

## Uma Revisão dos Estudos de Detecção e Reconhecimento de Sinais Cerebrais para Interação Humano-Computador com Equipamentos de Baixo Custo

### *A Review of Brain-Signal Detection and Recognition Studies for Human-Computer Interaction with Low-cost Devices*

João Bosco Ferreira Alves<sup>1</sup>  
Hugo A. D. do Nascimento<sup>2</sup>  
Murilo Borges Silva<sup>3</sup>

#### Resumo

Equipamentos detectores de atividades elétricas cerebrais de custo relativamente baixo e voltados para a implementação de novas interfaces homem-máquina têm se popularizado nos últimos dez anos. Entre eles, destacam-se alguns dispositivos proprietários como o Eloc da marca Emotiv e o Muse, além de plataformas abertas como o OpenBCI. O presente trabalho faz uma revisão da literatura sobre o emprego desses equipamentos. São apresentados o estado da arte da pesquisa científica envolvendo tais sensores, ferramentas computacionais para coletar e analisar dados advindos de ondas cerebrais e aplicações que utilizam esses dados em sistemas interativos com o usuário. O objetivo do artigo é reunir um corpo de informações e de orientações que facilite o desenvolvimento de novos projetos de arte tecnológica interativa baseados nessa tecnologia.

**Palavras-chave:** eletroencefalograma, interação humano-computador, revisão da literatura.

#### Abstract

*Electrical brain-activity sensors of relatively low cost and aimed at implementing new human-machine interfaces have become popular in the last ten years. Among some solutions in this area, there are the Emotiv Eloc and the Muse proprietary devices, as well as open initiatives such as the OpenBCI. The present paper reviews the literature on the use of such equipments. We present the state of the art of scientific research involving such sensors, computational tools to collect and analyze data from brain waves and applications that use this type of data in interactive systems. The goal of the paper is to gather information and guidelines that can facilitate the development of new interactive technology art projects based on brain-wave detection technology.*

**Keywords:** *electroencephalogram, human-computer interaction, literature review.*

---

<sup>1</sup> João Bosco F. Alves faz o bacharelado em Ciência da Computação no Instituto de Informática da UFG. O autor tem trabalhado com detecção de sinais cerebrais como parte do seu projeto final de curso de graduação.

<sup>2</sup> Hugo A. D. do Nascimento ([hadn@inf.ufg.br](mailto:hadn@inf.ufg.br)) é doutor em Ciência da Computação e professor do Instituto de Informática da UFG, com atuação de pesquisa nas áreas de otimização, visualização de informações e interação humano-computador.

<sup>3</sup> Murilo B. Silva é docente do Instituto Federal de Goiás, Campus Senador Canedo, e aluno de doutorado em Computação do Instituto de Informática da UFG com pesquisa voltada à detecção de padrões mentais e sua aplicação em projetos de arte e tecnologia.

## Introdução

Segundo SABBATINI (1997), o primeiro registro de um Eletroencefalograma foi feito por Hans Berger aproximadamente em 1928. Desde então, a ciência vem estudando os sinais elétricos cerebrais e tentando descobrir como utilizá-los para comandar equipamentos que apoiem ou substituam atividades manuais. Infelizmente, os dispositivos tradicionais de Eletroencefalografia (EEG), desenvolvidos com foco na área de saúde, possuem alto custo de aquisição e de manutenção, o que limita o seu uso em projetos de pesquisa em outras áreas. No entanto, nos últimos dez anos, surgiram dispositivos de EEG de custo relativamente baixo e destinados à implementação de interfaces homem-máquina. Eles podem ser adquiridos em lojas especializadas de informática e, em alguns casos, montados em casa com componentes comprados em lojas de eletrônica, o que abre a possibilidade para um grande leque de novas aplicações. Entre esses dispositivos, se destacam os equipamentos proprietários Epoc e Muse e as plataformas abertas como a OpenBCI<sup>4</sup>.

Com o intuito de auxiliar quem deseja iniciar estudos sobre o uso de EEG em interfaces homem-máquina, o presente artigo traz uma breve revisão desses equipamentos de baixo custo e de alguns dos resultados de pesquisa já produzidos no tema até o momento. Inicialmente, na Seção 2, são apresentados os equipamentos supracitados e algumas aplicações investigadas em projetos de pesquisa envolvendo o seu uso. Na Seção 3, são discutidos os métodos computacionais mais frequentemente empregados em trabalhos científicos para o tratamento e a detecção de padrões de sinais cerebrais usando tais equipamentos. Em seguida, na Seção 4, são listadas ferramentas de software desenvolvidas para apoiar o uso desses dispositivos de EEG. Por fim, concluímos na Seção 5, com uma visão geral sobre as perspectivas futuras nessa área.

