

## ESTUDO SOBRE O USO DE ESTIMULAÇÃO ELÉTRICA FUNCIONAL DE MEMBROS INFERIORES EM CICLISMO

L. O. Fonseca\*<sup>\*\*\*</sup>, L. L. Oliveira\*, M. X. Oliveira\*\*, M. E. G. Paredes\*, C. C. S. C. Paz\*\*\*, P. E. Silva\*\*\*\*, J. L. Q. Durigan\*\*\*\* e A. P. L. Bó\*\*\*

\*Laboratório de Automação e Robótica (LARA),

\*\*Programa de Pós-Graduação em Sistemas Eletrônicos e de Automação (PGEA),

\*\*\*Faculdade de Ceilândia (FCE),

\*\*\*\*Departamento de Fisioterapia (FCE)

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

e-mail: lucasfonseca@lara.unb.br

**Resumo:** Este trabalho tem como motivação o estudo de Estimulação Elétrica Funcional aliada ao ciclismo. A plataforma utiliza parâmetros fixos de estimulação em, no máximo, três pares de eletrodos em cada perna e o estimulador *Hasomed RehaStim*, abrangendo variáveis como: o usuário do sistema (todos sem dificuldades motoras), posicionamento dos eletrodos, padrão de estimulação e posicionamento do indivíduo em relação à bicicleta. Foram observados melhores resultados para certos parâmetros no que diz respeito ao torque gerado e à fluidez da pedalada. Por exemplo, o indivíduo mais ativo fisicamente atingiu resultados satisfatórios com correntes menores e a posição vertical contribuiu para pedaladas mais favoráveis ao movimento. Além disso, a fadiga percebida pelo indivíduo foi analisada.

**Palavras-chave:** Estimulação Elétrica Funcional, FES, ciclismo.

**Abstract:** *This paper describes a study of Functional Electrical Stimulation applied to cycling. The proposed platform makes use of constant stimulation parameters, up to three pairs of electrodes, Hasomed RehaStim electrical stimulator and variables such as: system user (none with motor disabilities), electrodes positioning, stimulation pattern and user's position related to the bicycle. Best results were achieved when certain parameters were set, according to generated torque and pedaling smoothness; e.g. the most physically fit subject achieved more satisfying results with lower current intensities and the user's vertical stance contributed to a more movement favorable pedaling. Moreover, muscle fatigue felt by the subjects was analyzed.*

**Keywords:** *Functional Electrical Stimulation, FES, cycling.*

### Introdução

Lesões medulares, Acidentes Vasculares Encefálicos (AVEs), esclerose múltipla e outras condições de saúde podem causar limitações motoras totais ou parciais [1]. No Brasil, de acordo com dados preliminares do último censo demográfico realizado pelo IBGE, em 2010, 7%

da população, cerca de 14 milhões de pessoas, declara possuir algum tipo de deficiência motora. Dessas, cerca de 2,5% (350.000 pessoas) possui uma deficiência motora grave.

Dentre as deficiências motoras originadas dessas condições de saúde, aquelas que afetam os membros inferiores geram especial interesse porque dificultam a locomoção do indivíduo. Além disso, a ausência de atividade muscular nos membros inferiores pode causar uma série de problemas de saúde, como problemas cardíacos [2], perda de massa óssea [3], e perda de massa muscular [4].

Nesse contexto, a Estimulação Elétrica Funcional (FES) pode ser utilizada associada a sistemas de ciclismo como alternativa para locomoção, bem como forma de impedir ou até reverter os problemas de saúde citados. Foi demonstrado que exercícios regulares utilizando FES em ciclismo, em longo prazo, podem aumentar o diâmetro da artéria femoral comum [2], aumentar a densidade mineral óssea [3], e restaurar a perda de massa muscular [4], além de outros benefícios físicos e psicológicos.

Nesse contexto, este trabalho visa realizar testes piloto com FES para avaliar a influência de diferentes parâmetros básicos no ciclismo.

### Materiais e métodos

Foi realizada uma série de testes piloto de FES associada a ciclismo. O setup básico dos testes consistiu de uma bicicleta ergométrica com controle de carga e encoder, e um estimulador elétrico comercial (*Hasomed RehaStim*, Alemanha). Os parâmetros da Tabela 1 foram mantidos constantes nos valores descritos.

