



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

JHOANYN VALOIS FANTIN CALVINHO

ICM Space Game: Uma interface baseada na imaginação de movimentos.

Tucuruí
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

JHOANYN VALOIS FANTIN CALVINHO

ICM Space Game: Uma interface baseada na imaginação de movimentos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Cleison Daniel Silva

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Merlin

Tucuruí

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C168i Calvinho, Jhoanyn Valois Fantin.
ICM Space Game: Uma interface baseada na imaginação de movimentos. / Jhoanyn Valois Fantin Calvinho. — 2023.
63 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Cleison Daniel Silva
Coorientador(a): Prof. Dr. Bruno Merlin
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Mestrado Profissional em Computação Aplicada, Tucuruí, 2023.
1. Interface Cérebro-Máquina. 2. Eletroencefalografia. 3. Jogos Virtuais. 4. Imagética Motora. 5. Processamento de sinais. I. Título.

CDD 006.31

JHOANYN VALOIS FANTIN CALVINHO

ICM Space Game: Uma interface baseada na imaginação de movimentos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Cleison Daniel Silva

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Merlin

Aprovada em 10 de março de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Cleison Daniel Silva - UFPA - Orientador

Dr. Bruno Merlin - UFPA - Coorientador

Dr. Raphael Barros Teixeira - UFPA

Dr. Edson Koiti Kudo Yasojima - UFRA

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a toda minha família
que embora distante, torcem por mim.

AGRADECIMENTOS

Aos meus avós, que sempre me apoiaram em todas as decisões que tomei.

A minha mãe, meu "paidrasto" e ao meu irmão, Glenda Fantin, Breno Fantin e Erick Fantin por todo apoio e amizade.

A minha esposa Cecília Fantin, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos.

A minha segunda família, Giulliane Nascimento, Washington Viana, Rosa Maria, Talita Nascimento, meu afilhado João Henrique e sobrinha Maria Giulia pelos momentos de diversão.

Aos meus orientadores Cleison Daniel Silva e Bruno Merlin, por toda a paciência e ensinamentos repassados.

Ao programa PPCA e a toda sua equipe de professores e técnicos, por tornar viável este curso.

Aos amigos que a vida me deu, Aldair Rabelo, Davison Jaime, Renato Neto, Ronielson Santos, Veridiano Cardoso, Victor Renan, Augusto Santos, João "Sorriso" e Victor Lustosa.

Aos meus amigos de pesquisa, Vitor Villas-boas, Tayla Lopes, William Machado.

Ao meu amigo Vitor Jorge pela colaboração e apoio neste projeto.

Aos meus amigos distantes, que compartilharam bons momentos de lazer.

A todos que participaram e colaboraram para que mais este objetivo se transformasse em realidade.

RESUMO

A Interface Cérebro-Máquina (ICM) pode auxiliar os usuários na participação de tarefas rotineiras, como o ato de se locomover. A comunidade científica trabalha diariamente na tentativa de oferecer sistemas de ICM cada vez mais robustos, com melhores respostas aos comandos dos usuários. No entanto, estes trabalhos, geralmente focam na melhoria do sistema em si. Com base nesta afirmação, o objetivo deste trabalho é desenvolver um jogo virtual como parte de uma ferramenta computacional com a intenção de oferecer uma alternativa aos usuários para auxiliar no aprendizado da utilização de equipamentos de uma ICM baseada na imaginação de movimentos. Para isso o jogo é projetado e programado como tentativa de melhorar a precisão dos usuários no controle dos dispositivos destes sistemas. Os resultados mostram que o jogo funciona quando conectado a uma ICM, e pode servir como alternativa no processo de coleta de sinais de EEG. Ao longo deste trabalho são utilizadas linguagens de programação dedicadas a ICMs, como o OpenVibe, assim como uma linguagem bastante utilizada na programação de jogos eletrônicos, Python. No experimento realizado com 8 voluntários, não há uma diferença discrepante entre as taxas de classificação realizada com o auxílio do protocolo convencional e do ICM Space Game, aproximadamente 56% para ambos os casos, contudo, o ICM Space Game foi o escolhido pela maioria dos participantes deste experimento.

Palavras-chave: Interface Cérebro-Máquina, Imagética Motora, Jogos, BCI, ICM, games, Protocolo de aquisição de sinais de EEG, EEG, Eletroencefalograma.

ABSTRACT

Brain-Machine Interfaces can help users participate in routine tasks, such as moving around. The scientific community works daily in an attempt to offer increasingly robust Brain-Machine Interface systems, with better responses to user commands. However, these works usually focus on improving the system itself. Therefore, the objective of this work is to offer an alternative to the users to help in the learning of the use of equipment of a Brain-Machine Interface based on the imagination of movements. For this, a computational tool based on a virtual game is developed in an attempt to improve the accuracy of users in controlling the devices of these systems. The results show that the tool works when connected to a Brain-Machine Interface, and can serve as an alternative in the process of collecting EEG signals. Throughout this work, programming languages dedicated to ICMs, such as OpenVibe, are used, as well as a language widely used in the programming of electronic games, Python. In the experiment carried out with 8 volunteers, there is no discrepant difference between the classification rates performed with the aid of the conventional protocol and the ICM Space Game, approximately 56% for both

Keywords— Brain-Machine Interface, Motor Imagery, Games, BCI, ICM, games, EEG signal acquisition protocol, EEG, Electroencephalogram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos comumente adotados na tentativa de localizar os pontos de estimulação Magnética Transcraniana. Em (A) o padrão de posicionamento conhecido como 10-10 e em (B) o padrão de posicionamento conhecido como 10-20 (GRIGG-DAMBERGER; FOLDVARY-SCHAEFER, 2012).	19
Figura 2 – Modelo de touca para auxiliar o posicionamento dos eletrodos no escalpo do usuário.	20
Figura 3 – Ilustração das principais etapas de um sistema ICM. Em destaque a implementação de um jogo virtual na etapa de realimentação da saída do sistema na entrada.	21
Figura 4 – Exemplo de uma aplicação do P300 na coleta de sinais de EEG em uma ICM. A intenção do usuário, neste caso, é a seleção da letra P, com isso as linhas e colunas piscam aleatoriamente e toda vez que a letra desejada acende é possível a coleta do potencial evocado, cerca de 300ms após o "gatilho". (Retirada do OpenVibe)	23
Figura 5 – Exemplo de estimulação utilizada em sistema ICM baseado em SSVEP, na imagem, cada quadrado pisca simultaneamente, porém, em frequências diferentes (X,Y,Z). O usuário deve fixar o olhar no quadrado que representa a intenção. (Retirada do OpenVibe).	24
Figura 6 – Ilustração de análise do sinal de EEG ao usuário imaginar o movimento de sua mão esquerda. (Fonte: Autor)	25
Figura 7 – Modelo de protocolo experimental com um recorte de 2s no sinal. Este protocolo serve para associar a IM a atividade elétrica cerebral do usuário. É possível visualizar os sinais de EEG no momento que o usuário inicia a IM no protocolo. (Fonte: Autor)	26
Figura 8 – É possível observar os blocos que geram as dicas para os usuários e os blocos que captam o sinal e armazenam na unidade principal do computador.(Retirada do OpenVibe)	28
Figura 9 – Para esta cadeia de processamento, o CSP recebe os sinais referentes as tentativas da mão esquerda e direita e tenta maximizar a distância entre essas classes.(Retirada do OpenVibe)	30
Figura 10 – Hiperplano de separação para as classes A e B. (Fonte: Autor)	32
Figura 11 – O algoritmo do LDA leva em consideração as operações matemáticas para traçar o melhor hiperplano de separação.(Retirada do OpenVibe)	32
Figura 12 – Jogo ICM-IM. O score e o tempo são apresentados na tela principal do jogo. O jogo possui níveis de dificuldades. (MARSHALL et al., 2013)	35

Figura 13 – Exemplificação das janelas de seleção do sinal de EEG. A janela possui uma duração de 2 segundos e são selecionadas a cada 100 ms. Esta seleção é capaz de gerar um comando para o ICM Space Game a cada 2 segundos, com base nas 20 classificações passadas. (Fonte: Autor)	38
Figura 14 – Placa <i>Cyton</i> , a esquerda, utilizada na aquisição e monitoramento dos sinais de EEG e o <i>dongle</i> , a direita, responsável pela conexão entre a placa e a estação de trabalho. Abaixo uma régua em centímetros para aferir a portabilidade da <i>Cyton</i> . (Fonte: Autor)	39
Figura 15 – Capacete para coleta de sinais de EEG com os eletrodos de aquisição e conforto posicionados. Fonte: (Autor)	40
Figura 16 – Tela capturada do software utilizado no posicionamento do capacete para coleta de sinais de EEG. (Retirada do OpenBCI)	41
Figura 17 – Tela de ajustes iniciais para coleta de dados de EEG	42
Figura 18 – Programação do cenário de treinamento do CSP. Destaque para a implementação de banco de filtros com detalhe para o primeiro filtro de 8 a 12 <i>Hz</i> , o segundo de 10 a 14 <i>Hz</i> e o último de 26 a 30 <i>Hz</i> (Retirada do OpenVibe) . .	43
Figura 19 – Etapa para o treinamento do LDA, acima do bloco CSP, se repete como a figura anterior (Retirada do OpenVibe)	44
Figura 20 – Etapa de processamento da exibição da matriz de acurácia. (Retirada do OpenVibe)	44
Figura 21 – Detalhe da Box "Python Scripting" onde o módulo de controle do jogo é executado, em python. (Retirada do OpenVibe)	45
Figura 22 – Apresentação do fluxograma de execução do ICM Space Game, válido ressaltar que a única forma de comunicação entre o jogador e o módulo de controle se dá quando o jogador observa a tela do Space Game e envia os comandos, mentalmente, através do sistema ICM. Então, de modo simples, o jogador deve observar a tela do jogo e realizar tarefas de imagética motora (lidas pelo sistema ICM e enviadas ao módulo de controle) de forma com que consiga vencer a partida. (Fonte: Autor)	47
Figura 23 – Destaque para as configurações que o técnico responsável pode fazer antes do usuário iniciar o jogo. A tela do jogo é representada pelo retângulo azul. (Fonte: Autor)	47
Figura 24 – Ao colidir com um obstáculo a nave retorna à posição inicial com efeito visual de explosão e com os comandos desabilitados até o surgimento de novos asteroides, este tempo pode ser utilizado como descanso aos usuários até uma nova tentativa. (Fonte: Autor)	48