## Equipamentos de EEG

Os dispositivos de baixo custo para registrar a atividade elétrica do cérebro geralmente diferem na quantidade, localização e características dos sensores utilizados, bem como no tipo de aplicação final para o qual foram projetados. Em termos de localização, na maioria das vezes, adota-se o sistema internacional 10-20 (SILVA et al., 2016), o qual define 21 posições regularmente espaçadas no couro cabeludo para os sensores. A seguir, comentamos sobre os equipamentos mais populares nessa linha.

## Emotiv EPOC e Insight

Um dos primeiros dispositivos dessa natureza é o EPOC, lançado em 2009 pela empresa Emotiv Systems na Austrália. Uma outra empresa, a Emotiv Inc., criada nos Estados Unidos por um dos fundadores da empresa anterior, produziu em seguida dois novos dispositivos entre 2013 e 2014: o EPOC+ e o Emotiv Insight. O Emotiv EPOC+ (<https://www.emotiv.com/epoc>) possui 16 sensores gerando 14 canais de EEG na largura de banda de 0,16 a 43 Hz, sendo dois sensores de referência, além de acelerômetro e magnetômetro. O dispositivo é compatível com Windows, MAC, iOS e Android e pode ser utilizado totalmente sem fio via bluetooth (cerca de 6 horas de autonomia da bateria, neste caso) ou por meio de um receptor USB proprietário (12 horas de autonomia). Para o seu uso, é necessário embebedar os sensores em uma solução salina disponibilizada junto ao equipamento. Já o Emotiv Insight possui apenas 7 sensores, com 5 canais de EEG e bateria com capacidade de até 8 horas. O preço estimado do EPOC+ é de U\$800 aproximadamente, enquanto que o Insight custa cerca de U\$300.

<sup>4</sup> BCI é a abreviação de Brain-Computer Interface.

Os dispositivos EPOC/EPOC+ têm sido muito utilizados em pesquisas científicas, sendo citados em mais de 900 artigos científicos desde 2009, segundo base bibliográfica da Scopus. A Emotiv Inc. lançou também, mais recentemente, o EPOC Flex. Este é um equipamento voltado exclusivamente para pesquisa. Ele pode ser configurado para oferecer até 32 canais de EEG, com sensores móveis para um melhor posicionamento que devem ser afixados sobre uma espécie de touca (disponível em mais de um tamanho) e a opção de trabalhar com uma solução de contato salinizada ou gel. Um Kit do EPOC Flex custa entre U\$ 1700 a U\$ 2100, dependendo da opção com a solução salina ou gel, respectivamente.

## Muse e Muse 2

O **Muse** (<https://choosemuse.com>) foi lançado pela InteraXon no Canadá em 2014. Ele é atualmente anunciado no site que promove a sua venda como um dispositivo de apoio à meditação e fornece **feedback** em tempo real sobre a atividade cerebral. Há dois modelos do equipamento: o Muse e o Muse 2. O Muse possui 5 sensores e utiliza 4 canais para coletar ondas cerebrais e na versão 2, possui 7 sensores. O primeiro é vendido por U\$ 199 e capta somente ondas cerebrais. Já o segundo modelo, vendido por U\$ 249 e tratado como um dispositivo de meditação multi sensor, a frequência cardíaca, a respiração e os movimentos corporais do usuário para ajudá-lo a construir uma prática de meditação consistente. As informações coletadas pelo Muse podem ser transmitidas em tempo real para um smartphone ou tablet via Bluetooth 4.0 na versão 1 e Bluetooth 5.0 na versão 2. A autonomia da bateria é de até 5 horas e o dispositivo pode ser recarregado por conexão MicroUSB, compatível com Android e IOS.

## OpenBCI

O **OpenBCI** (<https://openbci.com>) é uma plataforma que oferece hardware e software abertos para estudo de EEG. Há diversas configurações e modelos de hardware, sendo possível encontrar placas com 4, 8 e 16 canais, ambas compatíveis com Arduino. Existe a configuração de eletrodos em formato de HeadBand e para capacete. As placas são compatíveis com Mac OS, Windows 7+ e Linux (Ubuntu ou Fedora). A transmissão dos dados da placa até o computador é feita via Bluetooth. A alimentação padrão de alguns dos sistemas é por meio de pilhas AA mas é possível substituí-la. Um kit vendido na loja do OpenBCI pode custar entre U\$ 465 a U\$ 2500, embora haja também a opção de imprimir alguns componentes do capacete em impressora 3D e montar sua própria placa. No site do OpenBCI, além da descrição dos componentes de hardware, podem ser baixados firmwares para as placas, um software gráfico para estudo e processamento dos sinais de EEG e um SDK para desenvolvimento de aplicações de EEG.

