

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o
texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir de
01/02/2022.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JULIO DE MESQUITA FILHO”

Câmpus de Ilha Solteira - SP

PAULO BRONIERA JUNIOR

INTERFACE CÉREBRO COMPUTADOR ALIADA À
ESTIMULAÇÃO ELÉTRICA FUNCIONAL E DETECÇÃO DE
FADIGA NEUROMUSCULAR POR MMG APLICADA AO
CONTROLE MUSCULAR ISOMÉTRICO EM PESSOAS COM
LESÃO MEDULAR COMPLETA

Ilha Solteira

2021

PAULO BRONIERA JUNIOR

INTERFACE CÉREBRO COMPUTADOR ALIADA À
ESTIMULAÇÃO ELÉTRICA FUNCIONAL E DETECÇÃO DE
FADIGA NEUROMUSCULAR POR MMG APLICADA AO
CONTROLE MUSCULAR ISOMÉTRICO EM PESSOAS COM
LESÃO MEDULAR COMPLETA

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Especialidade: Automação.

Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira
Orientador

Ilha Solteira

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B869i Broniera Junior, Paulo.
Interface cérebro computador aliada à estimulação elétrica funcional e detecção de fadiga neuromuscular por MMG aplicada ao controle muscular isométrico em pessoas com lesão medular completa / Paulo Broniera Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
73 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2021

Orientador: Marcelo Minhoto Carvalho Teixeira
Inclui bibliografia

1. Interface cérebro computador. 2. Eletroencefalografia. 3. Estimulação elétrica funcional. 4. Mecanomiografia. 5. Lesão medular completa.

Raiane da Silva Santos
Raiane da Silva Santos

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: INTERFACE CÉREBRO COMPUTADOR ALIADA À ESTIMULAÇÃO ELÉTRICA FUNCIONAL E DETECÇÃO DE FADIGA NEUROMUSCULAR POR MMG APLICADA AO CONTROLE MUSCULAR ISOMÉTRICO EM PESSOAS COM LESÃO MEDULAR COMPLETA

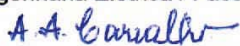
AUTOR: PAULO BRONIERA JUNIOR

ORIENTADOR: MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:

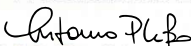


Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. MARCELO AUGUSTO ASSUNÇÃO SANCHES (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. ANTONIO PADILHA LANARI BO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade de Brasília



Prof. Dr. GUILHERME NUNES NOGUEIRA NETO (Participação Virtual)
Departamento de Pós Graduação em Tecnologia em Saúde / Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Escola Politécnica

Ilha Solteira, 01 de fevereiro de 2021

*Dedico essa obra à minha família, em especial a minha esposa Gabriela e minha filha Alice,
por todo amor, apoio, confiança e incentivo em todos os momentos.*

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço a Deus por ter colocado em meu caminho os desafios que enfrentei, pois só assim tive a real noção das minhas capacidades, agradeço também aos meus pais Paulo e Nelma e meus irmãos Alessandra e Valdinei, que pela fé depositada nas minhas vontades me ensinaram a ter fé em mim mesmo, e principalmente fé em Deus.

Não completamos tarefas sozinhos pois necessitamos quem nos ensinem e felizes são aqueles que transferem o que sabem, aos professores que pacientemente se colocaram a disposição, obrigado! Ao Prof^o. Dr. Eddy Krueger, que gentilmente me recebeu como "orientado" e membro do Laboratório de Engenharia Neural e Reabilitação - LENeR, obrigado pelos conselhos, paciência, companheirismo, direcionamentos e ensinamentos, os quais serão lembrados por toda a minha caminhada. Ao meu orientador Prof^o. Dr. Marcelo Teixeira pelos ensinamentos, oportunidade e confiança que foram de extrema importância para realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. André Eugênio Lazzaretti, colega de trabalho no LENeR e professor da UTFPR-CT, que nos cedeu o hardware OpenBCI, bem como acompanhou e colaborou no desenvolvimento das pesquisas. Ao Prof. Dr. Daniel Campos, também colega de pesquisa do LENeR e professor da UTFPR-AP, pela colaboração nas pesquisas, formatação dos resultados e construção das figuras utilizadas nesta tese.

A todos os colegas e voluntários que passaram pelo LENeR, compartilhamos bons momentos, em especial Alex, Agnaldo e William Bispo.

Ao meu Cunhado Victor Medeiros Pierote que colaborou com a construção da estrutura mecânica utilizada nos ensaios.

Aos professores da Universidade Estadual de Londrina (UEL). Prof. Dr. Márcio Covacic e Prof. Dr. Ruberlei Gaino pela indicação e acompanhamento inicial dos trabalhos.

Agradeço ainda as contribuições ao trabalho do Prof^o. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho e Prof^o. Dr. Marcelo Augusto Assunção Sanches presentes nas bancas das disciplinas de estudos especiais, qualificação e defesa.

Por fim e mais importante, agradeço a minha esposa Gabriela! Lembro-me que foi a primeira a concordar simplesmente com a minha vontade de tentar, abrindo mão de suas coisas para que eu pudesse conquistar as minhas, muitíssimo obrigado!

Este trabalho também contou com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - processos números 151210/2018-7, 314241/2018-3, 312170/2018-1 e 309872 2018-9 e parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001, Fundação Araucária (FA) e pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

*“Deus nos concede, a cada dia,
uma página de vida nova no livro do tempo.*

*Aquilo que colocarmos nela,
corre por nossa conta.”*

Chico Xavier

RESUMO

Pessoas com lesão medular (LM) podem ter seus músculos paralisados ativados por estimulação elétrica funcional (FES). Esta ferramenta de neuro modulação não invasiva é importante para induzir neuroplasticidade ou durante o controle de movimentos em neuropróteses. A literatura mostra que a integração da interface cérebro-computador (BCI) com a estimulação elétrica funcional (FES) tem um potencial promissor na área de reabilitação. A eletroencefalografia (EEG) é capaz de abstrair as intenções dos movimentos por meio de imagética motora, acionando a FES. Esta pesquisa apresenta um sistema de controle neuromuscular isométrico do músculo quadríceps, ativado por EEG. Além disso, é proposta a detecção da fadiga neuromuscular por meio da técnica da mecanomiografia (MMG), utilizada para desligamento do sistema. Um estudo piloto foi testado com um voluntário com paraplegia crônica de 42 anos (sem contração voluntária abaixo do nível da lesão T8). Para tanto, o procedimento de treinamento dos sinais de EEG foi dividido nas fases de calibração e feedback. Na primeira fase, quatro canais de EEG e o classificador Linear Discriminant Analysis (LDA) foram usados para classificar entre a imagética motora da perna direita e repouso. A precisão máxima obtida durante esta etapa foi de 77 %. Na fase de feedback, o voluntário conseguiu ativar a FES por meio do BCI em todos os testes avaliados. O controle de força em malha fechada foi testado com o *setpoint* de 2kgf e 2,5kgf e mostrou-se estável, desligando com sucesso a FES usando o limiar de fadiga do sinal MMG.

Palavras-chave: Interface cérebro computador. Eletroencefalografia. Estimulação elétrica funcional. Mecanomiografia. Lesão medular completa.