Figura 25 – Faixa disponível para o posicionamento de naves no jogo, dentro desta faixa a nave pode ser posicionada em posição livre no eixo X, respeitando os limites da tela do jogo, e nas posições abaixo da linha vermelha no eixo Y. As setas em azul indicam a movimentação disponível para a nave, após o tempo de preparo. Em vermelho os asteroides. (Fonte: Autor)	49
Figura 26 – A é a representação da nave ao sistema identificar que o usuário não executa tarefas de IM. B e C, ocorrem quando o usuário imagina o movimento da mão esquerda e direita, respectivamente. (Fonte: Autor)	49
Figura 27 – Comparativo de métodos, a esquerda um usuário ao utilizar o protocolo convencional e a direita um usuário ao utilizar o ICM Space Game. (Fonte: Autor)	51
Figura 28 – Ilustração das etapas dos processos para os dois grupos de usuários (A e B). No grupo A a cadeia de processamento é representada pela seta azul. As setas em preto representam as etapas comuns a ambos os usuários. (Fonte: Autor)	51
Figura 29 – Exemplo de questionário aplicado para conhecimento das condições físicas e mentais do usuários. (Fonte: Autor)	59
Figura 30 – Orientações para o técnico responsável pela aquisição de sinais de EEG. (Fonte: Autor)	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Demonstrativo das características dos usuários relacionadas a faixa de frequência de EEG (CANTARELLI; JÚNIOR; JR, 2016)	20
Tabela 2	– Resultados de acurácia da etapa de treinamento de algoritmos, treinamento de usuários e da validação de dados do protocolo convencional e do ICM Space Game	56
Tabela 3	– Matriz de acurácia quando utilizado os algoritmos treinados e validados com a mesma coleta de dados	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ICM	Interface Cérebro-Máquina
EEG	Eletroencefalograma
IM	Imagética Motora
SSVEP	Potenciais Evocados Visuais de Estado Estacionário (do inglês, Steady State Visually Evoked Potential)
ERD	Dessincronização Relacionada ao Evento (do inglês, Event-Related Synchronization)
ERS	Sincronização Relacionada ao Evento (do inglês, Event-Related Desynchronization)
OV	OpenVibe
CSP	Padrões Espaciais Comuns (do inglês, Common Spatial Pattern)
LDA	Análise do Discriminante Linear (do inglês, Linear Discriminant Analysis)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Eletroencefalograma (EEG) aplicado a Interface Cérebro Máquina . . .	18
2.2	Interface Cérebro-Máquina (ICM)	20
2.3	Tipos de Interfaces Cérebro-Máquina	23
2.3.1	Protocolo de aquisição de sinais de EEG	25
2.4	Openvibe aplicado a Interfaces Cérebro-Máquina.	26
2.5	Aquisição de sinais de Eletroencefalograma	27
2.6	Processamento de sinais de EEG	27
2.6.1	Filtragem Temporal	27
2.6.2	Filtragem Espacial	29
2.6.3	Padrões Espaciais Comuns - CSP	29
2.6.4	Extração de características	31
2.6.5	Classificação de sinais de Eletroencefalograma	31
2.6.5.1	Análise do Discriminante Linear - LDA	31
2.7	Análise de desempenho de Interfaces Cérebro-Máquina	33
2.8	Jogos virtuais aplicados a ICM	34
3	METODOLOGIA	37
3.1	Requisitos de software	37
3.2	Aquisição de sinais de Eletroencefalograma (EEG)	38
3.2.1	Estação de trabalho	39
3.2.2	Placa Cyton	39
3.2.3	Configuração do capacete para EEG	40
3.2.4	OpenBCI Gui	41
3.2.5	OpenVibe	41
3.2.5.1	Cenário de aquisição de sinais	41
3.2.5.2	Cenário para o treinamento dos algoritmos CSP e LDA	42
3.2.5.3	Cenário para validação de dados (Replay)	43
3.2.5.4	Cenário em tempo real	43
3.3	ICM Space Game	45
3.3.1	Princípios do ICM Space Game	45
3.3.2	Módulos do jogo	46
3.3.3	Aspectos do ICM Space Game	46
3.4	Procedimentos experimentais	50
3.4.1	Seleção de usuários	51
3.4.2	Coleta de sinais de EEG	51
3.4.2.1	Treinamento dos algoritmos da ICM	52

3.4.3	Treinamento dos grupos de usuários	53
3.4.4	Análise de desempenho	53
3.4.4.1	Acurácia	53
3.4.4.2	Pesquisa de satisfação	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	O jogo	55
4.2	Pré-experimento	55
4.3	Resultados do experimento	56
4.4	Apuração dos resultados	57
5	CONCLUSÃO	58
A	- EXEMPLO DE QUESTIONÁRIO	59
B	- INSTRUÇÕES	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

As Interfaces Cérebro-Máquina (ICM) são sistemas que proporcionam aos usuários o controle de dispositivos eletrônicos através da utilização de sinais advindos diretamente da atividade elétrica cerebral (MCFARLAND; WOLPAW, 2008). Estes sistemas têm sido utilizados para fornecer um canal alternativo de interação entre o cérebro (do usuário) e o ambiente em volta, sendo capaz de reproduzir a execução de uma atividade motora (MACHADO, 2012). O núcleo das ICMs é formado por circuitos eletrônicos biomédicos, técnicas de processamento de biosinais e algoritmos de inteligência artificial.

As ICMs surgiram como promessas para restabelecer a interação dos usuários com o ambiente ao redor, como pôde ser visto na copa do mundo de 2014, onde foi utilizado um exoesqueleto controlado por um tipo de ICM para possibilitar que uma pessoa com limitações físicas severas pudesse dar o primeiro chute na bola, somente com a tradução da imaginação de movimentos em comandos. Nicolelis (2011) sugeriu que a humanidade poderia se comunicar sem a necessidade de digitar ou pronunciar uma única palavra, através do pensamento.

Fato é que o reconhecimento de pensamentos específicos já é uma realidade (FREITAS, 2017). Para isso, um procedimento considerado de baixo risco aos usuários pode ser adotado para auxiliar no reconhecimento. O eletroencefalograma ou EEG, é um procedimento classificado como não invasivo, pois os eletrodos (conectores responsáveis por interligar o cérebro do usuário ao sistema ICM) são posicionados na superfície do couro cabeludo, sem necessidade de procedimentos cirúrgicos (ROQUE; SANTOS; FERREIRA, 2015).

O termo "pensamento", neste caso, é a denominação concedida a atividade elétrica cerebral no ato de se executar alguma tarefa mental. Então, ao associar a tarefa com a atividade elétrica cerebral gerada por esta tarefa, torna-se possível identificar o pensamento e traduzi-lo em um sinal capaz de controlar um dispositivo eletrônico. No entanto, para que o controle do dispositivo seja feito com precisão, faz-se necessário a padronização da atividade cerebral.

Uma das formas de auxiliar o usuário a padronizar a atividade elétrica cerebral é a Imagética Motora (IM). Na IM, os usuários são aconselhados a imaginar os movimentos de alguns membros do seu corpo, como: mãos, pés e língua (HAMEDİ; SALLEH; NOOR, 2016). Segundo Roberto (2019), a imaginação de movimentos gera uma atividade elétrica cerebral, no hemisfério do cérebro oposto ao do movimento imaginado, semelhante a execução do movimento muscular, ou seja, ao usuário imaginar o movimento de sua mão direita é possível observar uma variação na atividade elétrica cerebral, no lado esquerdo do cérebro.

Em resumo, a IM é utilizada para padronizar os sinais advindos da atividade elétrica cerebral e facilitar a detecção dessas variações para que os sinais sejam reconhecidos e empregados no controle de dispositivos externos. Com a execução da IM é esperado uma espécie de assinatura, em uma faixa de frequência específica do sinal, na análise da atividade elétrica cerebral. Porém,

para que as tarefas de IM sejam de fato associadas ao pensamento do usuário, um protocolo para a aquisição dos sinais de EEG é comumente adotado, como realizado em (BUZZI et al., 2016). Através deste protocolo é possível associar a padronização da atividade elétrica cerebral gerada pela IM com a tarefa mental que o usuário deve executar.