## Sumarização

O Quadro 1 relaciona algumas das características dos equipamentos supracitados, de modo a permitir uma melhor análise comparativa.

**Quadro 1:** características dos equipamentos de EEG de baixo custo.

Equipamento	Número de sensores	Sensores (no sistema 10-20)	Taxa de amostragem	Preço
Emotiv EPOC+	14 + 2 canais de referência	AF3, AF4, F3, F4, FC5, FC6, F7, F8, T7, T8, P7, P8, O1 e O2	128 Hz ou 256 Hz	U\$ 799
Emotiv Insight	5 + 2 canais de referência	AF3, AF4, T7, T8 e Pz	128 Hz	U\$ 299
Emotiv EPOC Flex	Até 32 canais	Personalizável	128 Hz	U\$ 1700 a U\$ 2100
Muse	4 canais + 1 canal de referência	TP9, AF7, AF8 e TP10	256 Hz	U\$ 199
Muse 2	6 canais + 1 de referência	TP9, AF7, AF8 e TP10	256 Hz	U\$ 249
OpenBCI	4, 8, 16 canais (dependendo do bio-sensor)	Personalizável	200 Hz, 250 Hz (dependendo do bio-sensor)	U\$ 465 a U\$ 2500

Além dos dispositivos descritos acima, outros projetos de EEG de baixo custo foram desenvolvidos mas que não se atualizaram no decorrer do tempo nem ganharam tanta atenção da comunidade acadêmica. Entre eles, o mais significativo é o projeto de hardware e software abertos chamado OpenEEG (<http://openeeg.sourceforge.net/>). O dispositivo **ModularEEG**, desenvolvido no escopo do projeto, é um equipamento composto por dois ou mais amplificadores EEG e uma placa de captura de 6 canais. O hardware aberto pode ser montado seguindo um manual disponível e tem custo aproximado de U\$ 200 a U\$ 400.

#### Software de apoio

Várias ferramentas de software dão apoio à utilização dos equipamentos de EEG mencionados na seção anterior. Existem aplicações proprietárias desenvolvidas pelas próprias empresas que fabricam os equipamentos, algumas pagas e outras gratuitas, e ferramentas de software livre construídas pela comunidade. As ferramentas mais utilizadas são descritas a seguir.

Para ter acesso aos dados do equipamento Emotiv EPOC+, é necessário o uso do SDK disponibilizado em <http://www.emotiv.com/developer/> para Mac OS e Windows. Existem três tipos de licença. A primeira, denominada Básica Gratuita, fornece os API's para uso de recursos referenciados como Comandos Mentais, Frequência de Banda, Expressões Faciais, Dados de Movimentação e Métricas de Desempenho de Baixa Resolução (Restrita a 0.1 Hz), com sessões ilimitadas em 3 dispositivos. O segundo tipo de licença, chamado Não-comercial PRO, dá acesso ao dados brutos do

dispositivo, a todas as APIs da licença Básica Gratuita e ao software EmotivPRO (Permite a visualização de dados em tempo real de dados do dispositivo emotiv, acesso a dados brutos de EEG, dados de movimentação, qualidade de contato, gravação e armazenamento em nuvem), com sessões ilimitadas em até 3 dispositivos. O preço dessa licença varia entre U\$ 55 e U\$ 99 mensais de acordo com o tempo pretendido de uso (de 5 anos a 1 mês, respectivamente). Por último, há a licença Comercial, a qual fornece Métricas de Desempenho de Alta Resolução, Configuração Customizada de APIs e acesso a dados para desenvolvimento de algoritmos próprios. O preço desta licença varia entre U\$ 179 e U\$ 199 mensais, dependendo do tempo pretendido de uso (de 1 ano a 1 mês, respectivamente).

Além do SDK de pesquisa, a Emotiv disponibiliza o EmotivBCI, software proprietário de uso gratuito disponível para Windows e Mac OS. O software oferece recursos de detecção de comandos mentais, reconhecimento de expressões faciais, métricas de performance e sensores de movimentação. Essas funções podem ser utilizadas em conjunto com o Node-RED Toolbox, uma ferramenta de código aberto desenvolvida pela IBM para conexão de dispositivos de IoT (**Internet of Things**).

Os desenvolvedores de aplicações usando o Muse podem encontrar na página <http://developer.choosemuse.com/> o SDK Developer com versões para Windows, Android, Unity e IOS. Há também ferramentas para os casos em que não se deseja escrever códigos mas sim utilizados recursos prontos. Tais ferramentas funcionam nas plataformas Windows, Linux e Mac OS. Tanto o SDK Developer quanto as ferramentas com recursos são de uso gratuito.

