

ALTERAÇÕES NA COERÊNCIA CORTICAL INTER-HEMISFÉRICA PRODUZIDAS PELA ESTIMULAÇÃO ELÉTRICA FUNCIONAL (FES)

Letícia Ecard¹, Andressa Pitanga S. da Silva², Marijose Peçanha Neto³, Maurício Cagy⁴, Roberto Piedade⁵, Pedro Ribeiro⁶

RESUMO - O presente estudo teve como objetivo observar alterações corticais produzidas pela estimulação elétrica funcional (FES), através da eletrencefalografia quantitativa (qEEG). Simultaneamente à captação do sinal eletrencefalográfico, realizou-se uma eletroestimulação no antebraço direito para estimulação da extensão do indicador. A amostra consistiu de 45 sujeitos randomizados em 3 grupos de 15. O grupo controle foi submetido a 24 blocos de estimulação com intensidade de corrente zero. O grupo 1 foi submetido a 24 blocos e o grupo 2 a 36 blocos. A coerência entre os pares de eletrodos F3-F4, C3-C4 e P3-P4 foi analisada ao longo dos grupos através de avaliação estatística. Os resultados apontaram para um aumento da coerência inter-hemisférica após a eletroestimulação.

PALAVRAS-CHAVE: FES, EEG, coerência inter-hemisférica.

Changes in cortical interhemispheric coherence produced by functional electrical stimulation (FES)

ABSTRACT - The aim of the present study was to observe cortical alterations produced by functional electrical stimulation (FES), through quantitative electroencephalography (qEEG). Electrostimulation was performed on the right forearm to stimulate the extension of the index finger. EEG activity was recorded simultaneously. The sample consisted of 45 subjects randomly divided into 3 groups of 15 subjects each. The control group was submitted to 24 blocks of stimulation at a current intensity of zero. Group 1 was submitted to 24 blocks and group 2 to 36 blocks. Interhemispheric coherence between F3-F4, C3-C4 and P3-P4 was assessed through a statistical analysis. Results pointed out to increased coherence values after stimulation.

KEY WORDS: FES, EEG, interhemispheric coherence.

Ao longo dos anos e devido ao aperfeiçoamento de técnicas distintas, o aprendizado de habilidades motoras tem despertado um crescente interesse no meio científico. Diversos estudos têm sido desenvolvidos visando uma compreensão pormenorizada acerca dos mecanismos funcionais envolvidos na aquisição e processamento de novas habilidades¹⁻³. O estudo do aprendizado motor possui comprovada utilidade clínica uma vez que este conhecimento pode ser aplicado no processo de reabilitação motora-funcional. Assim, o entendimento do processo normal

deste aprendizado, assim como das alterações sofridas pelo sistema nervoso lesionado, se torna essencial na elaboração de estratégias de tratamento. Dentre os aparelhos utilizados para promover a reabilitação funcional dos pacientes destaca-se o FES (estimulação elétrica funcional). Embora seja um aparelho importante para complementar e até potencializar a terapia⁴, seus efeitos no organismo e, mais especificamente, na dinâmica cerebral, ainda são pouco conhecidos. Por outro lado, a eletrencefalografia (EEG) tem sido cada vez mais utilizada na avaliação de mudan-

¹Mestranda, Laboratório de Mapeamento Cerebral e Integração Sensório-Motora, Instituto de Psiquiatria (IPUB), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ); ²Mestre em Ciência da Motricidade Humana, Universidade Castelo Branco (PROCIMH-UCB), Brasil, Professora, Universidade Vale do Rio Doce - UNIVALE; ³Mestranda em Ciência da Motricidade Humana, Universidade Castelo Branco (PROCIMH-UCB); ⁴D.Sc. em Engenharia Biomédica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ); ⁵Professor Adjunto III Doutor, Coordenador do Laboratório de Mapeamento Cerebral e Integração Sensório-Motora, Instituto de Psiquiatria (IPUB), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ); ⁶Professor Adjunto II PhD, Escola de Educação Física e Desportos (EEFD), Laboratório de Mapeamento Cerebral e Integração Sensório-Motora, Instituto de Psiquiatria (IPUB), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ); Professor Pesquisador, Universidade Castelo Branco (PROCIMH-UCB).