De forma geral, as ICMs baseadas em IM podem ser divididas em três blocos: aquisição de sinais de EEG, processamentos de sinais de EEG e, por fim, aplicações como: controle de cadeira de rodas (ZHANG et al., 2015) e jogos virtuais (BORDOLOI; SHARMAH; HAZARIKA, 2012).

Neste sentido os jogos virtuais podem ser utilizados como formas de inclusão social (HEIDRICH et al., 2016) ou uma alternativa ao controle de dispositivos físicos, uma vez que, para a implementação de um jogo, é necessário basicamente um computador. Com isso, em testes, os jogos podem auxiliar e/ou viabilizar o estudo com dispositivos mais complexos (ex: drones, braços robóticos), evitando danos materiais provenientes de um sistema que pode apresentar instabilidades.

Os jogos virtuais podem ser utilizados para auxiliar os usuários na modulação da atividade elétrica cerebral, fazendo com que os protocolos adotados para a aquisição dos sinais de EEG sejam menos cansativos e onerosos para o usuário. Além disso, os jogos podem ajudar na avaliação dos algoritmos aplicados na etapa de processamento de sinais de uma ICM (ISLAM et al., 2019).

Para a associação da atividade elétrica cerebral com a imagética motora faz-se necessário a adoção de um protocolo experimental, porém, este tipo de protocolo é oneroso aos usuários. O desgaste mental enfrentado pelos usuários na execução do protocolo experimental para a aquisição de sinais ainda é uma limitação de ICMs de baixo custo (BERNARDI, 2018). Além disso, a qualidade do sinal coletado pode sofrer interferências diretas devido a má execução do protocolo ou até mesmo a perda de interesse do usuário na atividade realizada, conhecida neste cenário como engajamento (TEIXEIRA et al., 2017). A aplicação de jogos virtuais em sistemas ICM pode auxiliar os usuários no controle da interface ao proporcionar entretenimento para tentar manter a concentração do usuário na realização da IM, dessa forma, os usuários podem aprender a controlar a interface de forma lúdica.

Os jogos virtuais podem se tornar relevantes, no entanto, jogos complexos podem causar desinteresse em alguns usuários devido a frustração de não conseguir finalizar o jogo, acarretando a perda de concentração. Gêneros de jogos virtuais, como ação, simulação e lógica são comuns no contexto de jogos aplicados a ICMs, pois é possível desafiar sem desestimular o usuário. Além disso esses jogos podem ser uma nova forma de interação entre usuários com alguma necessidade especial e usuários típicos, como uma espécie de cooperação entre os usuários onde a utilização da IM pode habilitar outros comandos não executados pelos controles físicos dos jogos (MARSHALL et al., 2013).

Portanto, o objetivo deste trabalho é propor um jogo virtual, ICM Space Game, como uma

alternativa mais atrativa para o treinamento dos usuários de uma ICM baseada em imagética motora. Como já mencionado, o protocolo convencional é desgastante para os usuários, então, a ideia de trazer um jogo virtual pode tornar esta etapa menos onerosa para os usuários, capaz de mitigar o desgaste e manter a concentração dos usuários por mais tempo. Para isso, o trabalho é dividido em duas etapas, na primeira etapa é realizado o treinamento do algoritmos de inteligência artificial que identificam a imagética motora. Na segunda etapa, é realizado o treinamento dos usuários, através do protocolo convencional e do ICM Space Game. O trabalho apresenta o desenvolvimento do jogo atrelado a uma ICM, os resultados entre a comunicação do jogo e a interface são alcançados, com taxas de classificação próximas a do protocolo convencional adotado.

O documento está organizado em 5 capítulos distribuídos ordenadamente, onde, no Capítulo 2 é realizada a fundamentação teórica abordando conceitos básicos de ICM, como: funcionamento, tipos, aplicações e etapas de uma ICM e de jogos virtuais aplicados a uma ICM. No capítulo 3 são descritos os métodos adotados para a execução deste trabalho. E, por fim, nos capítulos 4 e 5 são apresentados os resultados e a conclusão, respectivamente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos básicos de uma Interface Cérebro-Máquina (ICM) baseada em Eletroencefalograma (EEG) e o software de implementação da ICM: OpenVibe. São descritos também algoritmos utilizados no processamento de sinais e como é possível avaliar a resposta destes algoritmos na tradução dos sinais de EEG dos usuários em comandos.

2.1 Eletroencefalograma (EEG) aplicado a Interface Cérebro Máquina

Para compreender o funcionamento do eletroencefalograma, faz-se necessário o entendimento básico do cérebro e de dispositivos eletrônicos associados a esta técnica de coleta de sinais advindos da atividade elétrica cerebral. O cérebro é o órgão responsável por funções cotidianas, como: pensamento, fala e movimentação. No entanto, apesar de parecer natural, a execução destas funções é um processo complexo. Ao mover um membro do corpo, um sinal de comando percorre desde o córtex motor, localizado na parte central do cérebro, até o membro a ser locomovido em questões de milissegundos.

Uma atividade elétrica cerebral pode gerar milhões de impulsos nervosos provenientes dos neurônios, células responsáveis por carregar as informações enviadas pelo cérebro. As atividades cerebrais geram ondas elétricas que podem ser medidas, com base na diferença de potencial entre o local da atividade e um ponto neutro, até mesmo sobre o couro cabeludo. A eletricidade gerada pode ser denominada de sinal elétrico cerebral e uma das formas de medição desse sinal é através do eletroencefalograma ou, simplesmente, EEG.

Contudo, assim como a execução de movimentos gera uma atividade elétrica cerebral, geralmente localizada no lado do cérebro contralateral ao movimento, o simples fato de imaginar a execução de tal movimento também é capaz de gerar uma atividade elétrica cerebral similar, este fenômeno é conhecido como imagética motora (IM).

Através de eletrodos localizados em posições pré-definidas sobre o couro cabeludo, equipamentos que monitoram o sinal de EEG podem medir a diferença de potencial elétrico gerado por um grupo de neurônios, ao imaginar o movimento da mão por exemplo, na ordem de dezenas de micro Volts (μV) (CANTARELLI; JÚNIOR; JR, 2016). Com isso, este potencial elétrico pode ser processado e convertido em um comando que representa o "pensamento" do usuário. Para isso é necessário compreender o tipo de sinal cerebral e a área do cérebro em que este sinal se manifesta com maior incidência. De posse destas informações, foram desenvolvidos padrões de posicionamento de eletrodos com base nas áreas do cérebro onde são esperados comportamentos padronizados. A partir daí, surgiram os sistemas de posicionamento 10-10 e 10-20 adotados

internacionalmente ao realizar a disposição dos eletrodos no escalpo do usuário, como ilustra a Figura 1.

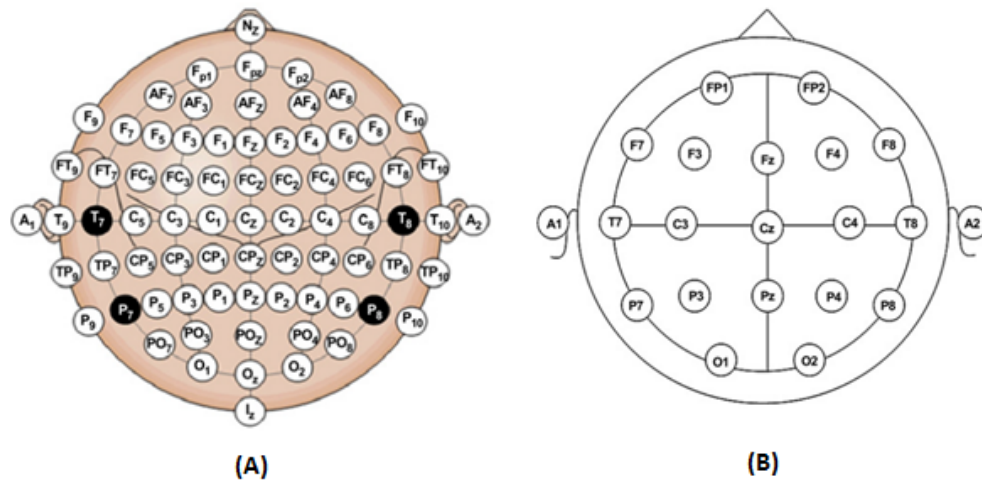


Figura 1 – Modelos comumente adotados na tentativa de localizar os pontos de estimulação Magnética Transcraniana. Em (A) o padrão de posicionamento conhecido como 10-10 e em (B) o padrão de posicionamento conhecido como 10-20 (GRIGG-DAMBERGER; FOLDVARY-SCHAEFER, 2012).

Os eletrodos posicionados são nomeados e numerados, onde a sigla que contém o nome e o número é relativa a área cerebral do usuário e ao lado do escalpo onde estão localizados, respectivamente (FONSECA, 2016). A grande diferença entre os sistemas de posicionamento é a quantidade de eletrodos com localização definida, e, conseqüentemente a distância entre os eletrodos.

