegaldo (Menegaldo, 2001) apresentou um modelo baseado no de Zajac, com o objetivo de melhorar a resposta deste último para baixos níveis de ativação e Naves (Naves, 2006) mostrou que a interferência do sistema muscular intrafusal e das respostas reflexas são consideráveis, sobretudo em baixos níveis de ativação. Entretanto,

ainda não se sabe qual destes modelos representa melhor o comportamento muscular e para quais faixas de ativação cada modelo responderá melhor.

Neste sentido, este trabalho tem o objetivo de avaliar os modelos apresentados no que diz respeito aos diferentes níveis de ativação muscular.

## **Modelos a serem estudados**

Este trabalho visa realizar uma análise comparativa dos modelos propostos por Menegaldo e Naves, verificando qual dos dois apresenta uma melhor aproximação da estrutura musculoesquelética real. Abaixo estão descritas, em linhas gerais, as características de cada modelo, podendo ser consultados os trabalhos originais para maiores detalhes.

A maior parte dos modelos musculares usados para estudos de coordenação muscular têm assumido um motoneurônio excitador que dirige um modelo de músculo extrafusal, entretanto, Winters assumiu que esta abordagem resulta em perdas para a simulação, pois, elementos como o sistema muscular intrafusal, a atividade reflexa e os elementos de controle espinhal, não são levados em consideração. Neste contexto, Naves desenvolveu um novo modelo biomecânico para o controle da postura ereta baseado no atuador músculo-reflexo de Winters, consistente com outros modelos musculares (Kuo e Zajac, 1993; Soetanto et al., 2001) e de corpos rígidos (Johansson et al., 1988; Peterka, 2000; Maurer e Peterka, 2005) previamente usados no estudo daquela tarefa motora. Além disso, Naves mostrou por meio de simulações que os sinais reflexos mencionados são decisivos para sustentação do corpo na postura ereta, em linha com evidências experimentais documentadas por outros investigadores que estudaram a postura ereta (Fitzpatrick et al., 1992; Fukuoka et al., 2001).

Já Menegaldo, apresentou uma variação do modelo proposto por Zajac, cujo, apresenta boa representatividade matemática para o comportamento de um músculo real, entretanto, para a simulação de situações de baixa ativação muscular, são encontrados problemas numéricos de deativação. No sentido de

minimizar estes problemas, foram introduzidos componentes viscosos e elásticos em paralelo com os elementos contráteis. Outro ponto que foi levado em consideração é a relação entre a complexidade que o modelo pode adquirir pela incorporação de mais parâmetros, no sentido de se aproximar mais da realidade, mas viabilizando a execução de tal modelo. Neste sentido, ambos os modelos a serem analisados tem como objetivo uma melhor aproximação da realidade, embora adotando diferentes abordagens de modelagem.

### **Metodologia de Trabalho**

Como mencionado este trabalho terá o objetivo de efetuar uma análise comparativa dos trabalhos desenvolvidos por Naves e Menegaldo, através da estimulação dos respectivos modelos musculares com sinais mioelétricos reais (torques musculares) e a comparação das respostas obtidas de cada um dos modelos com seus respectivos valores experimentais. Este trabalho está sendo desenvolvido conjuntamente entre diversas instituições de ensino superior, no sentido de somar esforços para o desenvolvimento de um modelo que represente melhor o funcionamento do sistema músculo-esquelético e do fortalecimento desta linha de pesquisa.

### **Considerações finais**

Este estudo tem como meta aprimorar o modelo de desenvolvimento de modelos representativos do sistema músculo-esquelético, o qual é essencial para a execução da maioria das atividades cotidianas do ser humano. O desenvolvimento de modelos mais precisos é importante, pois, quanto maior o grau de compreensão do funcionamento e dos parâmetros que afetam o seu funcionamento, maiores serão as possibilidades de desenvolvimento de ferramentas para o auxílio em tratamentos de recuperação de traumas musculares, aumento de desempenho de atletas e até mesmo o desenvolvimento de próteses.

Neste sentido, espera-se com este trabalho contribuir para o desenvolvimento de um modelo que contemple de forma mais precisa o funcionamento da estrutura músculo-esquelético, sendo que, como resultado final pode ser obtido um modelo híbrido derivado dos dois modelos estudados.

### **Referências bibliográficas**

Coelho, D. B. Modelo de ativação neural do controle postural humano durante a postura ereta. ENGEVISTA, vol. 7, n. 1, 83-90, 2005.

Fitzpatrick, R. C., J. L. Taylor, et al. Ankle stiffness of standing humans in response to imperceptible perturbation: Reflex and task-dependent components. J Physiology, n.454, p.533-547. 1992.

Fukuoka, Y., T. Nagata, et al. Characteristics of Somatosensory Feedback in Postural Control During Standing. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, v.9, n.2, p.145-153. 2001.

Hill, A. V. The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. Proceedings Royal Society Series, no. 126-B, 136-195, 1938.

Johansson, R., M. Magnusson, et al. Identification of Human Postural Dynamics. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, v.35, n.10, p.858-869. 1988.

Kuo, A. D. e F. E. Zajac. A Biomechanical Analysis of Muscle Strength as a Limiting Factor in Standing Posture. J Biomechanics, n.26, Suppl. 1, p.137-150. 1993.

Maurer, C. e R. J. Peterka. A new interpretation of spontaneous sway measures based on a simple model of human postural control. J Neurophysiology, n.93, p.189-200. 2005.

Menegaldo, L. L. Modelagem biomecânica e controle ótimo da postura humana através de algoritmos baseados na teoria das aproximações consistentes. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

Naves, E. L. M. Modelagem e simulação do controle da postura ereta humana quase-estática com reflexos neuromusculares. Tese Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU, 2006.

Peterka, R. J. Postural control model interpretation of stabilogram diffusion analysis. Biological Cybernetics, n.82, p.335-343. 2000.

Soetanto, D., C.-Y. Kuo, et al. Stabilization of human standing posture using functional neuromuscular stimulation. J Biomechanics, v.34, p.1589-1597. 2001.

Winters, J. M. An improved muscle-reflex actuator for use in large-scale neuromusculoskeletal models. Annals of Biomedical Engineering, no. 23, 359-374, 1995c.

Winters, J. M. Concepts in neuro-muscular modelling. In: Three-Dimensional Analysis of Human Movement, P. Allard, I. A. F. Stokes and J. -P. Blanche. Champaign, IL: Human Kinetics, 257-292, 1995b.

Winters, J. M. How detailed should muscle models be to understand multi-joint movement coordination? Human Movement Science, no. 14, 401-442, 1995a.

Zajac, F. E. Muscle and tendon: Properties, models scaling and application to biomechanics and motor control. Critical Reviews in Biomedical Engineering, no. 17, 359-411, 1989.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro concedido através do projeto Pró-Engenharias 043/2008.