Recebido 4 Agosto 2006, recebido na forma final 8 Novembro 2006. Aceito 13 Novembro 2006.

Dra. Letícia Ecard - Instituto de Psiquiatria (IPUB), Laboratório de Mapeamento Cerebral e Integração Sensório-Motora, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Avenida Venceslau Brás 71 / Fundos - 22290-140 Rio de Janeiro RJ - Brasil. E-mail: leticiaecard@bol.com.br

ças eletrofisiológicas decorrentes do aprendizado motor⁵⁻⁷. A sensibilidade desta técnica pode ainda ser aumentada por métodos de análises quantitativas (EEGq)⁸.

Neste contexto, monitorar a atividade cortical permite a investigação de padrões neurais associados a processos cognitivos, sensoriais e motores⁹ que podem elucidar mecanismos relacionados à integração sensorio-motora e à construção do movimento voluntário. No processo de reabilitação, o conhecimento desses mecanismos é de extrema importância. Entretanto, estudos sobre os efeitos da eletroestimulação na dinâmica cortical e na atividade eletrencefalográfica são praticamente inexistentes na literatura. Em outras palavras, a combinação destas duas técnicas não é comumente descrita.

Assim, a fim de compreender melhor os efeitos eletrofisiológicos desencadeados pelo FES, o presente estudo teve como objetivo observar alterações na coerência inter-hemisférica produzidas pela estimulação elétrica funcional.

MÉTODO

Amostra – A amostra do estudo consistiu de 45 sujeitos, sendo 21 do gênero feminino e 24 do gênero masculino, entre 20 e 40 anos de idade. Os sujeitos foram divididos aleatoriamente em três grupos: grupo controle, grupo 1 e grupo 2. Foram incluídos no estudo apenas sujeitos saudáveis, sem nenhum comprometimento cognitivo e que não estivessem fazendo uso de substâncias psicotrópicas ou psicoativas. Foi aplicado um questionário detalhado para identificar e excluir do experimento qualquer sujeito que pudesse contaminar os resultados. A lateralidade também foi utilizada como critério de exclusão. Assim, o inventário de Edinburg¹⁰ foi aplicado e somente os sujeitos destros foram incluídos no estudo.

Todos os sujeitos assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido, no qual foram detalhadas as condições experimentais. O experimento foi submetido e aprovado pelo Comitê de Ética do Instituto de Psiquiatria.

Procedimento experimental – A sala utilizada para a realização do exame foi preparada com um isolamento de som e, durante o exame, as luzes foram bastante reduzidas. Os sujeitos sentaram-se confortavelmente em uma cadeira, tendo seus braços apoiados em uma mesa colocada à sua frente, com o objetivo de diminuir os artefatos musculares. Foi colocada uma venda nos olhos dos sujeitos para evitar possíveis estímulos visuais e para diminuir os artefatos de piscada de olhos. Foi utilizado um aparelho de estimulação elétrica funcional (FES) da marca Ibramed, para estimular a extensão do dedo indicador da mão direita. Essa mesma mão ficou apoiada em um suporte posicionado em cima da mesa, a qual possuía velcros para isolar ou imobilizar todos os outros dedos da mão, deixando livre apenas o dedo indicador para a estimulação (Fig 1).

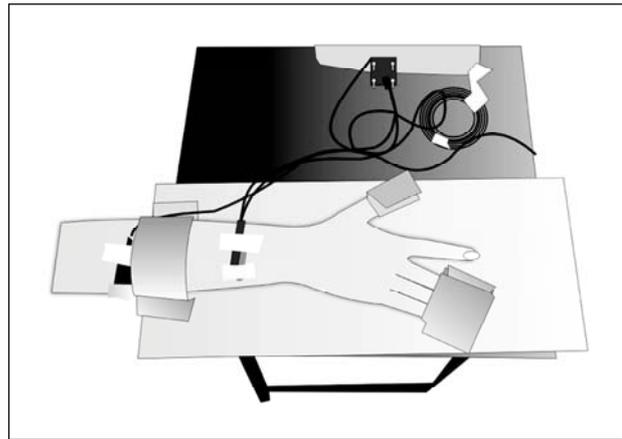


Fig 1. Suporte para posicionamento de antebraço e mão.