Fato é que ao posicionar os eletrodos livremente pelo escalpo, a precisão do posicionamento com a área do cérebro correlata, é comprometida. Para contornar este problema, toucas apropriadas para cada padrão de posicionamento de eletrodos podem ser adotadas, o que pode minimizar o erro advindo no posicionamento dos eletrodos. Um modelo de touca pode ser visualizado na Figura 2

Ao estudar o sinal elétrico coletado no EEG, pode-se observar que este sinal é sub-dividido em faixas de frequências que a partir de 0.5 *Hz* podem chegar, em raros casos, até 100 *Hz* (MACHADO, 2012). Essas frequências são de extrema relevância ao analisar um EEG, pois cada faixa de frequência é capaz de representar um estado em que o usuário se encontra. Por exemplo, atividades aparentes na faixa de frequência de 0,5 *Hz* a 4 *Hz* podem ser associadas ao sono profundo. Com o conhecimento das atividades esperadas em cada faixa de frequência de um sinal de EEG e a área do cérebro onde as atividades podem ser captadas com maior incidência, é possível iniciar o processo de transformar a atividade elétrica cerebral do usuário em um comando capaz de controlar um dispositivo eletrônico. A Tabela 1 demonstra algumas bandas de frequências conhecidas e a relação com as características do usuário.

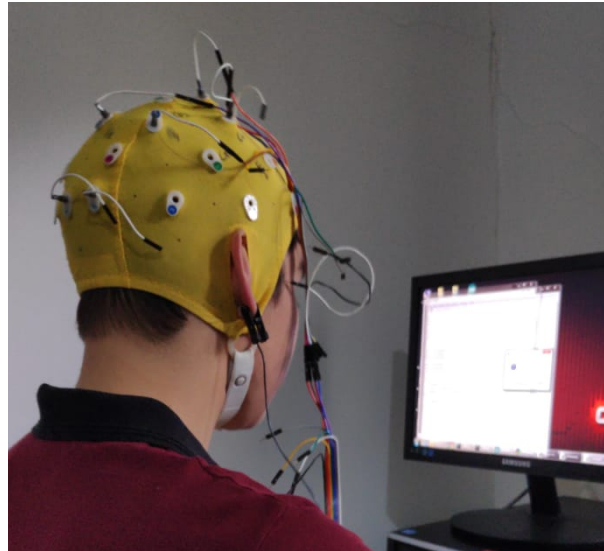


Figura 2 – Modelo de touca para auxiliar o posicionamento dos eletrodos no escalpo do usuário.

Tabela 1 – Demonstrativo das características dos usuários relacionadas a faixa de frequência de EEG (CANTARELLI; JÚNIOR; JR, 2016)

Tipos de Frequência	Faixa de operação	Características do usuário
Delta	0,5 a 4 <i>Hz</i>	Sono profundo
Theta	4 a 8 <i>Hz</i>	Estresse emocional
Alfa	8 a 13 <i>Hz</i>	Estado de relaxamento Olhos fechados
Beta	13 a 30 <i>Hz</i>	Movimentos físicos Resolução de problemas Tomada de decisões
Gama	Acima de 30 <i>Hz</i>	Consciência Percepção

2.2 Interface Cérebro-Máquina (ICM)

Sistemas conhecidos como ICM ou simplesmente ICM são usualmente configurados para detectar as variações de energia em um sinal de EEG e, a partir de algoritmos computacionais, gerar um sinal de controle para um dispositivo eletrônico. No geral, as ICM's são configuradas para reconhecer os padrões cerebrais presentes com maior incidência nas frequências: alfa e beta (VALLABHANENI; WANG; HE, 1970), isso devido a maior facilidade que o usuário tem de controle sobre essas frequências.

Ao exemplificar o controle que o usuário pode exercer na frequência alfa, é possível notar uma diminuição de intensidade na energia do sinal no momento em que o usuário realiza a imaginação ou o movimento de algum membro do corpo, esse fenômeno é conhecido como Dessincronização Relacionada ao Evento (ERD, do inglês *EventRelatedDesynchronization*). O

inverso também pode ser observado, quando o usuário relaxa, a tendência é que um grupo de neurônios trabalhe de forma sincronizada, essa sincronização é capaz de aumentar a energia do sinal na frequência especificada, esse fenômeno é conhecido como Sincronização Relacionada a Evento (ERS, do inglês *EventRelatedSynchronization*). Para realizar a captura destes eventos é necessário o posicionamento adequado dos eletrodos na área do escalpo correlata com as ações realizadas pelo usuário.

A ICM foi desenvolvida com a intenção de oferecer aos usuários uma forma de interação com o ambiente sem a necessidade da realização de movimentos musculares. A forma encontrada para tornar tal atividade possível foi a de traduzir sinais elétricos encontrados na atividade cerebral em comandos (NICOLAS-ALONSO; GOMEZ-GIL, 2012). Com isso, as ICM's são voltadas a pessoas que possuem restrições de movimentos de membros do corpo, mas não restritas a este grupo de pessoas (MCFARLAND; WOLPAW, 2008).

As principais etapas de uma ICM são constituídas por três blocos, são eles: Aquisição de sinais de EEG, onde o processo de posicionamento de eletrodos é realizado; Processamento de sinais de EEG, onde a ICM é configurada; o bloco de comandos, onde ocorre a geração de um sinal capaz de controlar um dispositivo eletrônico, como uma cadeira de rodas (ABDULKADER; ATIA; MOSTAFA, 2015). Uma ilustração dessas etapas pode ser visualizada na Figura 3.

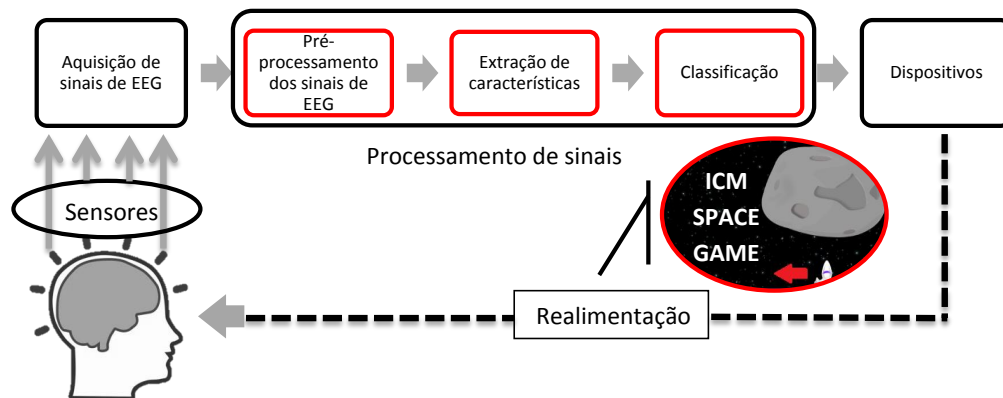


Figura 3 – Ilustração das principais etapas de um sistema ICM. Em destaque a implementação de um jogo virtual na etapa de realimentação da saída do sistema na entrada.

A etapa inicial de um sistema ICM é a aquisição dos sinais advindos da atividade elétrica cerebral. Os sinais são coletados com base na atividade de um grupo de neurônios presentes no cérebro, por isto, é comum a adoção do termo sinais neuronais ou neurológicos. Nesta etapa, dois métodos são frequentemente utilizados para a coleta dos sinais, os métodos invasivos e os não invasivos (ABDULKADER; ATIA; MOSTAFA, 2015). Como as técnicas invasivas são mais custosas e oferecem mais riscos aos usuários devido a necessidade de procedimentos cirúrgicos para a implantação dos equipamentos que medem a atividade elétrica cerebral, eletrodos (BERNARDI, 2018), as técnicas não invasivas são, geralmente, as mais empregadas para a realização da coleta dos sinais da atividade elétrica cerebral.

Nas técnicas não invasivas utilizadas na etapa de aquisição de sinais, os sinais são coletados sem a necessidade de procedimentos cirúrgicos, o que reduz o risco a saúde dos usuários. Porém, pelo fato do contato com o cérebro ser de forma indireta esses métodos são constantemente afetados com interferências, essas interferências podem ser denominadas de ruídos ou artefatos (VAZ, 2016) (HAGHIPOUR; FIROUZ, 2016).

Como exemplo de técnica não invasiva, a já mencionada eletroencefalografia (EEG) se destaca atualmente, isso pois esta técnica possui alta resolução temporal, o que possibilita captar variações na atividade cerebral na ordem de milissegundos, ainda é possível encontrar equipamentos portáteis e de baixa complexidade de operação para a realização das coleta dos sinais neuronais (MCFARLAND; WOLPAW, 2011). No entanto, um problema que afeta este método é a sua baixa resolução espacial, uma vez que não há contato direto entre os eletrodos que captam o sinal e o cérebro. Com isso, ao utilizar os equipamentos que mensuram os sinais de EEG é possível medir a atividade elétrica cerebral por meio de eletrodos posicionados sobre o couro cabeludo.