ABSTRACT

People with spinal cord injury (SCI) can have their paralyzed muscles activated through functional electrical stimulation (FES). This non-invasive neuromodulation tool is important to induce neuroplasticity or during movement control in neuroprosthesis. The literature shows that the integration of the brain-computer interface (BCI) with functional electrical stimulation (FES) has promising potential in the area of rehabilitation. Electroencephalography (EEG) is able to abstract movements intentions through motor imagery, triggering FES. This research presents an isometric neuromuscular control system of the quadriceps muscle, activated by EEG. Additionally, the detection of neuromuscular fatigue through the mechanomyography (MMG) technique is proposed, which is used to shut-off the system. A pilot study was tested with a chronic 42-years-old paraplegic (no voluntary contraction below the lesion level T8) volunteer. To do so, the training procedure for EEG signals was divided into the calibration and feedback phases. In the first phase, four EEG channels and the Linear Discriminant Analysis (LDA) classifier were used to classify between motor imagery of the right leg and remain at rest. The maximum accuracy obtained during this stage was 77%. In the feedback phase, the volunteer was able to connect FES through BCI in all evaluated tests. The closed-loop force control was tested with the setpoint of 2kgf and 2.5kgf and proved to be stable, successfully turning off the FES using the fatigue threshold from the MMG signal.

Keywords: Brain-computer interface. Electroencephalography. Functional electrical stimulation. Mechanomyography. Spinal cord injury.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Posicionamento dos eletrodos de EEG superficial: (a) posições gerais. (b) Posição de fixação utilizada nesta tese.	19
Figura 2	Etapas de processamento, extração de característica e classificação dos sinais de EEG em um sistema BCI.	21
Figura 3	Configuração dos equipamentos e procedimentos técnicos durante os protocolos.	32
Figura 4	Precisão dos classificadores. Estimulação elétrica em 20 Hz, 35 Hz e 50 Hz. .	37
Figura 5	Análise estatística utilizando o método <i>d</i> de Cohen.	38
Figura 6	Instante de extensão máxima eletricamente estimulada.	44
Figura 7	Visão geral do protocolo de fadiga	46
Figura 8	Protocolo experimental para obtenção da curva de identificação de malha aberta. 48	
Figura 9	Protocolo de treinamento de classificadores usando sinais de EEG.	50
Figura 10	Fase de Feedback	51
Figura 11	Visão geral da fase de feedback.	53
Figura 12	Resultados do Ensaio 1.	54
Figura 13	Resultados do Ensaio 2.	55
Figura 14	Vista da IHM do estimulador elétrico desenvolvido.	72
Figura 15	Diagrama em blocos do estimulador elétrico.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Participantes selecionados	30
Tabela 2	Comparação com trabalhos correlatos	39
Tabela 3	Participante selecionado	43
Tabela 4	Classificação do estágio de treinamento EEG	52
Tabela 5	Comparações com trabalhos relacionados à interface EEG-FES.	56

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

AROM	<i>Active Range of Motion</i>
BCI	<i>Brain-Computer Interfaces</i>
CSP	<i>Common spatial pattern</i>
CPCA	<i>Class-Wise Principal Component Analysis</i>
EEG	Elektroencefalografia
EMEE	Extensão Máxima Elettricamente Estimulada
FES	Estimulação Elétrica Funcional
LDA	<i>Linear discriminant analysis</i>
LFP	<i>Local Field Potentials</i>
LM	Lesão Medular
MMG	Mecanomiografia
MLP	<i>Multi Layer Perceptron</i>
MUA	<i>Multi-Unit Activity</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
SUA	<i>Single-Unit Activity</i>
SSVEP	<i>Steady-State Visual Evoked Potential</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
VRPN	interface de Rede Perifrica de Realidade Virtual
PI	Proporcional integral
MRCP	<i>Movement Related Cortical Potential</i>
DTI	<i>Diffusion Tensor Imaging</i>
TA	Tibial Anterior
MEP	Potencial Evocado Motor
PN	Pico Negativo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	ORGANIZAÇÃO DA TESE	17
2	ASPECTOS RELACIONADOS AOS SISTEMAS BCI-FES NA REABILITAÇÃO DE MEMBROS INFERIORES	18
2.1	INTERFACES CÉREBRO COMPUTADOR	18
2.1.1	Classificação de padrões dos sinais de EEG de membros inferiores	20
2.2	SISTEMAS BCI ALIADO À ESTIMULAÇÃO ELÉTRICA FUNCIONAL	22
2.3	LIMITAÇÕES DOS SISTEMAS BCI-FES	27
2.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	28
3	INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO DOS CANAIS DE EEG NA CLASSIFICAÇÃO DE IMAGÉTICA MOTORA DE MEMBROS INFERIORES DURANTE A ESTIMULAÇÃO ELÉTRICA EM INDIVÍDUOS SAUDÁVEIS E COM PARAPLEGIA	29
3.1	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1.1	Participantes	29
3.1.1.1	<i>CrITÉRIOS de inclusão de voluntários hígidos (H)</i>	29
3.1.1.2	<i>CrITÉRIOS de inclusão de voluntários com paraplegia (P)</i>	30
3.1.1.3	<i>CrITÉRIOS de exclusão</i>	30
3.1.1.4	<i>Participantes Selecionados</i>	30
3.1.2	Posicionamento dos canais de EEG	31
3.1.3	Aquisição EEG	31
3.1.4	Protocolo de imagética motora	31
3.1.5	Estimulação Elétrica	32
3.1.6	Filtragem espacial e classificação dos padrões	33
3.1.6.1	<i>Filtragem espacial</i>	33
3.1.6.2	<i>Support Vector Machine (SVM)</i>	35
3.1.6.3	<i>Redes neurais artificiais</i>	35

3.1.6.4	<i>Linear Discriminant Analysis (LDA)</i>	35
3.1.7	Análise estatística	36
3.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
3.3	COMPARAÇÃO DA PESQUISA COM TRABALHOS CORRELATOS	39
3.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	40
4	INTERFACE CÉREBRO MÁQUINA ALIADA A FES E DETECÇÃO DE FADIGA NEUROMUSCULAR APLICADA AO CONTROLE MUSCULAR ISOMÉTRICO	42
4.1	PROJETO PILOTO	42
4.1.1	Escolha do Voluntário	42
4.1.1.1	<i>Crítérios de inclusão</i>	42
4.1.1.2	<i>Crítérios de exclusão</i>	43
4.1.1.3	<i>Participantes Selecionados</i>	43
4.1.2	Parâmetros da estimulação elétrica	43
4.1.3	Sensores	44
4.1.4	Aquisição de dados para sensores EEG e MMG	45
4.1.4.1	<i>Pré-processamento de sinais EEG e MMG</i>	45
4.1.4.2	<i>Protocolo de Fadiga</i>	46
4.1.4.3	<i>Controle de força em malha fechada</i>	47
4.1.4.4	<i>Identificação e sintonia dos controladores</i>	47
4.1.4.5	<i>Obtenção dos ganhos do controlador</i>	47
4.1.5	Procedimento de treinamento para sinais de EEG	49
4.1.5.1	<i>Fase de calibração do sistema</i>	50
4.1.5.2	<i>Extração de características e Classificação de padrões</i>	50
4.1.5.3	<i>Fase de feedback</i>	51
4.2	RESULTADOS	52
4.2.1	Ensaio 1	53
4.2.1.1	<i>Teste 1</i>	53
4.2.1.2	<i>Teste 2</i>	54
4.2.2	Ensaio 2	55
4.2.2.1	<i>Teste 1</i>	55
4.2.2.2	<i>Teste 2</i>	55
4.3	COMPARAÇÃO COM TRABALHOS CORRELATOS	56
4.3.1	EEG acionando a FES	57