Já para o OpenBCI, existem o OpenBCI GUI (voltado para a visualização dos dados EEG em tempo real) e os SDKs OpenBCI Cyton e o OpenBCI Ganglion (para conexão de um bio-sensor a um computador). Há também um **firmware** a ser instalado no bio-sensor escolhido. Esses programas estão disponíveis para download gratuito no portal <https://openbci.com/> e são de código aberto. Há versões dos programas para Mac OS X, Windows 64-bit e Linux 64-bit e os SDKs permitem o desenvolvimento em Java, Python e Node.js. No site do OpenBCI, é possível baixar ainda o "The Ultracortex", um modelo de capacete para instalar os sensores que pode ser impresso em 3D.

Além das ferramentas padrões disponibilizadas pelas empresas, existem algumas **toolboxes** que ajudam na coleta e no processamento de dados de EEG. Uma delas é a plataforma livre e gratuita OpenViBE (<http://openvibe.inria.fr/>), compatível com vários dispositivos de captura EEG e sistemas operacionais Windows e Linux. Ela permite a criação de diferentes tipos de interfaces cérebro-computador e a visualização de dados de EEG em tempo real, além de possuir algoritmos de processamento de sinais, funções de aprendizado de máquina e suporte a **scripts**.

Outra ferramenta livre e gratuita é a PyEEG (<https://code.google.com/archive/p/pyeeg/>). O foco da PyEEG é ser uma biblioteca de funções em Python para a extração de características de dados de EEG, inclusive com a possibilidade de exportação dessas informações para ferramentas de aprendizado de máquina.

Certas ferramentas livres e gratuitas têm sido desenvolvidas para estender as funcionalidades do Matlab. Entre elas se destacam a BCILAB, a FieldTrip e a EEGLAB. A BCILAB (<https://sccn.ucsd.edu/wiki/BCILAB>) é uma **toolbox** que adiciona ao Matlab recursos para projetar, prototipar, experimentar e avaliar interfaces cérebro-computador. A FieldTrip (<http://www.fieldtriptoolbox.org/>), usada para análise de dados de EEG, possui funções como: métodos de processamento e de análise avançados, e análise de tempo-frequência. Já a EEGLAB (<https://sccn.ucsd.edu/eeqlab/index.php>) é uma toolbox que possui uma interface de usuário gráfica (GUI), permite processar dados EEG contínuos de alta densidade e oferece ambiente de programação estruturado para armazenar, acessar, medir, manipular e visualizar dados de EEG

relacionados a eventos. Alguns dos recursos da EEGLAB funcionam também com o software livre Octave, similar ao Matlab.

Por fim, há a biblioteca de rotinas Biosig (<http://biosig.sourceforge.net/>), desenvolvida como software livre e gratuito para as áreas de Neuroinformática, Interfaces Cérebro-Computador, Neurofisiologia, Psicologia, processamento de sistemas cardiovasculares e pesquisa do sono. Ela possui funções para aquisição e processamento de dados, extração de características, classificação, modelagem e visualização de dados, entre outras tarefas. Há versões da Biosig para Matlab, Octave, C/C++ e Python.

### Sumarização

O Quadro 2 relaciona as características das ferramentas de software disponibilizadas para o processamento de dados de EEG coletados com os equipamentos de baixo custo.

**Quadro 2:** características das ferramentas de software para processamentos de dados de EEG.

Software	Dispositivos Alvo	Descrição	Linguagem de programação	Sistema Operacional
Emotiv Development Kit (SDK)	Emotiv EPOC+, Emotiv Insight, Emotiv EPOC Flex	Fornecer acesso à API para diferentes fluxos de dados do EMOTIV. (Software proprietário, três níveis de licença)	Java, C#, C++, Python, Ruby, NodeJS, PHP	Mac, Windows e iOS
Muse SDK	Muse	Oferece conectividade entre o dispositivo Muse e diferentes plataformas operacionais. (Software proprietário e gratuito)	C++	iOS, Android, Windows e Unity
OpenBCI GUI	OpenBCI	O OpenBCI GUI é a ferramenta de software padrão do OpenBCI para visualizar, gravar e transmitir dados dos OpenBCI Boards. (Software Livre e gratuito)	Python, Node.js, Java	Mac, Windows e Linux
OpenViBE	Emotiv EPOC+, Emotiv Insight, Emotiv EPOC Flex, OpenBCI, Muse	O OpenViBE é uma plataforma de software que permite projetar, testar e usar Interfaces Cérebro-Computador (BCIs). Também pode ser usado como um	Python, MATLAB, C++, Lua	Windows e Linux