Tabela 1: Parâmetros inalterados durante os testes.

Parâmetro	Valor
frequência de estimulação	50Hz
largura de pulso	400µs

forma de onda	quadrada	6	B	2	1	H
fases	bifásica	7	B	3	3	H
tamanho do eletrodo	100x50mm	8	C	3	3	H
material do eletrodo	copolímero de	9	C	3	3	V
	poliacrilato e prata hidrogel	10	C	3	4	V

A Tabela 2 lista os parâmetros que foram alterados durante os testes. O usuário A relatou fazer exercícios diariamente, e ter um alto nível de atividade física; o usuário B relatou ser sedentário, e ter um baixo nível de atividade física; e o usuário C relatou fazer exercícios uma vez por semana, e ter um moderado nível de atividade física. As configurações de eletrodos foram classificadas de acordo com a Figura 1. Os grupos musculares estimulados da região anterior da coxa bilateralmente foram o vasto lateral e o vasto medial, e na região posterior da coxa foi o bíceps femoral [5]. Neste trabalho, utilizaram-se quatro padrões de eletroestimulação: no padrão 1, houve estimulação apenas nos músculos anteriores da coxa, de forma alternada entre as pedaladas; no padrão 2, os músculos da região posterior também foram estimulados de forma alternada com os da região anterior; já no padrão 3, os músculos da região posterior foram estimulados ininterruptamente, enquanto os da região anterior eram estimulados alternadamente; o padrão 4 é idêntico ao padrão 3, entretanto a corrente foi calibrada para o mínimo valor necessário para manter o ciclo da bicicleta em movimento. Nos padrões 1, 2 e 3, a corrente foi calibrada para o limite do conforto do indivíduo durante contração isométrica dos músculos. A posição vertical (V) ocorreu quando o indivíduo utilizou a bicicleta de forma tradicional. A posição horizontal (H) ocorreu quando um assento foi adaptado na parte posterior da bicicleta para que os membros inferiores do indivíduo ficassem na posição horizontal.

Os três indivíduos participantes do estudo eram membros da equipe de pesquisa sem nenhuma limitação motora. Eles foram orientados para que mantivessem os músculos dos membros inferiores relaxados durante os testes. Todos os testes duraram de 15 a 120 segundos, aproximadamente, até que houvesse fadiga dos músculos estimulados, que foi relatado pelo próprio indivíduo, e a estimulação elétrica não era capaz de gerar as revoluções. Neste momento, o teste era interrompido.

Tabela 2: Parâmetros alterados durante os testes e seus valores.

Teste	Usuário	Configuração de eletrodos	Padrão de estimulação	Posição
1	A	3	1	H
2	A	3	2	H
3	A	3	3	H
4	B	1	1	V
5	B	1	1	H



Figura 1 – Configurações de eletrodos 1, 2 e 3.

## Resultados

Os testes 1, 2 e 3 demonstraram que o padrão de estimulação 3 é o único que consegue gerar ciclos de pedaladas suaves e contínuos. O padrão 1 foi capaz de gerar ciclos, porém acarretava em descontinuidades evidentes no final de cada extensão. O padrão 2 não introduziu novos efeitos em relação ao padrão 1, pois o torque gerado pelo bíceps femoral não era suficiente para causar movimento nos pedais.

Os testes 5, 6 e 7 demonstraram que a configuração de eletrodos número 3 foi a que gerou maior torque, sendo a única capaz de fornecer movimento nos pedais com o usuário B. Além disso, foi possível perceber que o indivíduo A foi capaz de movimentar os pedais com maior facilidade, utilizando uma corrente aproximadamente 40% menor que o indivíduo B (14-20mA, em contraste com 42-46mA). Nos testes 5, 6 e 7, o indivíduo não foi capaz de gerar mais de uma revolução completa nos pedais, enquanto no teste 4 esse objetivo foi alcançado.

Nos testes 8, 9 e 10 foi possível alcançar várias revoluções suaves e estáveis. No caso vertical, mais uma vez, a facilidade foi maior e, com a corrente mínima, foi possível pedalar por mais tempo antes de atingir a fadiga.

A Figura 2 mostra a potência desenvolvida nos testes 1 e 3. A Figura 3 mostra a potência desenvolvida nos testes 8, 9 e 10.