4.3.2	Reconhecimento da fadiga muscular	57
4.4	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	58
4.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	59
5	CONCLUSÕES GERAIS	60
5.1	CONCLUSÕES	60
5.1.1	Capítulo 2	60
5.1.2	Capítulo 3	60
5.1.3	Capítulo 4	61
5.2	CONTRIBUIÇÕES DA TESE	61
5.2.1	Trabalhos Futuros	62
5.3	PRODUÇÕES CIENTÍFICAS RELACIONADAS COM A TESE	62
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICE A - ESTIMULADOR ELÉTRICO	71

1 INTRODUÇÃO

A estimulação elétrica funcional (FES) é uma técnica de neuromodulação não invasiva que tem sido amplamente utilizada no tratamento de deficiências do motoneurônio superior (OSUAGWU *et al.*, 2016). Pessoas com lesão medular (LM) podem ter seus músculos ativados por meio da FES. Essas contrações artificiais contribuem para o trofismo neuromuscular, vasomotor, intestinal, bexiga e funções sexuais (HAMID; HAYEK, 2008). Além disso, melhora a qualidade de vida dos pacientes com LM por meio da independência funcional, promovendo autoestima e inclusão social (AHUJA *et al.*, 2017).

Comumente, a FES é aplicada por meio de dispositivos comerciais, o que permite a configuração de (i) intensidade, (ii) frequência, (iii) períodos (aumento, ativação, queda e desativação), entre outros. No entanto, os dispositivos comerciais normalmente são acionados manualmente. Nos últimos anos, tem aumentado o interesse da comunidade científica em desenvolver pesquisas que proponham a implementação de gatilhos remotos para FES, como a eletromiografia (EMG) (CHUANG *et al.*, 2017) e o gatilho de eletroencefalografia (EEG) (CHOI *et al.*, 2020). Fornecer ao usuário o comando de seus movimentos por meio de FES melhora a condição neuromuscular na LM (OSUAGWU *et al.*, 2016).

A interface EMG-FES pode ser indicada para distúrbios neurológicos que apresentam contração muscular residual no membro afetado. Por outro lado, a interface EEG-FES é indicada para pessoas com LM (sem contração voluntária) (SAMUEL *et al.*, 2019). Uma estratégia eficiente para a interface cérebro-computador (BCI) é através da dessincronização/sincronização relacionada a eventos (ERD/ERS) a partir de sinais de EEG. Estes são ritmos oscilatórios sensório-motores associados a imagética motora (processo mental pelo qual o indivíduo executa uma ação motora) (CHAUDHARY; BIRBAUMER; RAMOS-MURGUIALDAY, 2016). Essas imagéticas motoras ativam regiões sensório-motoras semelhantes para realizar um movimento real (TEO; CHEW, 2014). Nesse sentido, a prática repetida de imagética motora pode induzir à neuroplasticidade (REMSIK *et al.*, 2016). Assim, para obter a recuperação motora, a interface EEG-FES é melhor do que a FES acionada manualmente (OSUAGWU *et al.*, 2016).

Entretanto, ressalta-se que devido a variações fisiológicas como a fadiga muscular e a adaptação do motoneurônio, o uso da FES (o que também inclui os sistemas EEG-FES) pode ser limitado devido ao decaimento da força muscular em função de sua aplicação constante ou de saturação da ação de controle em aplicações de malha fechada (KRUEGER; POPOVIĆ-MANESKI; NOHAMA, 2018).

A técnica de mecanomiografia (MMG) mede as oscilações mecânicas de contração dos

músculos e não é diretamente afetada pela aplicação da FES (FALLER *et al.*, 2009). O MMG tem sido investigado devido ao seu potencial para monitorar a resposta muscular evocada pela FES e fornecer informações sobre o estado de fadiga muscular, que pode ser usado para compor e detectar a fadiga muscular em aplicações de malha fechada (KRUEGER; POPOVIĆ-MANESKI; NOHAMA, 2018).

Em geral, técnicas como EEG, FES, MMG e registros de força são amplamente investigadas. No entanto, a combinação dessas ferramentas e a implementação do controle em malha fechada são necessárias para melhorar as sessões de neuro reabilitação ou o emprego de neuropróteses. Para resolver esta lacuna, esta tese contribui com os avanços em interfaces EEG-FES, controlando a força isométrica em malha fechada e inserindo uma detecção de fadiga ¹ em tempo real e algoritmo de desligamento do músculo quadríceps do voluntário com paraplegia.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de neuroprótese, com acionamento por eletroencefalografia, controle em malha fechada de força e detecção de fadiga por mecanomiografia para pessoas com lesão medular.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Investigar o estado da arte, envolvendo BCI aliado a FES, para reabilitação de membros inferiores;
- Detectar, por meio de EEG, a imagética motora de membros inferiores em pessoas com lesão medular;
- Investigar qual é o número mínimo de canais de EEG que podem ser aplicados a captação da imagética motora do membro estudado;
- Realizar um estudo comparativo entre as principais técnicas de classificação padrões indicadas na revisão da literatura;
- Desenvolver o controle de força isométrica no músculo quadríceps de pessoas com lesão medular integrado ao estimulador elétrico;
- Ajustar um sistema de MMG para monitorar indiretamente a instalação da fadiga muscular;

¹O presente estudo utilizará o termo fadiga neuromuscular para referir o evento de redução da produção de força com o uso da FES (PIERCE, 2013)

- Integrar, por meio de um arranjo experimental em laboratório, o sistema de classificação de imagética motora com o controle de força isométrica e reconhecimento de fadiga por mecanomiografia.
- Validar a integração proposta no item acima por meio de ensaios experimentais em laboratório.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: O Capítulo 2 estabelece o estado da arte sobre as aplicações de sistemas BCI, aliados a FES, na reabilitação motora de membros inferiores. São apresentados os princípios básicos para a entendimento da área de interfaces cérebro máquina, FES e Fadiga Neuromuscular, bem como discute e expõe técnicas já investigadas na literatura.

O Capítulo 3 apresenta um estudo sobre a classificação de imagética motora com sinais de EEG sob indução de FES. É abordada a metodologia de treinamento utilizada com os voluntários, bem como apresentado os resultados experimentais realizados com 5 indivíduos (3 hígidos e 2 com paraplegia). Ao final do capítulo é apresentado um comparativo com trabalhos correlatos.

No Capítulo 4 é realizada a implementação de um projeto piloto do controle neuromuscular isométrico com detecção de fadiga e acionamento via EEG. São apresentados os aparatos desenvolvidos, bem como a metodologia utilizada para a realização da pesquisa. Os resultados dos testes realizados com um voluntário com paraplegia é apresentado ao final do capítulo.