O aparelho de estimulação elétrica funcional foi calibrado para esse experimento pelo osciloscópio Tektronix TDS 220, Digital-Real-Time de 100 MHz (megahertz), e seguiu os seguintes parâmetros: frequência da corrente (R), 48,8 Hz; intensidade da corrente (A), 2.10^{-3} A; tempo de passagem da corrente (tempo on), 4,86 seg; tempo de ausência de passagem da corrente (tempo off), 8,39 seg; período da corrente (T) em on, 320 μ s; período da corrente (T) em off, 25 μ s; área do eletrodo, $4,5.10^{-4}$ m²; densidade da corrente: 44 A/m².

A impedância variou entre 800 e 1500 Ω . Para atingir essa faixa de variação, o local da pele onde foram posicionados os eletrodos para a passagem da corrente teve seus pêlos raspados com lâmina de barbear e limpos com álcool. Além disso, foi usado um gel entre o eletrodo e a pele do sujeito para facilitar a condução da corrente. Esses eletrodos foram fixados um a 5 cm (centímetros) do epicôndilo lateral na face lateral do antebraço e o outro a 12 cm do primeiro, ocupando a face posterior do antebraço, seguindo a trajetória do tendão do extensor do dedo indicador. O experimento foi realizado com trilhas e blocos. Cada trilha foi estabelecida como um tempo de estimulação, chamado tempo *on* com 4,86 seg de passagem de corrente, mais um tempo de repouso, chamado tempo *off* com 8,39 seg sem passagem de corrente. Cada bloco foi constituído de 6 trilhas. O grupo controle realizou 24 blocos, com uma pausa de 1 min a cada 6 blocos realizados. Porém, a intensidade da corrente desse grupo foi 0 A. O grupo 1 realizou 24 blocos com pausa de 1 min a cada 6 blocos, obedecendo integralmente às condições do aparelho descritas anteriormente. O grupo 2 realizou 36 blocos com pausa de 1 min a cada 6 blocos, nas mesmas condições do grupo 1, diferindo deste apenas em números de blocos realizados. Simultaneamente à estimulação elétrica funcional do músculo extensor dos dedos, foi realizada a captação do sinal eletrencefalográfico.

Aquisição de dados – Para a captação do sinal eletrencefalográfico foi utilizado o aparelho Braintech 3000 (EMSA - Instrumentos Médicos, Brasil), sistema que utiliza uma placa conversora analógica-digital (A/D) de 32 canais com

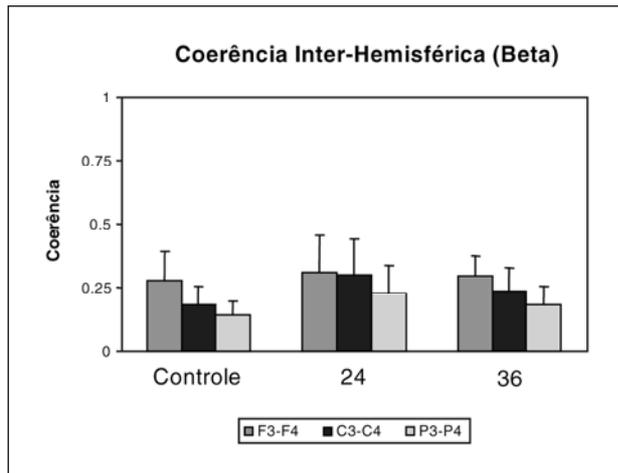


Fig 2. Variação dos valores de coerência ao longo dos grupos experimentais nos pares de eletrodos F3-F4, C3-C4 e P3-P4 ($p \leq 0,05$).