A Figura 4 compara os resultados dos testes 3 e 10, as últimas sessões dos indivíduos de alto e moderado níveis de atividade física, respectivamente. Conforme esperado, o primeiro conseguiu manter o movimento por mais tempo, mesmo na terceira sessão do teste.

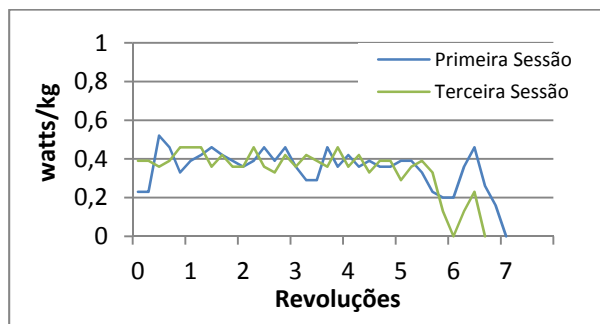


Figura 2 – Potência alcançada nos testes 1 e 3.

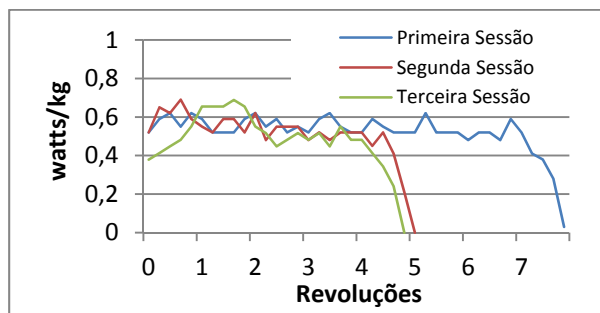


Figura 3 - Potência alcançada nos testes 8, 9 e 10.

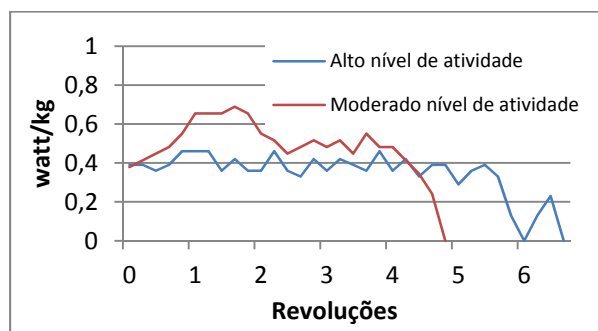


Figura 4 – Comparação entre as últimas sessões dos indivíduos de alto e moderado nível de atividade física

Todos os indivíduos relataram sensações fortes de formigamento durante os testes, porém sem desconforto, com exceção de um indivíduo que relatou forte desconforto na região posterior da coxa quando a corrente era aumentada de 16 para 18mA.

### Discussão

O indivíduo com alto nível de atividade física conseguiu melhores resultados de velocidade e força do que os indivíduos com nível de atividade física moderado ou baixo. Além disso, ele conseguiu pedalar por mais tempo sem fadigar, como pode ser observado nas Figuras 2 e 3.

Os testes 5, 6 e 7 não geraram pedaladas estáveis provavelmente porque o indivíduo possui um baixo nível de atividade física. Isso pode estar relacionado à maior dificuldade de recrutamento de unidades motoras. Por outro lado, o mesmo indivíduo foi capaz de obter

melhores resultados na posição vertical, quando o efeito da gravidade favorece a execução do movimento.

A configuração de eletrodos número 3, com o padrão de estimulação 3, foi a única combinação capaz de gerar movimento completo em todos os indivíduos e posições.

Em todos os casos, a fadiga muscular foi alcançada rapidamente, e, quando atingida, a FES, se mantida constante, não foi capaz de manter o movimento. Além disso, em cada sessão, o músculo fadigava mais rápido. Entretanto, quando o padrão de estimulação 4 foi utilizado, o tempo de teste até alcançar a fadiga sofreu pouca alteração entre a segunda e terceira sessão do indivíduo. Isso sugere ser possível gerar movimento com correntes menores e por mais tempo antes de atingir a fadiga. Nesse caso a calibração precisa ser feita em movimento, excluindo-se o efeito do maior esforço para iniciá-lo.

Os indivíduos relataram dificuldades em relaxar totalmente durante os testes, e isso foi confirmado ao perceber, de forma muito evidente, que os grupos musculares tibial anterior e gastrocnêmio eram contraídos durante os ciclos.