		sistema genérico de aquisição, processamento e visualização de EEG em tempo real. (Software Livre e gratuito)		
PYEEG	Emotiv EPOC+, Emotiv Insight, Emotiv EPOC Flex, OpenBCI, Muse	Modulo Open Source para extração de características EEG/MEG. (Software Livre e gratuito)	Python	Mac, Windows, Linux
BCILAB	Emotiv EPOC+, Emotiv Insight, Emotiv EPOC Flex, OpenBCI, Muse	Toolbox MATLAB para pesquisa de interface cérebro-computador. (Software Livre e gratuito)	MATLAB	Mac, Windows, Linux
FieldTrip	Emotiv EPOC+, Emotiv Insight, Emotiv EPOC Flex, OpenBCI, Muse	Toolbox MATLAB para análise de MEG, EEG, iEEG e NIRS. (Software Livre e gratuito)	MATLAB	Mac, Windows, Linux
EEGLAB	Emotiv EPOC+, Emotiv Insight, Emotiv EPOC Flex, OpenBCI, Muse	Toolbox para MATLAB interativa capaz de processar dados EEGs contínuos, relacionados a eventos. (Software Livre e gratuito)	MATLAB	Mac, Windows, Unix, Linux
BioSig	Emotiv EPOC+, Emotiv Insight, Emotiv EPOC Flex, OpenBCI, Muse	Biblioteca de software Open Source para processamento de sinais biomédicos. (Software Livre e gratuito)	MATLAB, C/C++	MAC, Windows, Linux

### Técnicas computacionais e aplicações

A utilização de um equipamento de EEG em um projeto de pesquisa comumente envolve duas fases: **treinamento** e **teste**. Na primeira fase, de treinamento, procura-se treinar ou calibrar algum método computacional para identificar e reconhecer padrões diferentes nos sinais de EEG

coletados. Na fase de teste, ocorre a aplicação final desejada. Nela, novos sinais coletados são automaticamente classificados e a informação resultante é utilizada para alguma finalidade. Em ambas as fases e para vários estudos de pesquisa relatados na literatura, é possível identificar uma sequência comum de etapas. São elas:

**Pré-processamento** – Na captura de sinais de EEG, os dados brutos possuem ruído, principalmente em equipamentos de baixo custo. Logo, é desejável a sua eliminação ou suavização. Um filtro passa-banda é a técnica mais frequente nesta etapa, permitindo atenuar ou cortar certas faixas de frequência de acordo com a aplicação.

**Extração de características** – Com o ruído eliminado ou suavizado, pode ser necessária a análise dos sinais coletados. Em geral, são aplicadas técnicas como Análise de Fourier, Discrete wavelet transform (DWT) e wave atom transform (WAT), dentre outras, as quais transformam o sinal do domínio do tempo para um outro domínio (como o da frequência) e, com isso, obtêm mais informações sobre os dados coletados.

**Classificação** – Nesta fase, deseja-se classificar o sinal processado em categorias. O mais comum é que o conjunto de categorias seja previamente definido, embora ele também possa ser gerado dinamicamente na medida em que os experimentos com o dispositivo de EEG avança. É nesta etapa em que ocorre ainda a diferença entre a fase de treinamento e de teste: na primeira, se aprende a classificar o sinal de EEG, enquanto que, na segunda, se faz a classificação propriamente dita. As técnicas que têm sido mais utilizadas para a classificação de sinais de EEG são: Linear Discriminant Analysis (LDA), Quadratic Discriminant Analysis (QDA), Random Forest (RF), Convolutional Neural network (CNN), k-nearest neighbors algorithm (k-NN) e Support Vector Machine (SVM).

**Feedback** – Como última etapa, procura-se demonstrar os resultados obtidos com a classificação. Esses resultados podem ser apresentados como valores de acurácia ou até mesmo como um **feedback** em tempo real (tal como a movimentação de um braço robótico ou de um objeto virtual em uma tela).

Apesar desse processo em etapas ser útil para um bom entendimento dos dados coletados e para a comparação dos diversos métodos de extração de características e de classificação, a sua adoção não é obrigatória. De fato, ZHANG et al. (2015) realizaram um estudo em que propuseram o uso de WAS-LSTM (**weighted average spatial Long Short-Term Memory**) pulando as etapas de pré-processamento e de extração de característica, ou seja, usando apenas os dados brutos.

Nas próximas subseções, descrevemos alguns trabalhos de pesquisa recentes que ilustram essas etapas e o emprego de métodos computacionais para analisar e aplicar sinais coletados de equipamentos de EEG de baixo custo. Os trabalhos estão organizados de acordo com o tipo de equipamento principal que foi utilizado.