O bloco de processamento dos sinais, segunda etapa do sistema ICM, é formado basicamente por três sub-etapas: pré-processamento dos sinais, extração de características e a classificação dos sinais de EEG. Como pode ser observado nas caixas em vermelho na Figura 3,

Um dos objetivos da etapa de pré-processamento de sinais, é de reduzir o nível de ruído através da aplicação de algoritmos computacionais específicos, como algoritmos de filtragem, por exemplo. Um exemplo de ruído comum é o de alimentação da rede, geralmente encontrado entre 50 e 60 *Hz*, com isso um filtro do tipo *notch* pode ser utilizado para atenuação desta interferência.

Após a etapa do pré-processamento o sistema ICM é programado para extrair características do sinal de EEG, como exemplo, pode-se citar a energia em uma faixa de frequência específica. Com isso, o sistema torna-se capaz de classificar os sinais constantes na atividade elétrica cerebral do usuário. A partir desta classificação é possível produzir um sinal de comando que seja capaz de controlar um dispositivo eletrônico.

A etapa de realimentação ou "feedback" ilustrada na Figura 3 é opcional, não sendo de fato necessária, mas pode ser adotada na tentativa de melhorar os índices de classificação dos algoritmos. Nesta fase, o usuário tem acesso aos comandos gerados pela cadeia de processamento, com isso o usuário é capaz de adequar a classificação gerada pelo sistema. É nesta etapa que o ICM Space Game deve atuar, apresentando de uma forma lúdica e em tempo real como o sistema interpreta os sinais da atividade elétrica cerebral do usuário, possibilitando adequações na imagética realizada.

2.3 Tipos de Interfaces Cérebro-Máquina

Como mencionado na seção anterior, algumas estratégias podem ser utilizadas para ajudar o usuário do sistema a gerar e/ou controlar os padrões cerebrais medidos através do EEG. Dentre as mais citadas neste contexto estão o P300, o SSVEP (do inglês, *steadystatevisuallyevokedpotentials*) e a Imagética Motora (IM). No Potencial P300 é possível observar um pico positivo no sinal de EEG em torno de 300ms após um estímulo externo qual pode ser visual, auditivo ou somatossensorial (NICOLAS-ALONSO; GOMEZ-GIL, 2012). Esse tipo de potencial é gerado pelo cérebro de forma involuntária ao presenciar um evento pouco frequente. Devido este fator, o usuário necessita de pouco ou nenhum treinamento para gerar os padrões cerebrais reconhecidos pelo sistema. Porém, a coleta e interpretação dos sinais só acontece após o término da estimulação do usuário, fator conhecido como evento exógeno, o que torna as respostas em tempo real do sistema ICM baseado em P300 inviáveis. Essa limitação torna a técnica mais indicada para atividades que não necessitam controle em tempo integral, conhecidas como ICM síncronas (VAZ, 2016).

Um exemplo de aplicação de sistemas de ICM baseados em P300 pode ser visualizado na Figura 4. Onde é aplicado um conjunto delimitado de estimulações de forma aleatória ao usuário que deve se concentrar na estimulação que melhor representa a sua intenção do usuário. Com isso, é esperado que o usuário seja capaz de selecionar as letras com base na atividade elétrica cerebral.

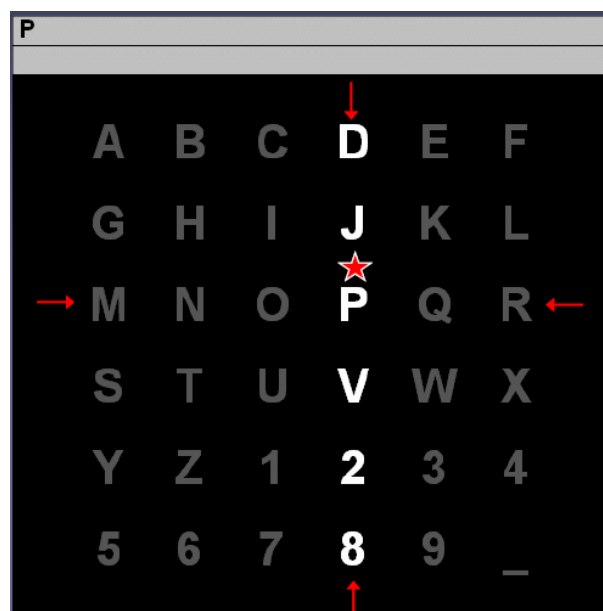


Figura 4 – Exemplo de uma aplicação do P300 na coleta de sinais de EEG em uma ICM. A intenção do usuário, neste caso, é a seleção da letra P, com isso as linhas e colunas piscam aleatoriamente e toda vez que a letra desejada acende é possível a coleta do potencial evocado, cerca de 300ms após o "gatilho". (Retirada do OpenVibe)

No exemplo da Figura 4 as linhas e colunas acendem de forma aleatória e por uma quantidade de vezes determinada pelo desenvolvedor. Cada vez que este processo ocorre o sistema retorna

uma saída. O usuário deve atentar para a letra que gostaria que o sistema retornasse. O conceito desta técnica é que o potencial será gerado por um fator pouco frequente e inesperado, uma vez que não é possível saber a ordem que as linhas e colunas acendem. É válido ressaltar que o sistema só retorna uma saída após o término de todo o procedimento. Outra estratégia bastante utilizada em sistemas de ICM é o SSVEP que, assim como o P300, depende de um estímulo exógeno, o usuário é estimulado visualmente. No SSVEP os usuários são estimulados visualmente em frequências específicas de 3,5 a 75 *Hz*, o que gera sinais de EEG na mesma faixa de frequência (F PALMAS G, 2003).

Um sistema ICM baseado em SSVEP é programado para apresentar as estimulações visuais de forma simultânea, desta forma, o usuário deve focar na estimulação que representa a intenção esperada. Uma forma de avaliação destes sinais é sincronizar a frequência programada na estimulação com a energia do sinal na mesma frequência de estimulação medida no EEG do usuário. Um exemplo destes sistemas é demonstrado na Figura 5.

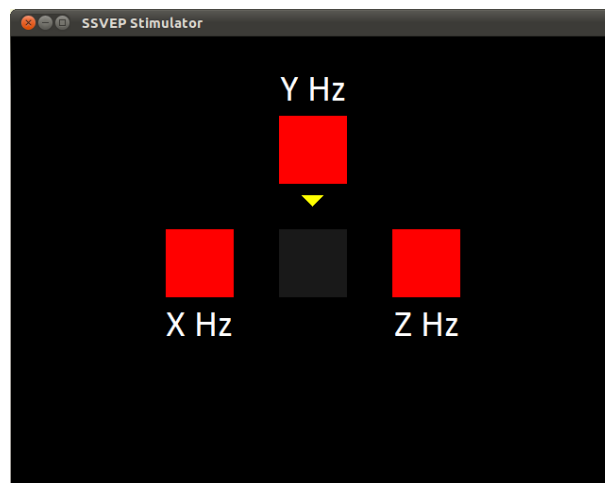


Figura 5 – Exemplo de estimulação utilizada em sistema ICM baseado em SSVEP, na imagem, cada quadrado pisca simultaneamente, porém, em frequências diferentes (X,Y,Z). O usuário deve fixar o olhar no quadrado que representa a intenção. (Retirada do Open-Vibe).

O terceiro tipo de sistema ICM que é abordado neste trabalho é a imaginação de movimentos, conhecida como Imagética Motora (IM). Esta estratégia para gerar os padrões cerebrais é bastante discutida na literatura (CAMACHO; MANIAN, 2016)(DUARTE, 2017)(SILVA, 2017). O conceito por trás da IM é que ao usuário simular mentalmente um ato motor, como o movimento de algum membro, por exemplo, um ERD pode ser observado no hemisfério do cérebro contralateral (BERNARDI, 2018),(SILVA, 2017), ou seja, se o usuário simular o movimento da mão direita o ERD pode ser melhor visualizado no lado esquerdo do cérebro. Um conceito que aparece com frequência em sistemas de ICM baseados em IM é o conceito de classes, onde a quantidade de classes depende da quantidade de tarefas que o usuário pode imaginar. Na prática, em um sistema ICM de duas classes o usuário tem apenas duas tarefas disponíveis para realizar, ou seja, a imaginação de movimento que representa uma classe ou a que representa a outra

classe. Um exemplo de sistemas de ICM baseado em IM de duas classes que são constantemente utilizados é a imaginação de movimentos da mão esquerda ou direita, Figura 6.