resolução de 12 bits, colocada em um *slot* ISA de um Pentium III - com processador de 750 Hz. Sinais eletrofisiológicos foram filtrados analogicamente entre 0,16 Hz (passa-altas) e 35 Hz (passa-baixas), tendo uma taxa de amostragem de 200 Hz. Foi utilizado o software de aquisição denominado EEG Captação (Emsa-DELPHI 5.0), com um filtro *Notch* de 60 Hz, e ainda filtros de corte de 0,3 Hz (passa-baixas) e 25 Hz (passa-altas). O sistema internacional 10-20¹¹ foi usado para a colocação de 19 eletrodos monopolares ao longo do escalpo (áreas: frontal, temporal, parietal e occipital) e um eletrodo em cada orelha (lóbulo). Os eletrodos foram montados em uma touca de *nylon* (ElectroCap Inc., Fairfax, VA, USA) com sistema 10-20 pré-fixados. Os lóbulos das orelhas foram usados como referências (bi-auricular). Foram verificados, *a priori*, os níveis de impedância de cada eletrodo, cujos valores foram mantidos entre 5-10 K Ω . Para que os sinais adquiridos tivessem amplitude total (pico a pico) menor que 100 μ V, ele foi amplificado com ganho de 20000. A atividade elétrica ocular foi estimada com a colocação de dois eletrodos de 9 mm de diâmetro montados de forma bipolar. Os eletrodos foram posicionados, respectivamente, acima e abaixo da órbita do olho direito, para registrar os movimentos oculares verticais e, no canto externo do mesmo, para registrar movimentos oculares horizontais. Um programa de visualização, denominado EEG Telas (Emsa-Delphi 5.0) foi utilizado para eliminar os artefatos visuais.

Análise de dados e cálculo da variável dependente – Após a coleta de dados e seu respectivo arquivamento, foi realizado o cálculo da variável dependente extraída da EEGq. Uma rotina em Matlab 5.3[®] (Mathworks Inc., Natick, MA, USA) foi implementada para realizar a análise espectral e estimar o parâmetro específico de interesse: coerência inter-hemisférica na banda beta (13-25 Hz).

A coerência reflete a variação de atividade elétrica entre pares de eletrodos homólogos. Em outras palavras, coerência representa o grau de associação, ou conectividade fun-

cional, entre eletrodos distintos. Conseqüentemente, coerência é uma medida de sincronização entre duas regiões corticais¹².

Tradicionalmente, este grau de associação é expresso através de um valor que flutua entre 0 e 1. Valores próximos a zero expressam baixo grau de associação e, em contrapartida, valores próximos a 1 representam alto grau de correlação ou coerência. Cabe ressaltar que o cálculo da variável dependente foi realizado levando em consideração apenas o momento pós-estimulação.

Banda de freqüência e localização espacial – Os dados eletrencefalográficos referem-se exclusivamente à banda beta (13-35 Hz). A escolha por esta banda se justifica pelo fato de beta estar particularmente associada a processos de integração sensorio-motora¹³. Eletrodos localizados em áreas frontais, centrais e parietais foram selecionados. Áreas frontais foram analisadas devido à sua associação com mecanismos de atenção, motivação e planejamento. Eletrodos centrais e parietais foram analisados por serem representativos de áreas pré-motoras e motoras primárias, além de áreas somatosensoriais primárias¹⁴.

Análise estatística – Para a análise da coerência foi realizada uma Anova *two-way*, condição x eletrodo (3x3). Um teste Post Hoc (Scheffé) foi empregado a posteriori. As condições experimentais foram estabelecidas como: grupo controle (C), grupo 1 (24) e grupo 2 (36), em função do número de estimulações recebidas; os pares de eletrodos selecionados para a análise foram: F3-F4, C3-C4 e P3-P4. Como dito anteriormente, apenas a banda beta e o momento pós-estimulação foram analisados.

RESULTADOS

A Figura 2 ilustra a variação dos valores de coerência ao longo das condições experimentais (grupos) e dos eletrodos pré-estabelecidos. A Anova revelou efeitos principais para condição ($p=0,018$) e eletrodo ($p=0,001$). Não foi observada interação entre condição e eletrodo ($p=0,770$). O Post Hoc apontou uma diferença estatisticamente significativa entre C e 24, ou seja, entre o grupo controle e o grupo submetido a 24 blocos de estimulação e entre F3-F4 e P3-P4. Especificamente, observou-se aumento nos valores de coerência nestes dois casos.