## Emotiv EPOC+

CÍMPANU et al. (2017) propuseram um estudo para avaliar os níveis de carga de memória de trabalho, usando uma abordagem conhecida de tarefas denominada **n-back**. Dez pessoas participaram do experimento, realizando tarefas enquanto dados de EEG eram coletados. A pesquisa teve como foco principal estabelecer a importância das ondas alfa, beta e gama na avaliação de carga de trabalho. RF (Random Forest) e SVM (Support Vector Machine) foram comparados no processo de classificar os sinais coletados em tipos de tarefas conforme o **n-back**. Ambos obtiveram resultados de quase 100% de sucesso na classificação. Um segundo objetivo da pesquisa foi verificar



se o modelo de classificação aprendido com um dispositivo profissional da empresa BrainProduct era compatível com um gerado usando o Emotiv EPOC+. Os autores concluíram que um modelo existente, treinado com dados adquiridos usando um sistema de aquisição profissional pode ser usado com sucesso para avaliar a carga de trabalho de memória para dados oriundos de um dispositivo de EEG de baixo custo. A aquisição e o pré-processamento dos sinais EEG foram realizados utilizando o software OpenVibe, comentado mais na frente neste texto. Sobre as características do EPOC, foram relatadas a falta de sensores na parte central da cabeça, a baixa qualidade dos sinais captados e a impossibilidade de usá-lo para monitorar ondas gamma.

ALTHOBAITI et al. (2018) utilizaram o Emotiv EPOC+ em um estudo quantitativo da resposta emocional que os equinos parecem provocar em humanos. Participaram do experimento onze pessoas, com idades entre 16 e 64 anos, e dois cavalos saudáveis com 7 e 19 anos. O experimento foi dividido em fases, que consistia em olhar, tocar e conduzir o animal por um caminho predeterminado. Durante o experimento, dados de EEG, ECG (eletrocardiograma) e EMG (eletromiografia) foram coletados e gravados. As gravações foram divididas e rotuladas com dois tipos de emoções: positivas e negativas. Foram comparados os classificadores SVM (Support Vector Machine) com Kernel Linear e RBF (Radial Basis Function), LDA (Linear Discriminant Analysis), 1-NN (Nearest-Neighbor) e DT (Tree Decision). Dentre esses classificadores, o SVM RBF foi o que obteve resultado mais expressivo, com acurácia de 74,21% e F1 score de 72,18%. Os testes foram realizados ao ar livre, com o uso de uma placa Raspberry Pi conectado a uma PowerBank (Bateria externa com capacidade de carga elevada). Todos os sensores foram empregados nos testes.

## Muse

PAPAKOSTAS et al. (2017) propuseram uma tarefa de treinamento assistida por robô projetada para avaliação cognitiva. Sessenta e nove sujeitos participaram de um experimento consistindo de 25 sessões, com dois momentos em cada sessão. No primeiro momento, o participante ouvia uma sequência de letras falada por um robô. Logo em seguida, ele deveria inserir essa sequência no sistema pressionando botões correspondentes a cada letra. Se a sequência fosse entrada corretamente, a tarefa era considerada bem sucedida. Sinais de EEG foram gravados durante os dois momentos (o de escutar e o de repetir a sequência) usando um dispositivo Muse e esses dados foram empregados ou para treinamento ou para teste. O objetivo da pesquisa era verificar, após uma fase de treinamento, se é possível prever o resultados de uma sessão (sucesso ou falha) usando apenas sinais de EEG coletados na fase de escuta. Cada interação entre o usuário e o sistema foi representada por um vetor de características com valores extraídos dos fluxos de dados capturados pelo Muse. Duas versões de SVM, Random Forests (RF), Extra Trees (ET) e Gradient Boosting (GB) foram comparados na tarefa de classificação. A classificação usando Gradient Boosting forneceu os melhores resultados, alcançando uma precisão máxima de 74%, com uma média de F1 de 69%.

BIRD et al. (2018) desenvolveram um estudo utilizando o Muse para categorizar três estados mentais: neutro, relaxado e concentrado. Foram coletados dados de cinco pessoas, sendo destinado um minuto para obter sinais correspondentes a cada estado mental. Diferentes algoritmos para seleção de características (dentre um total 2100 características) e algoritmos de classificação foram testadas com o objetivo de tentar aprender a detectar os estados mentais. Os seguintes algoritmo de seleção de características foram experimentados: One Rule (OneR), Information Gain, Correlation, Symmetrical Uncertainty e Evolutionary Algorithm. Para classificação, foram testados Naive Bayes, Bayes Net, J48, Random Tree, Random Forest, MLP-Multilayer Perceptron e SVM. Os experimentos mostraram que apenas 44 características eram necessárias para a tarefa e que o melhor classificador

foi o Random Forests, o qual alcançou 87,16% de acurácia usando as características escolhidas pelo OneR.