Por fim, no Capítulo 5 estão as considerações gerais da pesquisa. São apresentadas as conclusões do trabalho, principais contribuições, perspectivas de pesquisas futuras e publicações realizadas durante este trabalho.

5 CONCLUSÕES GERAIS

Neste capítulo, apresentam-se as principais conclusões extraídas a partir da aplicação do protocolo experimental e seus resultados, enumerando-se também sugestões que visam à continuidade e o aprofundamento da pesquisa, além de suas possíveis aplicações clínicas em reabilitação.

5.1 CONCLUSÕES

A integração das técnicas de eletroencefalografia, mecanomiografia e estimulação elétrica permitem o acionamento, controle de força em malha fechada e monitoramento em tempo real da fadiga do músculo quadríceps em pessoas com lesão medular. A união das referidas técnicas se mostra promissora e configura-se como elemento chave para melhorar as sessões de neuro reabilitação e colaborar para o desenvolvimento de neuropróteses. A seguir são elencadas as principais evidências exploradas em cada capítulo desta tese.

5.1.1 Capítulo 2

Por meio de levantamento bibliográfico evidenciou-se que as principais técnicas de extração de características e classificação de padrões de EEG são o CSP, MLP, LDA e SVM e que não possui na literatura trabalhos que revelam o número mínimo de canais de EEG que podem ser utilizados em sistemas BCI-FES.

Outro ponto identificado foi a inexistência de trabalhos de BCI-FES-MMG para membros inferiores, que utilizam controle em malha fechada de força e monitoramento sensoreado de fadiga neuromuscular para proporcionar movimentos suaves, controlados e com baixo risco de lesão aos indivíduos participantes.

5.1.2 Capítulo 3

Por meio de um estudo de caso foi investigada a influência da redução do número de canais de EEG (11 para 1 em estudo comparativo de N=5) na classificação da imagética motora de membros inferiores em indivíduos saudáveis e com paraplegia. Assim, foi evidenciado que pode-se utilizar um número reduzido de eletrodos (4), aliado aos algoritmos CSP+LDA sem comprometer a acurácia de classificação.

5.1.3 Capítulo 4

Através de um estudo piloto foi preenchida a principal lacuna identificada no capítulo 2 desta tese. Foi implementado um sistema BCI-FES com o número de canais reduzido (4 canais), controle isométrico de força (eletricamente evocada) em malha fechada e monitoramento em tempo real da fadiga por meio da técnica de MMG.

5.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A principal contribuição dessa tese foi o desenvolvimento de uma metodologia eficaz para a reabilitação de pessoas com lesão medular completa. Combinando as técnicas BCI + FES + MMG foi possível permitir que o participante atuasse sobre sua própria sessão, com movimento isométrico controlado e detecção de músculo cansado, ou seja, assim que é detectado o limiar de fadiga mínimo (30%) o sistema é desligado, evitando possíveis lesões durante os exercícios.

Em relação ao número de canais de EEG utilizados, quando comparado aos trabalhos de Malik, Iqbal e Tiwana (2016), Selfslagh *et al.* (2019), Gant *et al.* (2018), Bhattacharyya, Clerc e Hayashibe (2016), a presente pesquisa utilizou um número reduzido, determinado por meio de um estudo estatístico (capítulo 3) que elegeu a combinação de 4 canais de EEG + CSP + LDA como adequado para a BCI utilizada nesta tese. Tal configuração atingiu resultados maiores que 72% nos 4 ensaios, *online*, realizados no estudo piloto apresentado no capítulo 4. Além do desempenho satisfatório, a referida combinação apresenta redução no tempo de instalação do sistema proposto devido a simplicidade das arquiteturas envolvidas.

A metodologia de treinamento na fase de calibração do EEG, também apresenta um diferencial entre os trabalhos correlatos a esta pesquisa. A utilização de um instrutor diminui a carga de treinamento do voluntário, que analisa os indicativos mostrados pelo *software*. Assim, o risco do indivíduo participante se confundir na tentativa de adivinhar indicações de imagens motoras futuras (ALONSO-VALERDI; SALIDO-RUIZ; RAMIREZ-MENDOZA, 2015) é baixo.

A metodologia de integração dos sistemas (EEG, FES e MMG) foi realizada entre softwares de acesso gratuito, Microsoft Visual Studio e o software *OpenVibe*, por meio deles foi validada uma interface de Rede Periférica de Realidade Virtual (VRPN) proposta por (SILVA *et al.*, 2019), que recebe o sinal dos classificadores de padrões (EEG), desliga o EEG, liga a FES, após 3 s começa a monitorar o nível de fadiga e desliga o sistema quando o limiar de fadiga é menor que 30%.

5.2.1 Trabalhos Futuros

A combinação das técnicas BCI, FES e MMG apresenta avanços na difusão de técnicas de reabilitação que oferecem maior autonomia no controle dos exercícios por parte dos usuários. Neste sentido a continuidade de trabalhos na mesma linha é necessária aplicação da técnica com número elevado de voluntário, Dentre os estudos futuros, sugere-se:

- Estudo de técnicas de processamento digital de sinais para extração de características dos sinais de EEG contaminados com FES, permitindo o desligamento da estimulação elétrica por meio do EEG;
- Ampliar o sistema desenvolvido para aplicação de FES com controle de força em malha fechada acionada por EEG para as duas pernas do voluntário;
- Além do controle de força acionado pelo EEG, implementar também, o controle angular das articulações do quadril, joelho e tornozelo;
- Desenvolver uma interface amigável utilizando apenas um software, EX: *Python* ao invés da integração entre o Microsoft Visual Studio e o software *OpenVibe*;
- Aplicar a técnica desenvolvida para um número maior de voluntários;
- Desenvolver um método para calcular o custo computacional da aplicação mostrada nesta tese.

5.3 PRODUÇÕES CIENTÍFICAS RELACIONADAS COM A TESE

As seguintes contribuições são propostas para periódicos:

1) BRONIERA P, J.;CAMPOS D, P.; LAZZARETTI A, E.; NOHAMA P.; CARVALHO A, A.; KRUEGER E.; TEIXEIRA M, C, M. Influence of EEG channels reduction on lower limb motor imagery during electrical stimulation in healthy and paraplegic subjects.

2) BRONIERA P, J.;CAMPOS D, P.; LAZZARETTI A, E.; NOHAMA P.; CARVALHO A, A.; KRUEGER E.; TEIXEIRA M, C, M. EEG-FES-Force-MMG closed-loop control systems of a paraplegic volunteer considering motor imagery with fatigue recognition and automatic shut-off.

3) NUNES, W. R. B. M.; KRUEGER, E.; BRONIERA JR, P.; SANCHES, M. A. A.; TEIXEIRA, M. C. M.; CARVALHO, A. A. EEG-Based Brain-Controlled Functional Electrical Stimulation for Lower Limbs Rehabilitation: Advances and Perspectives.

As seguintes contribuições foram aceitas em Congressos:

4) BRONIERA JUNIOR, P.; NUNES, W. R. B. M.; LAZZARETTI, A. E.; NOHAMA, P.; CARVALHO, A. A.; KRUEGER, E.; TEIXEIRA, M. C. M. Classifier for motor imagery during parametric functional electrical stimulation frequencies on the quadriceps muscle. In: INTERNATIONAL IEEE/EMBS CONFERENCE ON NEURAL ENGINEERING (NER), 9th., 2019, San Francisco. **Proceedings** [...] San Francisco: IEEE EMBS, 2019. pp. 526-529.