DISCUSSÃO

Apesar da comprovada relevância clínica e experimental tanto das análises de coerência quanto da estimulação elétrica, estudos relacionando a eletroestimulação com alterações corticais (expressas por variáveis do EEGq) são praticamente inexistentes na literatura. Assim, o estudo se propôs a investigar os efeitos da eletroestimulação na dinâmica cortical. Especificamente foram analisadas variações na coerência inter-hemisférica decorrentes da estimulação

elétrica funcional. Os resultados evidenciaram aumento estatisticamente significativo nos valores de coerência após a estimulação, tendo sido observada especificamente uma diferença entre o grupo controle e o grupo 1 (24 blocos de estimulação). Entretanto, não foram observadas diferenças entre o grupo 1 e o grupo 2, ou seja, não houve diferença entre os sujeitos que receberam 24 blocos de estimulação e aqueles que receberam 36 blocos. Da mesma forma, não houve diferença entre o grupo controle e o grupo 2. Assim, uma vez que os grupos que receberam a eletroestimulação não diferiram entre si, a quantidade de estimulação aplicada (i.e., número de blocos) parece não ter sido o fator que determinou as alterações observadas. Em outras palavras, a eletroestimulação gerou alterações na coerência independentemente da quantidade de estímulos aplicados. Os resultados também apontaram para uma diferença entre as áreas corticais analisadas; foram observados valores de coerência menores em áreas frontais quando comparados a áreas parietais. Com isso, observou-se uma tendência de diminuição de coerência ao longo do escalpo.

Neste contexto, os achados suportam dados prévios de estudos com desenhos experimentais similares. Diversos estudos eletrencefalográficos têm descrito processos de dessincronização (ERD) e sincronização (ERS) na banda beta, i.e., uma diminuição e um aumento da amplitude espectral deste ritmo, em função de eventos motores. Este padrão pode ser observado em áreas motoras primárias e pré-motoras durante o movimento voluntário^{13,15}, em áreas sensoriomotoras durante a estimulação elétrica^{16,17}, durante o planejamento mental do movimento⁶ e durante movimentos passivos¹⁸.

Por outro lado, análises de coerência também têm contribuído significativamente para os conceitos modernos sobre como diferentes áreas interagem, por exemplo, durante tarefas de integração visuo-motora^{12,19,20}, durante a performance de seqüências de movimentos dos dedos e também para caracterizar mudanças regionais em acoplamento neuronal relacionado à antecipação de eventos somatossensoriais^{21,22}. Assim, a análise de coerência inter-hemisférica tem auxiliado no entendimento dos processos neurofisiológicos subjacentes à performance e aprendizagem de movimentos simples e complexos. Através de diferentes paradigmas, estes estudos têm evidenciado um aumento de acoplamento funcional, i.e., coerência, durante a execução do gesto motor. Além disso, discute-se que diferentes tipos de demanda são refle-

tidos por mudanças no acoplamento funcional de diferentes áreas corticais e não apenas por mudanças nas ativações regionais. Por esse motivo, acredita-se que oscilações na coerência refletem diretamente a retenção de informação pelo sistema motor.

Um dos poucos estudos que analisaram a influência da eletroestimulação na atividade elétrica cortical foi realizado por Muller et al.²³. Segundo os autores, o processamento sensoriomotor durante a estimulação elétrica funcional parece envolver os mesmos processos relacionados a movimentos voluntários. Neste contexto, seguindo este pressuposto e tomando como base a literatura citada anteriormente, os resultados confirmam a hipótese de que a eletroestimulação promoveria aumento da coerência inter-hemisférica. Cabe ressaltar que diferentes quantidades de blocos de eletroestimulação possivelmente gerariam resultados diferentes. Nesse sentido, estudos subsequentes, utilizando quantidades variadas do estímulo, permitiriam estabelecer o momento específico em que a coerência inter-hemisférica é alterada em função da aplicação de eletroestimulação. Assim, estudos adicionais são certamente necessários para maior aprofundamento acerca dos efeitos do FES em variáveis do EEG e na dinâmica cerebral tanto em sujeitos saudáveis quanto em pacientes com distúrbios motores que necessitem de reabilitação funcional.