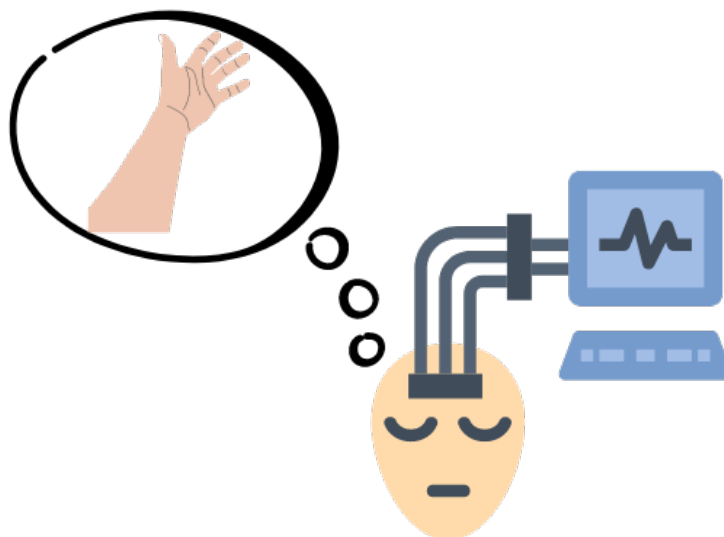


Figura 6 – Ilustração de análise do sinal de EEG ao usuário imaginar o movimento de sua mão esquerda. (Fonte: Autor)

Atividades desse tipo provocam alterações na energia do sinal que podem ser visualizadas na banda de frequência alfa. Na IM os estímulos são endógenos e os sistemas de ICM baseados em IM são assíncronos, permitindo o controle quase que em tempo real de dispositivos. Além disso, por permitir este tipo de controle, os custos computacionais para processar um sistema ICM baseado em IM são mais elevados devido o seu grau de complexidade (NICOLAS-ALONSO; GOMEZ-GIL, 2012). No entanto, atividades de IM usualmente necessitam algum treinamento dos usuários para que os padrões sejam reconhecidos pelo sistema.

2.3.1 Protocolo de aquisição de sinais de EEG

Para facilitar a associação do movimento imaginado com a atividade elétrica cerebral gerada, é adotado um protocolo experimental de coleta de sinais. Na execução deste protocolo o usuário é instruído a seguir instruções de forma ordenada em períodos de tempo especificados. Com o conhecimento da atividade cerebral que deveria ocorrer em cada período do protocolo, torna-se possível recortar o sinal com base nas atividades que o usuário imagina. O modelo das etapas de um protocolo experimental com base no tempo para uma tentativa de execução de uma tarefa mental, pode ser observado na Figura 7.

Com a adoção deste modelo de protocolo é possível mapear os padrões cerebrais gerados pela tarefa mental realizada pelo usuário. Em geral, em uma coleta de sinais de EEG, o protocolo

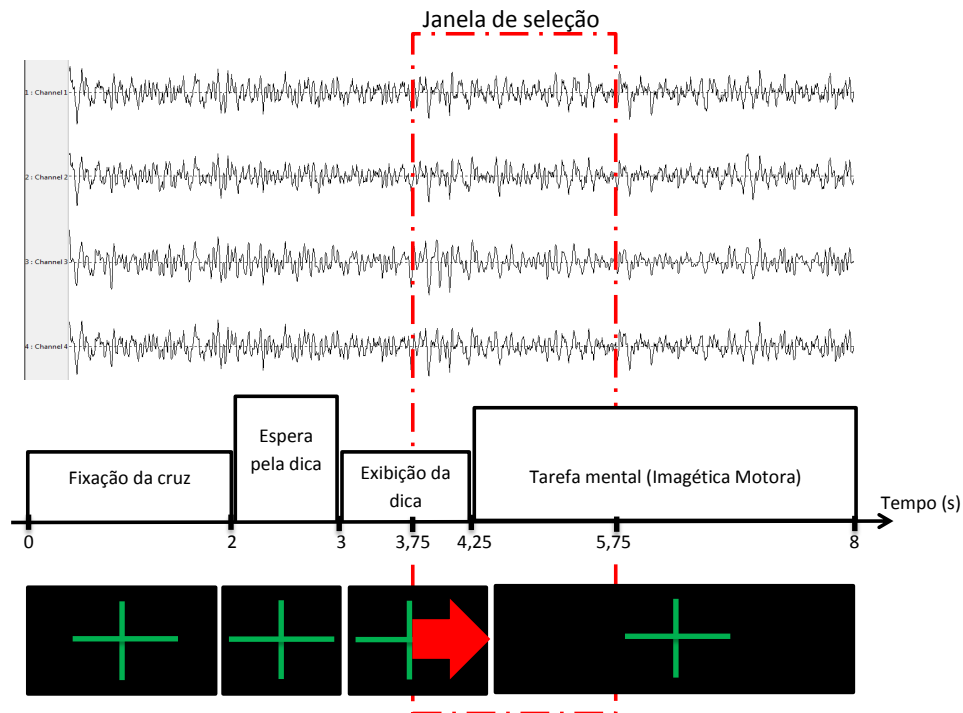


Figura 7 – Modelo de protocolo experimental com um recorte de 2s no sinal. Este protocolo serve para associar a IM a atividade elétrica cerebral do usuário. É possível visualizar os sinais de EEG no momento que o usuário inicia a IM no protocolo. (Fonte: Autor)

é executado uma vez, onde são realizadas em média 20 tentativas (trials) para cada tipo de tarefa mental. Cada padrão de tarefa mental realizada pelos usuários pode ser denominado de classe de imagética motora. Então, para uma trial do protocolo o funcionamento inicia quando o sistema exibe uma cruz verde para informar ao usuário que a seção de coleta de sinais de EEG irá começar, após aproximadamente 3 segundos, é apresentado ao usuário a dica, a classe de imagética motora que o usuário deve realizar (Na Figura 7 a dica é para que o usuário realize a imaginação de movimentos da sua mão direita). Após o desaparecimento da dica o usuário realiza a imagética motora pelo tempo aproximado de 3,75 segundos, seguido por um breve tempo de descanso até o próximo aparecimento da cruz verde. Há um tempo convencional especificado para cada etapa do protocolo, no entanto este tempo pode ser determinado pelo desenvolvedor. Após este processo, um conjunto de dados que contém os sinais de EEG coletados durante o protocolo é gerado.

2.4 Openvibe aplicado a Interfaces Cérebro-Máquina.

As ICM's exigem um conjunto de dispositivos e programas, hardwares e softwares, para o processamento de sinais (de EEG). Existem softwares dedicados para o processamento desses sinais, como o *OpenVibe* (OV) (BRUNNER et al., 2012). No ambiente de programação do OV, é possível programar diferentes tipos de ICM's, síncronos ou assíncronos por exemplo.

No entanto para a criação de um ambiente capaz de reproduzir as etapas da ICM, o usuário do software deve, de forma primordial, possuir conhecimento sobre quais algoritmos de processamento de sinais adotar para a criação de ICM's. No OV a programação é feita através de blocos no intuito de torná-la intuitiva. Os blocos devem ser conectados entre si, de forma lógica, e dispostos, preferencialmente na mesma janela de programação. Cada janela de programação do OV é conhecida como cenário, com isso é possível programar um cenário para a aquisição dos sinais de EEG e um cenário para o processamento dos sinais, por (RENARD et al., 2010).

A programação dentro dos cenário é feita de forma gráfica, utilizando blocos. Os blocos presentes no OV são programados para executarem um conjunto de operações matemáticas capazes de implementar sistemas ICM. Neste sentido, para um usuário que queira apenas utilizar as equações matemáticas disponíveis por padrão, o OV torna-se bastante prático ao possibilitar que, ao dispor os blocos de forma lógica, permita ao usuário executar um sistema ICM sem de fato escrever uma linha de comando, embora isto seja possível. A utilização de linhas de código é voltada para a programação dos blocos do OV (que contém as operações matemáticas), com isso é possível alterar as operações pré-configuradas nos blocos. Contudo para a execução desse tipo de programação são necessários conhecimentos avançados na linguagem do OV.

Nesta seção são apresentados os cenários de aquisição e processamento de sinais para a montagem de um sistema ICM baseado em IM.

2.5 Aquisição de sinais de Eletroencefalograma

Como mencionado na seção 2.2, na etapa inicial da ICM ocorre a aquisição dos sinais de EEG. Os sinais de EEG são, convencionalmente, coletados dos usuários ao seguir um protocolo experimental como o citado na Figura 7. Para a aquisição de um sinal bruto, ou seja, sem nenhum processamento prévio, é necessária a configuração do servidor de aquisição do OV. O servidor de aquisição depende do hardware de aquisição selecionado e da configuração do tempo para a execução do protocolo experimental. Os tempos apresentados na Figura 7 já são pré-definidos no OV, porém, são passíveis de alterações. A execução desta etapa é necessária antes das outras etapas da ICM, seja em ICM's online ou offline, pois a partir desta aquisição de sinais torna-se possível a calibração dos algoritmos utilizados no processamento.

2.6 Processamento de sinais de EEG

2.6.1 Filtragem Temporal

Na busca de reduzir os ruídos encontrados na captura de sinais de EEG, pesquisadores costumam utilizar técnicas de seleção de trechos do sinal. Esses trechos são especificados com base nas faixas de frequência presentes nos sinais. A seleção de faixas de frequência de interesse é um exemplo de estratégia adotada para realizar a filtrar temporal dos sinais de EEG. Com

esta técnica é possível ressaltar algumas propriedades do sinal ao analisar somente a faixa de frequência em que incidem os fenômenos da imaginação de movimentos, por exemplo.

Os trabalhos de (ARVANEH et al., 2017) e (LOPES, 2018) comprovam que é possível utilizar um conjunto de filtros na intenção de dividir a faixa de frequência analisada em sub-faixas, e, que ao fazer isto pode se obter uma melhora na taxa de classificação dos algoritmos. Na prática, uma faixa de frequência de 8 a 30 *Hz* por exemplo, pode ser sub-dividida em várias faixas de frequências, com intervalo de 4 *Hz*, ou seja, vários filtros com faixas de frequências menores, onde o primeiro filtro abrange a faixa de 8 a 12 *Hz* e o último de 26 a 30 *Hz*. Esta estratégia é comumente utilizada para melhorar o desempenho da etapa de filtragem ao separar as bandas de frequências mais relevantes para a análise do fenômeno de IM.