5) MARTINS, G. ; BRONIERA JUNIOR, P. ; LAZZARETTI, A. E. ; NOHAMA, P. ; KRUEGER, E. Avanços na Interface Cérebro Máquina controlando FES em Membro Superior de Pacientes com Sequelas pós AVE. In: II Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Tecnologia Assistiva- CBTA, 2018, Bauru. **Anais** [...] BAURU: UNESP, 2018. p. 45-49.

6) BRONIERA JR, P.; NUNES, W. R. B. M.; KRUEGER, E.; GAINO, R.; COVACIC, M. R.; CARVALHO, A. A.; TEIXEIRA, M. C. M. Análise Comparativa da Classificação de Sinais de Eletroencefalografia no Domínio do Tempo Utilizando Redes PMC e RBF. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMIOGRAFIA E CINESIOLOGIA-COBEC E SIMPÓSIO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA-SEB, 2017, Uberlândia. **Anais** [...] Uberlândia: SBEB, 2017.

7) BRONIERA JR, P.; NUNES, W. R. B. M.; KRUEGER, E.; GAINO, R.; COVACIC, M. R.; CARVALHO, A. A.; TEIXEIRA, M. C. M. Estudo Comparativo entre Redes Perceptron Multicamadas (PMC) e Redes de Funções de Base Radial (RBF) para a Classificação de Sinais Eletroencefalográficos no Domínio do Tempo. In: SIMPÓSIO DE NEUROENGENHARIA, IV, 2017, Macaíba. **Anais** [...] CEPS Anita Garibaldi: ISD, 2017.

8) NUNES, W. R. B. M.; GAINO, R.; COVACIC, M.R.; BRONIERA JR, P.; TEIXEIRA, M. C. M.; CARVALHO, A. A. Predição via Redes Neurais Artificiais da Curva de Recrutamento Muscular com Estimulação Elétrica Funcional dos Membros Inferiores. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES-DINCON, 2017, São José do Rio Preto. **Anais** [...] São José do Rio Preto: SBMAC, 2017.

9) NUNES, W. R. B. M.; BRONIERA JR, P.; KRUEGER, E.; CARVALHO, A. A. Common Spatial Pattern apresenta 18 % a mais de acurácia que o Laplaciano em Imagética Motora de membros superiores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMIOGRAFIA E CINESIOLOGIA-COBEC E SIMPÓSIO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA-SEB, 2017, Uberlândia. **Anais** [...] Uberlândia: SBEB, 2017.

REFERÊNCIAS

- ADAMA, S. V.; BOGDAN, M. Stroke rehabilitation and parkinson's disease tremor reduction using bcis combined with fes. *International Journal of Privacy and Health Information Management (IJPHIM)*, Hershey, v. 6, n. 1, p. 20 – 36, 2018.
- AGUIRRE, A. L.; BAZANELLA, A.; REGINATTO, R. *Enciclopédia de automação volume II: controle e automação*. São Paulo: Editora Blucher, 2007.
- AHUJA, C. S. *et al.* Spinal cord injury—what are the controversies? *Journal of orthopaedic trauma*, Florida, v. 31, p. S7 – S13, 2017.
- AKSÖZ, E. A. *et al.* Design of an isokinetic knee dynamometer for evaluation of functional electrical stimulation strategies. *Medical Engineering & Physics*, York, v. 73, p. 100 – 106, 2019.
- ALONSO-VALERDI, L. M.; SALIDO-RUIZ, R. A.; RAMIREZ-MENDOZA, R. A. Motor imagery based brain–computer interfaces: An emerging technology to rehabilitate motor deficits. *Neuropsychologia*, Georgia, v. 79, p. 354 – 363, 2015.
- ANG, K. K. *et al.* Filter bank common spatial pattern algorithm on bci competition iv datasets 2a and 2b. *Frontiers in neuroscience*, Washington, v. 6, p. 39 – 52, 2012.
- BHADURI, S. *et al.* Classification of lower limb motor imagery using k nearest neighbor and naïve-bayesian classifier. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN INFORMATION TECHNOLOGY (RAIT). 3th., 2016, Jharkhand. **Proceedings [...]** Dhanbad: IEEE, 2016. p. 499 – 504.
- BHATTACHARYYA, S.; CLERC, M.; HAYASHIBE, M. A study on the effect of electrical stimulation as a user stimuli for motor imagery classification in brain-machine interface. *European journal of translational myology*, Padoa, v. 26, n. 2, p. 11 – 27, 2016.
- BLANKERTZ, B. *et al.* Optimizing spatial filters for robust eeg single-trial analysis. *IEEE Signal processing magazine*, Manhattan, v. 25, n. 1, p. 41 – 56, 2008.
- BROCCARD, F. D. *et al.* Closed-loop brain–machine–body interfaces for noninvasive rehabilitation of movement disorders. *Annals of biomedical engineering*, Berlim, v. 42, n. 8, p. 1573 – 1593, 2014.
- CHAUDHARY, U.; BIRBAUMER, N.; RAMOS-MURGUIALDAY, A. Brain–computer interfaces for communication and rehabilitation. *Nature Reviews Neurology*, Berlim, v. 12, n. 9, p. 513 – 534, 2016.
- CHERKASSKY, V. S.; MULIER, F. *Learning from Data: Concepts, Theory, and Methods*. New York: John Wiley & Sons, 1998.

- CHOI, I. *et al.* Functional electrical stimulation controlled by motor imagery brain-computer interface for rehabilitation. **Brain Sciences**, Beijing, v. 10, n. 8, p. 507 – 539, 2020.
- CHUANG, L.-L. *et al.* Effect of emg-triggered neuromuscular electrical stimulation with bilateral arm training on hemiplegic shoulder pain and arm function after stroke: a randomized controlled trial. **Journal of neuroengineering and rehabilitation**, Berlim, v. 14, n. 1, p. 122 – 137, 2017.
- COELHO, A. A. R.; COELHO, L. d. S. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2015.
- COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 2. ed. Abingdon: Routledge, 2013.
- COTHRAN, T. P.; LARSON, J. E. Brain-computer interface technology for schizophrenia. **Journal of Dual Diagnosis**, Abingdon, v. 8, n. 4, p. 337 – 340, 2012.
- DO, A. H. *et al.* Brain-computer interface controlled functional electrical stimulation system for ankle movement. **Journal of neuroengineering and rehabilitation**, Berlim, v. 8, n. 1, p. 49 – 64, 2011.
- DO, A. H. *et al.* Brain-computer interface controlled functional electrical stimulation device for foot drop due to stroke. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY. 3th., 2012, Califórnia. **Proceedings** [...] Califórnia: IEEE, 2012. p. 6414 – 6420.
- DOWNEY, R. J. *et al.* Switched tracking control of the lower limb during asynchronous neuromuscular electrical stimulation: Theory and experiments. **IEEE Transactions on Cybernetics**, v. 47, n. 5, p. 1251 – 1262, 2017.
- FALLER, L. *et al.* Muscle fatigue assessment by mechanomyography during application of NMES protocol. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, São Paulo, v. 13, n. 5, p. 422 – 429, 2009.
- FARIA, P.; LEAL, A.; MIRANDA, P. C. Comparing different electrode configurations using the 10-10 international system in tdcS: a finite element model analysis. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY. 7th., 2009, Minneapolis. **Proceedings** [...] Minneapolis: IEEE, 2009. p. 1596 – 1599.
- FAWCETT, T. An introduction to roc analysis. **Pattern recognition letters**, Berlim, v. 27, n. 8, p. 861 – 874, 2006.
- FERRARIN, M.; PEDOTTI, A. The relationship between electrical stimulus and joint torque: A dynamic model. **IEEE transactions on rehabilitation engineering**, Manhattan, v. 8, n. 3, p. 342 – 352, 2000.
- FIUSA, J. M. *et al.* The muscle-machine interface after stroke in improvement of hand extension: Case report. In: LATIN AMERICAN WORKSHOP ON COMPUTATIONAL NEUROSCIENCE. 3th., 2019, São João Del Rey. **Anais** [...] São João Del Rey: Springer, 2019. p. 249 – 257.