### OpenBCI

SAKAMAKI et al. (2017) utilizaram o equipamento OpenBCI para detectar sinais relacionados à intenção de movimento e para controlar um robô móvel. Três adultos participaram dos testes, 2 homens e 1 mulher, com idades de 42, 23 e 23 anos respectivamente. Foi utilizado o software Matlab para a aquisição e o processamento de dados EEG, além dos **toolboxes** Matlab Statistics e Machine Learning para projetar e validar os classificadores. Os métodos classificadores LDA (Linear Discriminant Analysis), NN (Neural Network) e SVM (Support Vector Machine) foram empregados e suas acurácias comparadas para testes de imagem motora e de movimento físico. A média de acurácia alcançada foi de 56,4% para a imagem motora e de 72,7% para o movimento físico, sendo o SVM aquele que demonstrou melhores resultados.

MCMAHON e SCHUKAT (2018) apresentaram um protótipo de BCI-VR (interface cérebro-computador e realidade virtual) de baixo custo e de código aberto que permite ao usuário manipular um objeto 3D dentro de um Ambiente de Realidade Virtual como uma forma de neurofeedback imersivo. Este sistema foi funcionalmente apresentado e testado no "Hack the Brain" de 2017, na Dublin Science Gallery. Os participantes do evento puderam testar o sistema, com feedback em tempo real. O equipamento de EEG utilizado foi o OpenBCI, com os sensores posicionados em F3, F4, C3, Cz, C4, P3, P4 (Sistema internacional 10-20). O Equipamento VR foi o OSVR Hacker Development Kit 2 da empresa Open Source Virtual Reality. Os softwares utilizados foram os Virtual-Reality Peripheral Network (VRPN) e o OpenViBE. Segundo os autores, a maioria dos participantes tiveram sucesso na aplicação de imagens motoras direita e esquerda, ocasionando assim a manipulação do objeto virtual.

### Sumarização

O Quadro 3 exhibe algumas técnicas usadas nas etapas de pré-processamento, de extração de características e de treinamento/classificação.

**Quadro 3:** técnicas utilizadas no processamento dos dados.

Etapa	Técnica	Parametrização	Características
1	Filtro passa-banda	6-40 Hz (MARTIŠIUS et al. 2016), 8 Hz - 25 Hz (BHATTACHARYYA et al. 2016), 0,5 Hz - 100 Hz (CÍMPANU et al. 2017), 3 Hz - 40 Hz (SAKAMAKI et al. 2017)	Diminuição de ruídos do dado bruto
2	Análise de Fourier	(AGUIAR et al. 2016)	Análise dos sinais EEG
2	DWT	(MüHLBACHER-KARRER et al. 2017), (BHATTACHARYYA et al. 2016)	Análise dos sinais EEG

3	SVM	kernel linear ou RBF (ALTHOBAITI et al. 2018), (CİMPANU et al. 2016), (MARTIŠIUS et al. 2016), (BAGHDAD et al. 2019)	Método de aprendizado supervisionado
3	LDA	(ELSTOB et al. 2016), (SAKAMAKI et al. 2017), (MARTIŠIUS et al. 2016), (ALTHOBAITI et al. 2018), (MCMAHON e SCHUKAT 2018), (BHATTACHARYYA et al. 2016), (ABDULAAL et al. 2018)	Reconhecimento de padrões, aprendizado de máquina
3	QDA	(SAKAMAKI et al. 2017)	Aprendizado de máquina
3	RF	50 árvores (CİMPANU et al. 2016)	Árvore de decisão
3	CNN	(MÜHLBACHER-KARRER et al. 2017)	Aprendizado de máquina
3	k-NN	1-NN (ALTHOBAITI et al. 2018)	Classificação e regressão

## Conclusão

Este artigo apresentou uma visão geral dos equipamentos modernos de EEG considerados de baixo custo. Também foram descritas técnicas computacionais e ferramentas de software para auxiliar no processamento, na análise e na utilização de sinais de ondas cerebrais com esses dispositivos, com base em uma revisão de trabalhos na literatura. O objetivo do artigo é auxiliar outros pesquisadores que desejem atuar nessa área.