O ruído de alimentação de rede dos equipamentos pode ser atenuado nesta etapa. Para isso, geralmente é utilizado um filtro rejeita faixas, uma vez que a frequência destes ruídos, em geral, está fora do intervalo de frequência esperado dos fenômenos de IM analisados nos sinais de EEG.

No OpenVibe, esse tipo de filtragem pode ser adotada ainda na etapa de aquisição de sinais sem esforços, com a adição de um bloco que é capaz de realizar uma filtragem temporal no sinal de EEG no momento da coleta dos sinais. A implementação da aquisição de sinais de EEG no OV pode ser visualizada, Figura 8.

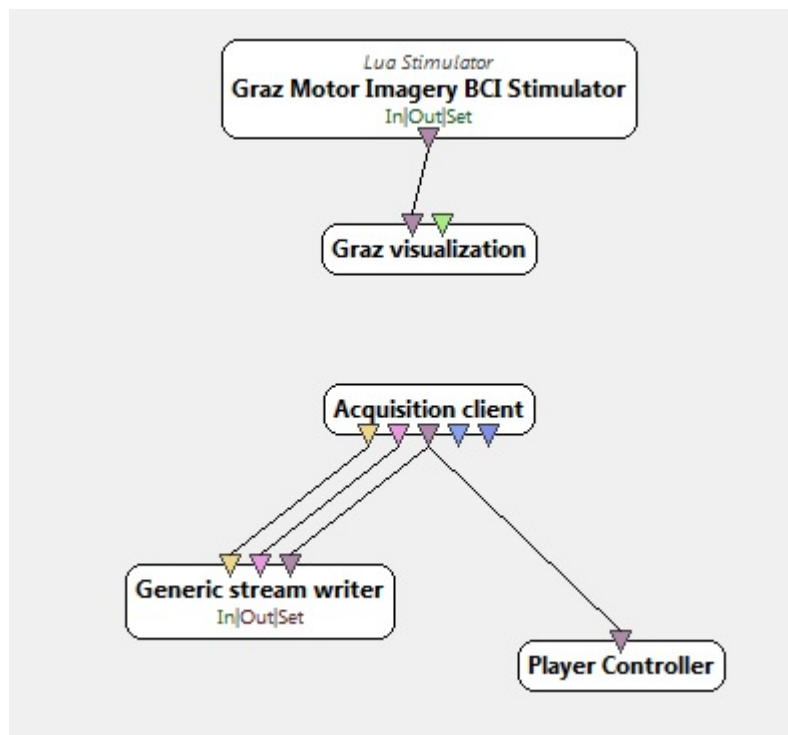


Figura 8 – É possível observar os blocos que geram as dicas para os usuários e os blocos que captam o sinal e armazenam na unidade principal do computador.(Retirada do OpenVibe)

2.6.2 Filtragem Espacial

A etapa de filtragem espacial é amplamente utilizada em ICMs baseados em imagética motora na intenção de diferenciar as classes de imaginação de movimentos (TANGERMANN et al., 2012). Esta etapa é essencial para a geração de um sinal de controle mais adequado às intenções dos usuários, isso porque uma boa filtragem simplifica de forma significativa a etapa de extração de características dos sinais de EEG. Um dos métodos para realizar esse tipo de filtragem é o método dos Padrões Espaciais Comuns ou CSP (Do inglês, *CommonSpatialPattern*), descrito na subseção 2.6.3.

Durante a execução do algoritmo é esperado que o OpenVibe execute um conjunto de operações matemáticas, descritas a seguir, na intenção de realçar as características dos sinais advindos de diferentes áreas do escalpo. Este processo é realizado através de uma transformação linear, definida pela equação 2.1, a seguir:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{W}^T \mathbf{E} \quad (2.1)$$

Onde E representa a medição de EEG para cada segmento de canais, W representa a matriz de projeção do filtro e Z a matriz dos sinais resultantes, denominados componentes, para os números de amostras t para cada canal c .

2.6.3 Padrões Espaciais Comuns - CSP

No contexto de Imagética Motora de duas classes, o CSP atua com o objetivo de maximizar a distância entre classes diferentes, e minimizar a distância entre classes semelhantes (NICOLAS-ALONSO; GOMEZ-GIL, 2012). Porém, este método pode ser afetado pela baixa resolução espacial presente nos sinais de EEG, ou seja, os eletrodos devem ser posicionados em posições específicas do escalpo do usuário. Além disso, uma quantidade maior de eletrodos pode ser necessária para que o método retorne uma resposta que represente da melhor forma os sinais de EEG do usuário, isso pode gerar um custo computacional maior sem garantias de um sinal, de fato, melhor (MENG et al., 2009). Um exemplo da utilização do algoritmo CSP programado em OV pode ser visualizado a seguir.

Ao programar um CSP em OpenVibe, é possível separar as estimulações, tarefas de imagética motora, em blocos, onde cada bloco representa um tipo de tarefa, como a imaginação da mão direita. Esses blocos recebem o sinal adquirido e fazem o recorte com base no protocolo experimental adotado. O usuário do software pode fazer as alterações com base no tempo definido na janela da Figura 7. Após esta seleção é entregue ao CSP os sinais de EEG originais e uma seleção de trechos do sinal de EEG para cada tarefa de EEG. O usuário pode definir quantos sinais de saída o CSP retorna, para maximizar, em uma classe e minimizar em outra a variância de sinal entre as duas classes. O resultado da saída do algoritmo CSP é representado através de uma matriz de projeção do filtro CSP, W , discriminativa entre as classes.

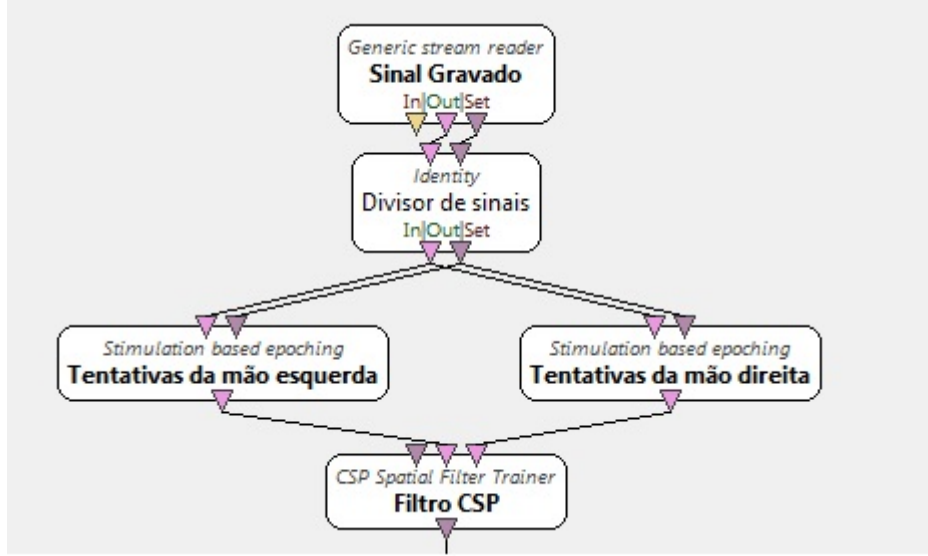


Figura 9 – Para esta cadeia de processamento, o CSP recebe os sinais referentes as tentativas da mão esquerda e direita e tenta maximizar a distância entre essas classes.(Retirada do OpenVibe)

A determinação da matriz $\mathbf{W}$ é realizada com base nas médias entre as matrizes de covariâncias dos sinais de cada classe, $\mathcal{C}_1$ e $\mathcal{C}_2$. Seja a matriz $\mathbf{C}^{(i)} = \frac{1}{q} \mathbf{X}^{(i)} \mathbf{X}^{(i)T}$, correspondente a matriz de covariância dos trechos filtrados de sinais, ou seja, $\mathbf{X}^{(i)}$. As médias entre as matrizes de covariâncias de cada segmento do sinal são dadas pela equação 2.2.

$$\mathbf{C}_a = \frac{1}{N_1} \sum_{i \in \mathcal{C}_1} \mathbf{C}^{(i)} \quad \text{e} \quad \mathbf{C}_b = \frac{1}{N_2} \sum_{i \in \mathcal{C}_2} \mathbf{C}^{(i)}, \quad (2.2)$$

em que $\mathbf{C}_1$ e N_1 são, respectivamente, a matriz de covariância e o número de exemplos correspondente a classe $\mathcal{C}_1$ e $\mathbf{C}_2$ e N_2 para a classe $\mathcal{C}_2$.

Ao representar a diferenciação de duas classes, a e b , temos que $\mathbf{C}_a$ e $\mathbf{C}_b$ representam as médias das matrizes de covariância das tentativas de cada classe. Portanto, a variância espacial é composta pela equação 2.3:

$$\mathbf{C}_c = \mathbf{C}_a + \mathbf{C}_b = \mathbf{U}_c \Lambda_c \mathbf{U}_c^T \quad (2.3)$$

Onde Λ_c é a matriz diagonal dos autovalores de $\mathbf{C}_c$ ordenados de maior para menor e $\mathbf{U}_c$ é a matriz com os autovetores correspondentes em suas colunas.