- FLEMING, M. K. *et al.* Transcranial direct current stimulation for promoting motor function in cerebral palsy: a review. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, Califórnia, v. 15, n. 1, p. 1 – 8, 2018.
- GANT, K. *et al.* Eeg-controlled functional electrical stimulation for hand opening and closing in chronic complete cervical spinal cord injury. *Biomedical Physics & Engineering Express*, Bristol, v. 4, n. 6, p. 65 – 91, 2018.
- GOLDENHOLZ, D. M. *et al.* Mapping the signal-to-noise-ratios of cortical sources in magnetoencephalography and electroencephalography. *Human brain mapping*, Nova Jersey, v. 30, n. 4, p. 1077 – 1086, 2009.
- GORDLEEVA, S. Y. *et al.* Exoskeleton control system based on motor-imaginary brain–computer interface. *Modern technologies in medicine*, Pozharsky, v. 9, n. 3, p. 32 – 57, 2017.
- GREEN, J. B. *et al.* High-resolution eeg in poststroke hemiparesis can identify ipsilateral generators during motor tasks. *Stroke*, Dallas, v. 30, n. 12, p. 2659 – 2665, 1999.
- GWIN, J. T.; FERRIS, D. P. An eeg-based study of discrete isometric and isotonic human lower limb muscle contractions. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, Londres, v. 9, n. 1, p. 1 – 11, 2012.
- HAMID, S.; HAYEK, R. Role of electrical stimulation for rehabilitation and regeneration after spinal cord injury: an overview. *European Spine Journal*, Berlim, v. 17, n. 9, p. 1256 – 1269, 2008.
- HU, S. *et al.* The statistics of eeg unipolar references: derivations and properties. *Brain topography*, Berlim, v. 32, n. 4, p. 696 – 703, 2019.
- IRIMIA, D. C.; POBORONIUC, M. S.; ORTNER, R. Improved method to perform fes&bci based rehabilitation. In: E-HEALTH AND BIOENGINEERING CONFERENCE (EHB). 16th., 2013, Las Vegas. **Proceedings** [...] Las Vegas: IEEE, 2013. p. 601 – 606.
- JANG, Y. Y.; KIM, T. H.; LEE, B. H. Effects of brain–computer interface-controlled functional electrical stimulation training on shoulder subluxation for patients with stroke: a randomized controlled trial. *Occupational therapy international*, Nova Jersey, v. 23, n. 2, p. 175 – 185, 2016.
- KANAGA, E. G. M. *et al.* A comparative analysis of classification algorithms on different stimuli for eeg based bci applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRENDS IN ELECTRONICS AND INFORMATICS (ICOEI). 3th., 2019, Tirunelveli. **Proceedings** [...] Tirunelveli: IEEE, 2019. p. 601 – 606.
- KHOSLA, A.; KHANDNOR, P.; CHAND, T. A comparative analysis of signal processing and classification methods for different applications based on eeg signals. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, Manhattan, v. 40, n. 2, p. 649 – 690, 2020.
- KIM, T.; KIM, S.; LEE, B. Effects of action observational training plus brain–computer interface-based functional electrical stimulation on paretic arm motor recovery in patient with stroke: a randomized controlled trial. *Occupational therapy international*, Nova Jersey, v. 23,

n. 1, p. 39 – 47, 2016.

KING, C. E. *et al.* Brain-computer interface driven functional electrical stimulation system for overground walking in spinal cord injury participant. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY. 36th., 2014, Chicago. **Proceedings** [...] Chicago: IEEE, 2014. p. 1238 – 1242.

KING, C. E. *et al.* The feasibility of a brain-computer interface functional electrical stimulation system for the restoration of overground walking after paraplegia. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, Londres, v. 12, n. 1, p. 1 – 11, 2015.

KLEIH, S. C.; KÜBLER, A. Psychological factors influencing brain-computer interface (bci) performance. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS. 9th., 2015, Hong Kong. **Proceedings** [...] Hong Kong: IEEE, 2015. p. 3192 – 3196.

KRUEGER, E. *et al.* Neuromuscular fatigue detection by mechanomyography in people with complete spinal cord injury. *Research on Biomedical Engineering*, Berlim, v. 36, p. 203 – 212, 2020.

KRUEGER, E.; POPOVIĆ-MANESKI, L.; NOHAMA, P. Mechanomyography-based wearable monitor of quasi-isometric muscle fatigue for motor neural prostheses. *Artificial organs*, Nova Jersey, v. 42, n. 2, p. 208 – 218, 2018.

KRUEGER, E. *et al.* Mechanomyography energy decreases during muscular fatigue in paraplegics. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY. 36th., 2014, Chicago. **Proceedings** [...] Chicago: IEEE, 2014. p. 5824 – 5827.

LI, K.; ZHANG, X.; DU, Y. A svm based classification of eeg for predicting the movement intent of human body. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UBIQUITOUS ROBOTS AND AMBIENT INTELLIGENCE (URAI). 10th., 2013, Jeju. **Proceedings** [...] Jeju: IEEE, 2013. p. 402–406.

LIKITLERSUANG, J. *et al.* Eeg-controlled functional electrical stimulation therapy with automated grasp selection: A proof-of-concept study. *Topics in spinal cord injury rehabilitation*, St. Louis, v. 24, n. 3, p. 265 – 274, 2018.

LUPU, R. G.; UNGUREANU, F.; CIMPANU, C. Brain-computer interface: Challenges and research perspectives. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL SYSTEMS AND COMPUTER SCIENCE (CSCS). 22th., 2019, Bucharest. **Proceedings** [...] Bucharest: IEEE, 2019. p. 387 – 394.

MACHADO, S. *et al.* Eeg-based brain-computer interfaces: an overview of basic concepts and clinical applications in neurorehabilitation. *Reviews in the Neurosciences*, Berlim, v. 21, n. 6, p. 451 – 468, 2010.