Observou-se a perda de momento angular no final de cada extensão/flexão porque a transição exige mais de grupos musculares não estimulados nos testes [6].

### Conclusão

Foi possível perceber que o indivíduo com alto nível de atividade física respondeu melhor aos testes, gerando mais ciclos com menor amplitude de corrente. Porém, a grande maioria do público alvo dos trabalhos futuros neste assunto são pessoas que sofreram implicações que limitaram seus movimentos e, conseqüentemente, reduziram drasticamente o nível de atividade física.

A fadiga aconteceu sempre com poucos minutos do início da estimulação. Indivíduos com membros inferiores paralisados atingem a fadiga muito mais rápido que indivíduos com total capacidade motora [7]. Por esse motivo, o fortalecimento prévio da musculatura é essencial.

Quando o músculo começa a fadigar, o mesmo nível de estimulação não é mais capaz de gerar o mesmo torque nos pedais e a extensão fica incompleta. Para que isso não aconteça, é necessário que a malha de controle seja fechada com uma realimentação sensorial do processo. Outra estratégia seria utilizar uma matriz de eletrodos com maior seletividade e alternar a estimulação em diferentes músculos capazes de gerar o mesmo movimento para, assim, tentar retardar a fadiga.

Como trabalhos futuros, são recomendados estudos dos comportamentos de mais grupos musculares quando estimulados por FES, em particular do tibial anterior, e gastrocnêmio [8]. Também é importante desenvolver um sistema de calibração da corrente inicial de forma padronizada e segura em indivíduos sem capacidade sensorial, além de procedimentos preliminares de fortalecimento muscular. Além disso, o desenvolvimento de matrizes de eletrodos será imprescindível para um sistema adaptativo funcionar

corretamente. Por fim, outros fatores ainda devem ser estudados e otimizados, como altura do assento, comprimento do braço do pedal, posicionamento do pé, cadência e carga [9]; bem como os parâmetros que foram mantidos fixos da Tabela 1.

### Agradecimentos

Os agradecimentos são destinados à equipe do Laboratório de Exercícios da Faculdade de Educação Física da Universidade de Brasília, que nos disponibilizou a bicicleta, o sistema de captura de dados, o software *Ergometric* 6.0.4.5, e auxílio no uso de todos os equipamentos.

### Referências

- [1] Lynch, C. L.; Popovic, M. R.; Functional Electrical Stimulation. *IEEE Control System Magazine*. 2008; p. 40-50.
- [2] Hendrika L. Gerrits, Arnold de Haan, Anthony J. Sargeant, Herman van Langen, Maria T. Hopman. Peripheral Vascular Changes After Electrically Stimulated Cycle Training in People With Spinal Cord Injury. *Arch Phys Med Rehabil*. 2001; 82:832-839.
- [3] T. Mohr, J. Pødenphant, F. Biering-Sørensen, H. Galbo, G. Thamsborg, M. Kjær. Increased Bone Mineral Density after Prolonged Electrically Induced Cycle Training of Paralyzed Limbs in Spinal Cord Injured Man. *Calcif Tissue Int*. 1997; 61:22-25.
- [4] Scremin AME, Kurta L, Gentili A, Wiseman B, Perell K, Kunkel C, Scremin OU. Increasing Muscle Mass in Spinal Cord Injured Persons With a Functional Electrical Stimulation Exercise Program. *Arch Phys Med Rehabil*. 1999; 80:1531-1536.
- [5] Netter FH. *Atlas de Anatomia Humana*. 3ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2003.
- [6] Hakansson NA, Hull ML. Functional Roles of the Leg Muscles When Pedaling in the Recumbent Versus the Upright Position. *Journal of Biomechanical Engineering*. 2005; 127:301-310.
- [7] Popovic D, Sinkjaer T. *Control of Movement for the Physically Disable – Control for Rehabilitation Technology*. 2ª ed. Center for Sensory-Motor Interaction, 2003.
- [8] Lopes AD, Alouche SR, Hakansson N, Cohen M. Electromyography During Pedaling on Upright and Recumbent Ergometer. *The International Journal of Sports Physical Therapy*. 2014; 9(1):76-81.
- [9] Johnston TE. Biomechanical Considerations for Cycling Interventions on Rehabilitation. *Physical Therapy*. 2014; 87(9):1243-1252.