REFERÊNCIAS

1. Ferrari M. Observing the observer: self-regulation in the observational learning of motor skills. *Dev Rev* 1996;16:203-240.
2. Plautz EJ, Milliken GW, Nudo RJ. Effects of repetitive motor training on movement representations in adult squirrel monkeys: role of use versus learning. *Neurobiol Learn Mem* 2000;74:27-55.
3. Weeks DL, Anderson LP. The interaction of observational learning with overt practice: effects on motor skill learning. *Acta Psychol* 2000;104:259-271.
4. Vitenzon AS, Mironov EM, Petrushanskaya KA. Functional electrostimulation of muscles as a method for restoring motor functions. *Neurosci Behav Physiol* 2005;7:709-714.
5. Rau C, Plewnia C, Hummel F, Gerloff C. Event-related desynchronization and excitability of the ipsilateral motor cortex during simple self-paced finger movements. *Clin Neurophysiol* 2003;114:1819-1826.
6. McFarland DJ, Miner LA, Vaughan TM, Wolpaw JR. Mu and beta rhythm topographies during motor imagery and actual movements. *Brain Topogr* 2000;3:177-186.
7. Houdayer E, Labyt E, Cassim F, Bourriez JL, Derambure P. Relationship between event-related beta synchronization and afferent inputs: Analysis of finger movement and peripheral nerve stimulations. *Clin Neurophysiol* 2006;117:628-636.
8. Veiga H, Deslandes A, Cagy M, Fiszman A, Piedade RA, Ribeiro P. Neocortical electrical activity tomography in chronic schizophrenics. *Arq Neuropsiquiatr* 2003;61:712-717.
9. Gevins A, Smith ME, McEvoy LK, Leong H, Le J. Electroencephalographic imaging of higher brain function. *Phil Trans R Soc Lond B Biol Sci* 1999;354:1125-1133.
10. Oldfield R. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 1971;9:97-113.
11. Jasper H. The ten-twenty electrode system of international federation. *EEG and Clin Neurophysiol* 1958;10:371-375.
12. Shaw JC. An introduction to the coherence function and its use in EEG signal analysis. *J Med Eng Technol* 1981;5:279-288.

13. Ginter JJr, Blinowska KJ, Kaminski M, Durka PJ. Phase and amplitude analysis in time -frequency space- application to voluntary finger movement. *J Neurosci Methods* 2001;110:113-124.
14. Kandel E, Schwartz S, Jessel T. *Principles of neuroscience*. 4.Ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
15. Feige B, Aertsen A, Feige-Kristeva R. Dynamic synchronization between multiple cortical motor areas and muscle activity in phasic voluntary movements. *J Neurophysiol* 2000;5:2622-2629.
16. Neuper C, Pfurtscheller G. Evidence for distinct beta resonance frequencies in human EEG related to specific sensorimotor cortical areas. *Clin Neurophysiol* 2001;112:2084-2097.
17. Pfurtscheller G, Neuper C, Ramoser H, Muller-Gerking J. Visually guided motor imagery activates sensorimotor areas in humans. *Neurosci Lett* 1999;269:153-156.
18. Alegre M, Labarga A, Gurtubay IG, Iriarte J, Malanda A, Artieda J. Beta electroencephalograph changes during passive movements: sensory afferences contribute to beta event-related desynchronization in humans. *Neurosci Lett* 2002;331:29-32.
19. Gerloff C, Corwell B, Chen R, Hallett M, Cohen LG. Stimulation over the human supplementary motor area interferes with the organization of future elements in complex motor sequences. *Brain* 1997;120: 1587-1602.
20. Classen J, Gerloff C, Honda M, Hallett M. Integrative visuomotor behavior is associated with interregionally coherent oscillations in the human brain. *J Neurophysiol* 1998;79:1567-1573.
21. Andres F, Dichgans J, Hallett M, Gerloff C. Complex unimanual finger movements are associated with a similar amount of interhemispheric functional coupling as bimanual movements. *Int J Psychophysiol* 1998;30:188.
22. Manganotti P, Gerloff C, Toro C, et al. Task-related coherence and task-related spectral power changes during sequential finger movements. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1998;109:50-62.
23. Müller GR, Neuper C, Rupp R, Keinrath C, Gerner HJ, Pfurtscheller G. Event-related beta EEG changes during wrist movements induced by functional electrical stimulation of forearm muscles in man. *Neurosci Lett* 2003;340:143-147.