MALIK, A. N.; IQBAL, J.; TIWANA, M. I. Eeg signals classification and determination of optimal feature-classifier combination for predicting the movement intent of lower limb. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE (ICRAI). 2th., 2016, Islamabad. **Proceedings** [...] Islamabad: IEEE, 2016. p. 45 – 49.

MARQUEZ-CHIN, C.; MARQUIS, A.; POPOVIC, M. R. Eeg-triggered functional electrical stimulation therapy for restoring upper limb function in chronic stroke with severe hemiplegia. *Case reports in neurological medicine*, Londres, v. 1, p. 342 – 371, 2016.

MCCRIMMON, C. M. *et al.* Brain-controlled functional electrical stimulation for lower-limb motor recovery in stroke survivors. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY. 36th., 2014, Chicago. **Proceedings** [...] Chicago: IEEE, 2014. p. 1247 – 1250.

MCCRIMMON, C. M. *et al.* Brain-controlled functional electrical stimulation therapy for gait rehabilitation after stroke: a safety study. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, Londres, v. 12, n. 1, p. 1 – 12, 2015.

MCDANIEL, J. *et al.* Setting the pace: insights and advancements gained while preparing for an fes bike race. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, Berlim, v. 14, n. 1, p. 118 – 132, 2017.

MONASTRA, V. J. Electroencephalographic biofeedback (neurotherapy) as a treatment for attention deficit hyperactivity disorder: rationale and empirical foundation. *Child and Adolescent Psychiatric Clinics*, Califórnia, v. 14, n. 1, p. 55 – 82, 2005.

MRACHACZ-KERSTING, N. *et al.* Efficient neuroplasticity induction in chronic stroke patients by an associative brain-computer interface. *Journal of neurophysiology*, Rockville, v. 115, n. 3, p. 1410 – 1421, 2016.

MRACHACZ-KERSTING, N. *et al.* The effect of type of afferent feedback timed with motor imagery on the induction of cortical plasticity. *Brain research*, Berlim, v. 1674, p. 91 – 100, 2017.

NAEEM, J. *et al.* Electrical stimulator with mechanomyography-based real-time monitoring, muscle fatigue detection, and safety shut-off: a pilot study. *Biomedical Engineering/Biomedizinische Technik*, Berlim, v. 65, n. 4, p. 461 – 468, 2020.

NAGAR, P.; SETHIA, D. Brain mapping based stress identification using portable eeg based device. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION SYSTEMS & NETWORKS (COMSNETS). 11th., 2019, Bangalore. **Proceedings** [...] Bangalore: IEEE, 2019. p. 601–606.

NANDY, A. *et al.* Feature extraction and classification of eeg signals for seizure detection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS, ELECTRICAL AND SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES (ICREST). 1th., 2019, Dhaka. **Proceedings** [...] Dhaka: IEEE, 2019. p. 480 – 485.

NASEER, N.; HONG, K.-S. fnirs-based brain-computer interfaces: a review. *Frontiers in human neuroscience*, Lausanne, v. 9, p. 3 – 17, 2015.

NEHMZOW, U. *Scientific Methods in Mobile Robotics: quantitative analysis of agent behaviour*. 3. ed. Berlim: Springer Science & Business Media, 2006.

NOGUEIRA-NETO, G. *et al.* The influence of window length analysis on the time and frequency domain of mechanomyographic and electromyographic signals of submaximal

fatiguing contractions. *Open Journal of Biophysics*, Wuhan, v. 3, n. 03, p. 178 – 196, 2013.

OSUAGWU, B. C. *et al.* Rehabilitation of hand in subacute tetraplegic patients based on brain computer interface and functional electrical stimulation: a randomised pilot study. *Journal of neural engineering*, Bristol, v. 13, n. 6, p. 145 – 167, 2016.

PARASTARFEIZABADI, M.; KOUZANI, A. Z. Advances in closed-loop deep brain stimulation devices. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, Londres, v. 14, n. 1, p. 1 – 20, 2017.

PIERCE, P. A. *Fatigue: neural and muscular mechanisms*. 2. ed. Berlim: Springer Science & Business Media, 2013.

QIU, S. *et al.* Event-related beta eeg changes during active, passive movement and functional electrical stimulation of the lower limb. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Manhattan, v. 24, n. 2, p. 283 – 290, 2015.

REMSIK, A. *et al.* A review of the progression and future implications of brain-computer interface therapies for restoration of distal upper extremity motor function after stroke. *Expert review of medical devices*, Londres, v. 13, n. 5, p. 445 – 454, 2016.

RUIZ, S.; BIRBAUMER, N.; SITARAM, R. Abnormal neural connectivity in schizophrenia and fmri-brain-computer interface as a potential therapeutic approach. *Frontiers in psychiatry*, Lausanne, v. 4, p. 17 – 34, 2013.

SAMUEL, O. W. *et al.* Intelligent emg pattern recognition control method for upper-limb multifunctional prostheses: advances, current challenges, and future prospects. *IEEE Access*, Manhattan, v. 7, p. 10150 – 10165, 2019.

SANCHES, M. A. A. **Sistema eletrônico para geração e avaliação de movimentos em paraplégicos**. 2013. 184f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

SANCHEZ, J. C.; PRINCIPE, J. C. Brain–Machine Interface Engineering. *Synthesis Lectures on Biomedical Engineering*, v. 2, n. 1, p. 221 – 234, 2007.

SELFSLAGH, A. *et al.* Non-invasive, Brain-controlled Functional Electrical Stimulation for Locomotion Rehabilitation in Individuals with Paraplegia. *Scientific Reports*, Berlim, v. 9, n. 1, p. 1 – 17, 2019.

SILVA, C. R. *et al.* Interfacing brains to robotic devices a vrpn communication application. In: BRAZILIAN CONGRESS ON BIOMEDICAL ENGINEERING. 16th., 2019, Rio de Janeiro. *Anais [...]* Rio de Janeiro: IEEE, 2019. p. 597 – 603.

SON, J.; KU, J. Development of brain computer interface based action observation program with functional electrical stimulation device (fes). In: INTERNATIONAL WINTER CONFERENCE ON BRAIN-COMPUTER INTERFACE (BCI). 7th., 2019, Seul. *Proceedings [...]* Seul: IEEE, 2019. p. 1–6.

SPAMPINATO, C. *et al.* Deep learning human mind for automated visual classification. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN

RECOGNITION. 2th., 2017, Honolulu. **Proceedings** [...] Honolulu: IEEE, 2017. p. 6809 – 6817.

TAKAHASHI, M.; GOUKO, M.; ITO, K. Fundamental research about electroencephalogram (eeg)-functional electrical stimulation (fes) rehabilitation system. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON REHABILITATION ROBOTICS. 11th., 2009, Kyoto. **Proceedings** [...] Kyoto: IEEE, 2009. p. 316 – 321.

TAKAHASHI, M. *et al.* Event related desynchronization-modulated functional electrical stimulation system for stroke rehabilitation: a feasibility study. **Journal of neuroengineering and rehabilitation**, Berlim, v. 9, n. 1, p. 1–6, 2012.

TEO, W.-P.; CHEW, E. Is motor-imagery brain-computer interface feasible in stroke rehabilitation? **PM&R**, Manhattan, v. 6, n. 8, p. 723 – 728, 2014.