Em linhas gerais, o EPOC+ se destaca com os melhores resultados em termos de acurácia, com 14 sensores de dados mais 2 sensores de referência. No entanto, o fato de ter uma licença de software paga pode inviabilizar sua ampla adoção em projetos de pesquisas. O Muse aparece em seguida quanto à acurácia obtida. Por ter um software de desenvolvimento gratuito (apesar de proprietário), ele se torna uma opção atrativa. Vale lembrar que o Muse, na sua primeira versão, contém 4 sensores + 1 de referência para captação dos sinais cerebrais. Isso é menos da metade dos sensores do EPOC+. O OpenBCI, por sua vez, tem a vantagem de ter tanto o projeto dos dispositivos quanto as ferramentas de software disponibilizados de forma aberta. Isso contribui para o seu uso em diversas aplicações e com diferentes plataformas de hardware e software (Windows, Linux, Mac OS, etc.). Contudo, por se tratar de um projeto modular e totalmente customizável, o aspecto visual da solução OpenBCI lembra um protótipo e o seu custo de aquisição e de montagem é variável. O acréscimo de muitos sensores e *shields* (por exemplo, para conexão wi-fi, bluetooth e etc.) podem encarecer o projeto.

## Referências

ABDULAAL, Mohammed; CASSON, Alex; GAYDECKI, Patrick. **Performance of Nested vs. Non-nested SVM Cross-validation Methods in Visual BCI: Validation Study.** In 2018 26rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO) , Roma, Itália, 2018.

AGUIAR, Santiago; YANEZ, Wilson; BENÍTEZ, Diego. **Low complexity approach for controlling a robotic arm using the Emotiv EPOC headset.** 2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, 2016, pp. 1-6.

ALTHOBAITI, T. et al. **Affect Detection for Human-Horse Interaction.** *2018 21st Saudi Computer Society National Computer Conference (NCC)*, Riyadh, 2018, pp. 1-6.

BHATTACHARYYA, Saugat; SHIMODA, Shingo; HAYASHIBE, Mitsuhiro. **A Synergetic Brain-Machine Interfacing Paradigm for Multi-DOF Robot Control,** in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 46, no. 7, pp. 957-968, July 2016.

BIRD, Jordan et al. **A Study on Mental State Classification using EEG-based Brain-Machine Interface.** 9th International Conference on Intelligent Systems, Madeira Island, Portugal, 2018.

CÎMPANU, C. et al. **A Comparative Study on Classification of Working Memory Tasks Using EEG Signals.** *2017 21st International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)*, Bucharest, 2017, pp. 245-251.

ELSTOB, Daniel; SECCO, Emanuele Lindo. (2016). **A Low Cost Eeg Based Bci Prosthetic Using Motor Imagery.** International Journal of Information Technology Convergence and Services (IJITCS) Vol.6, No.1,February, 2016. CoRR abs/1603.02869:

MARTIŠIUS, Ignas; DAMAŠEVIČIUS, Robertas. **A Prototype SSVEP Based Real Time BCI Gaming System.** Computational Intelligence and Neuroscience, vol. 2016. 2016.Article ID 3861425, 15 pages.

MCCMAHON, M; SCHUKAT, M. **A low-cost, open-source, BCI-VR prototype for real-time signal processing of EEG to manipulate 3D VR objects as a form of neurofeedback.** *2018 29th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, Belfast, 2018. pp. 1-6.

MÜHLBACHER-KARRER, Stephan et al. **A Driver State Detection System Combining a Capacitive Hand Detection Sensor With Physiological Sensors.** in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 4, pp. 624-636, April 2017.

PAPAKOSTAS, Michalis et al. **Towards Predicting Task Performance from EEG Signals.** 2017 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), Boston, MA, USA 2017.

RICHER, Robert et al. **Real-time Mental State Recognition using a Wearable EEG.** Conference proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference. Honolulu, HI, USA, 2018. 5495-5498.

SAKAMAKI, Isao et al. **Assistive Technology Design and Preliminary Testing of a Robot Platform Based on Movement Intention using Low-Cost Brain Computer Interface.** 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Banff, AB, Canada, 2017.

SABBATINI, Renato M.E. **A história do Eletroencefalograma.** Revista Cérebro & Mente, Agosto e Setembro de 1997. Disponível em <[http://www.cerebromente.org.br/n03/tecnologia/historia\\_p.htm](http://www.cerebromente.org.br/n03/tecnologia/historia_p.htm)>. Acessado em 17 de abril de 2019.

SILVA, José Angel Iván Rubianes, BURGOS, Fabio Enrique Suarez, SHIN-TING, Wu. **Interactive Visualization of the Cranio-Cerebral Correspondences for 10/20, 10/10 and 10/5 Systems.** 2016 29th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI), Sao Paulo, 2016, pp. 424-431.

ZHANG, Xiang et al. **Internet of Things Meets Brain-Computer Interface: A Unified Deep Learning Framework for Enabling Human-Thing Cognitive Interactivity.** IEEE Internet of Things Journal, 2018 CoRR abs/1805.00789.