TEODORO, R. G. *et al.* Robust switched control design for electrically stimulated lower limbs: A linear model analysis in healthy and spinal cord injured subjects. **Control Engineering Practice**, Manhattan, v. 102, p. 104 – 530, 2020.

TORRES, W. L. *et al.* Mathematical modeling and pid controller parameter tuning in a didactic thermal plant. **IEEE Latin America Transactions**, Chicago, v. 15, n. 7, p. 1250 – 1256, 2017.

VAPNIK, V. N. **Statistical Learning Theory**. 2. ed. Londres: Wiley-Interscience, 1998.

VIDAURRE, C. *et al.* Eeg-based bci for the linear control of an upper-limb neuroprosthesis. **Medical engineering & physics**, Chicago, v. 38, n. 11, p. 1195 – 1204, 2016.

WADA, K. *et al.* Development of a brain-machine interface for stroke rehabilitation using event-related desynchronization and proprioceptive feedback. **Advanced Biomedical Engineering**, Tokyo, v. 8, p. 53 – 59, 2019.

YAO, L.; ZHANG, D. G.; WANG, Y. Study on brain-computer interface controlled functional electrical stimulation system for lower limbs. **Chinese Journal of Biomedical Engineering**, Londres, v. 5, n. 2, p. 1–17, 2012.

YUSOFF, M. Z. A. M. *et al.* Mental task motor imagery classifications for noninvasive brain computer interface. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT AND ADVANCED SYSTEMS (ICIAS). 5th., 2014, Kuala Lumpur. **Proceedings** [...] Kuala Lumpur: IEEE, 2014. p. 1 – 5.

ZHANG, W. *et al.* Asynchronous brain-computer interface shared control of robotic grasping. **Tsinghua Science and Technology**, Berlim, v. 24, n. 3, p. 360 – 370, 2019.

APÊNDICE A - ESTIMULADOR ELÉTRICO

O estimulador elétrico desenvolvido possui as seguintes características:

- 1 canal;
- Forma de onda bipolar;
- Frequência de estimulação ajustável de 5 a 60Hz;
- Largura de pulso ajustável de 20 us a 600 us;
- Saída de estimulação elétrica por tensão.

Os circuitos do referido dispositivo foram montados em uma caixa plástica para eletrônica de 200 mm x 300 mm. E os parâmetros do estimulador são ajustados manualmente por meio de uma interface homem máquina (IHM) - Figura 14 - constituída das seguintes funcionalidades:

- Display de LCD 2x16 para visualização dos parâmetros;
- Potenciômetro para ajuste da frequência;
- Potenciômetro para ajuste largura de pulso;
- Potenciômetro para ajuste de *setpoint*;
- Botão para seccionamento do circuito de potência;
- Botão de seleção para leitura de parâmetros ¹;
- Botão de seleção para funcionalidade de controle em malha aberta ou malha fechada ².

Além da IHM, o estimulador também possui conexão com os eletrodos via borne banana, entrada para botão de emergência (SANCHES, 2013) e conexão com a célula de carga via conector MIC.

¹ Este botão permite realizar a seleção do tipo de variável que será plotada no display - estão disponíveis Largura de pulso, frequência e *setpoint*

² O estimulador possui duas funções. i) Malha aberta: Neste caso a largura de pulso é ajustada manualmente pelo potenciômetro. ii) Malha fechada: A largura de pulso é incrementada e decrementada de forma automática pelo controlador PI de acordo com o *setpoint* de carga ajustado

Figura 14 - Vista da IHM do estimulador elétrico desenvolvido.

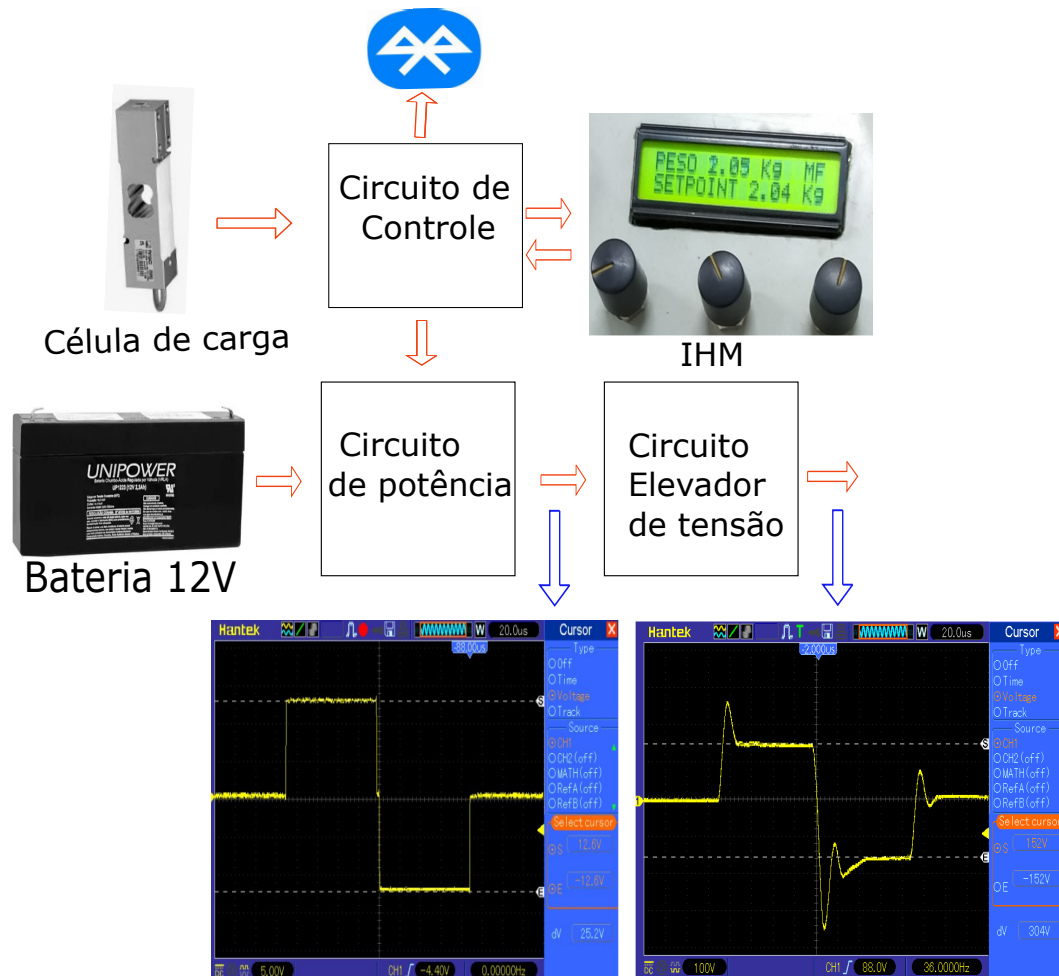


Fonte: Elaborado pelo Autor

Um diagrama em blocos das etapas de funcionamento do estimulador elétrico é apresentado pela Figura 15. Basicamente, o referido dispositivo é constituído quatro circuito, são eles:

- Circuito de potência;
- Circuito de elevador de tensão;
- Circuito de controle;
- Circuito de IHM.

Figura 15 - Diagrama em blocos do estimulador elétrico.



Fonte: Elaborado pelo Autor