Considere a matriz de transformação $\mathbf{Q}$, definida pela equação 2.4:

$$\mathbf{Q} = \Lambda_c^{-\frac{1}{2}} \mathbf{U}_c^T \quad (2.4)$$

Logo, ao aplicar transformações em $\mathbf{C}_a$ e $\mathbf{C}_b$, é possível inferir que:

$$\Lambda_a + \Lambda_b = \mathbf{I} \quad (2.5)$$

Para visualizar essa propriedade entre as matrizes λ_a e λ_b considere as decomposições espectrais dessas matrizes:

$$\Lambda_a + \Lambda_b = \mathbf{U}_c(\Lambda_a + \Lambda_b)\mathbf{U}_c^T \quad (2.6)$$

Com isso a matriz de transformação $\mathbf{W}$ é definida como:

$$\mathbf{W} = \mathbf{U}_c^T \mathbf{Z} \quad (2.7)$$

2.6.4 Extração de características

Nesta etapa, são aplicadas um conjunto de técnicas de processamento de sinais com o objetivo de selecionar as características mais relevantes para a classificação dos sinais de EEG. Para isso, uma abordagem bastante difundida na literatura é a utilização da função logarítmica aplicada a variância das componentes do filtro CSP. Esta função é interessante pois, como mencionado anteriormente, o CSP ao mesmo tempo que maximiza a variância de uma classe, minimiza a variância da outra (SILVA, 2017).

A extração de características, que neste caso é a energia do sinal, é definida por:

$$\mathbf{f} = \log(1 + \text{diag}(\mathbf{W}\mathbf{C}\mathbf{i}\mathbf{W}^T)) \quad (2.8)$$

2.6.5 Classificação de sinais de Eletroencefalograma

Após esta etapa onde os sinais são tratados, são utilizados algoritmos de classificação dos sinais. Esta classificação tem o objetivo de traduzir com o maior grau de fidelidade a intenção do usuário em um comando.

2.6.5.1 Análise do Discriminante Linear - LDA

O algoritmo LDA (do inglês, *LinearDiscriminantAnalysis*) está entre os mais populares para a classificação de sinais de EEG em sistemas de ICM (CAMACHO; MANIAN, 2016), (FALMAS G, 2003). Segundo (BONNET; LOTTE; LÉCUYER, 2013), o LDA é simples de utilizar e fornece bons resultados para sistemas de duas classes, porém, o classificador, em problemas mais complexos, pode oferecer resultados não tão bons quando comparado com outros algoritmos, como o SVM, por exemplo. Com isso, o LDA consegue entregar bons resultados com um custo computacional baixo.

A classificação dos sinais via LDA é realizada ao se projetar o vetor de características em um espaço unidimensional, denominado de espaço de decisão ilustrado na Figura 10.

De acordo com a Figura 10, para tomar a decisão quanto a classe dos sinais, o algoritmo LDA toma como base uma operação lógica, onde para $d_i > 0$ tem-se classe A, por outro lado, para $d_i \leq 0$ tem-se a classe B. O hiperplano de separação do LDA é definido através do vetor de

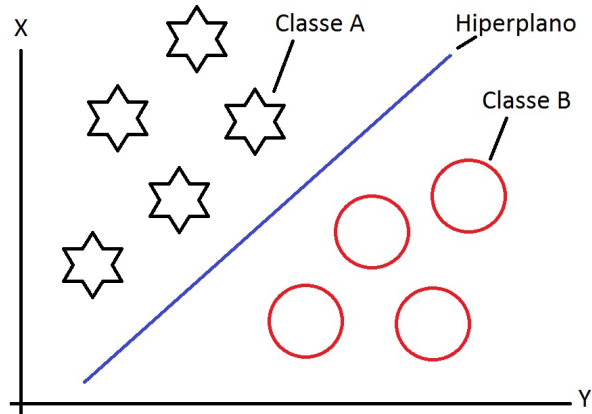


Figura 10 – Hiperplano de separação para as classes A e B. (Fonte: Autor)

características definido pelo CSP. Com isso, o vetor de pesos, p , utilizado para treinar o algoritmo LDA, pode ser encontrado através de:

$$J(p) = \frac{(p^T R_k p)}{(p^T R_l p)} \quad (2.9)$$

O treinamento de um algoritmo LDA implementado no OV pode ser visualizado na Figura 11.

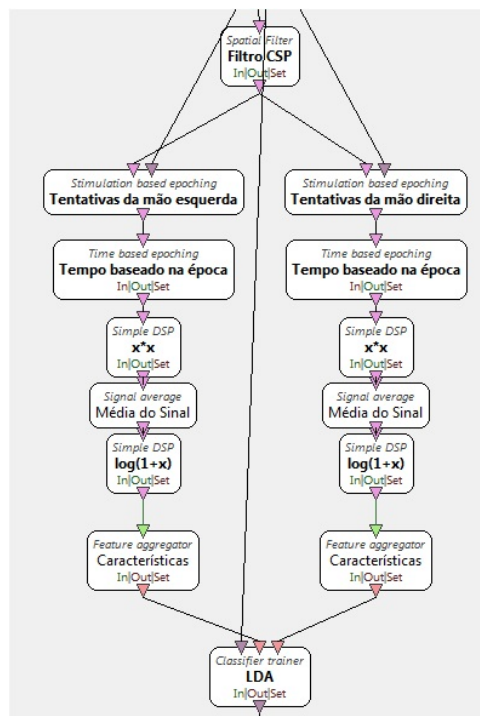


Figura 11 – O algoritmo do LDA leva em consideração as operações matemáticas para traçar o melhor hiperplano de separação. (Retirada do OpenVibe)

Após a etapa de classificação dos sinais de EEG através do LDA, torna-se possível avaliar o desempenho do sistema ou gerar um sinal de comando com base na saída obtida. Neste sentido a próxima seção demonstra como os sinais podem ser avaliados.

2.7 Análise de desempenho de Interfaces Cérebro-Máquina

Esta é a etapa onde torna-se possível avaliar o desempenho dos usuários de uma ICM e dos algoritmos aplicados ao sistema ICM. Essa avaliação traduz o quão assertivo os algoritmos estão. Com isso, é esperado que quanto maior a quantidade de acertos dos algoritmos, melhores os resultados na tradução em comandos específicos (NICOLAS-ALONSO; GOMEZ-GIL, 2012).

Em sistemas de ICM a acurácia é uma das métricas adotadas de forma convencional, e, consequentemente é a medida usual para realizar comparações. Entretanto, outras métricas são conhecidas e podem oferecer uma precisão maior para a avaliação, como a curva ROC ou ainda, a sensibilidade e a taxa de transferência em bits (BERNARDI, 2018).

Neste tipo de análise, a quantidade de acerto e erros dos algoritmos são medidas e expressas por um valor final médio. Para isso, geralmente, é construída uma matriz de confusão, que demonstra as previsões dos algoritmos. Para entender melhor, considere o seguinte exemplo:

No contexto de sistemas de ICM baseados em IM, suponha que o usuário deve realizar duas tarefas, a primeira tarefa a de imaginar o movimento da mão direita (classe A) e a segunda, imaginar o movimento do pé esquerdo (classe B). Então para determinar a matriz de confusão para este caso, os verdadeiros positivos e negativos e os falsos positivos e negativos devem ser determinados. Para isso, é necessário entender o significado de cada uma das nomenclaturas.

Os verdadeiros positivos (VP) são todas as vezes que o usuário imaginar as tarefas da classe A e o classificador prever corretamente. Caso o classificador erre na previsão, dá-se o nome de verdadeiro negativo (VN). Porém, caso o classificador, preveja a classe B de forma correta, sem a intenção inicial de se prever esta classe, os falsos positivos (FP) são contados, assim como, se o classificador prever de forma incorreta, os falsos negativos (FN) são obtidos.

Com isso, para se determinar a acurácia do sistema, a Equação 2.10 pode ser adotada:

$$Acc = \frac{VP + FN}{VP + FP + VN + FN} \quad (2.10)$$

Uma alternativa a esta forma de visualizar o desempenho dos sistemas de ICM é a utilização de gráficos. Um dos gráficos que são frequentemente adotados é o gráfico ROC, que é baseado na taxa de verdadeiros positivos e falsos positivos. Cada modelo de classificação é representado por um ponto no espaço ROC (PRATTI; BATISTA; MONARD, 2008).

Nos jogos aplicados a sistemas de ICM, a pontuação pode ser adotada como uma forma de avaliar o desempenho do jogador. Neste caso, podem ser estipulados alguns desafios ao jogador em uma quantidade específica de tempo ou não. Com isso, é intuitivo que quanto mais habilidoso for o jogador, realizando os desafios sem cometer erros, maior será a pontuação obtida. Logo, neste tipo de métrica, a avaliação fica com o foco no desempenho do usuário e não dos algoritmos. (VASILJEVIC; MIRANDA, 2022)

2.8 Jogos virtuais aplicados a ICM

No intuito de distrair ou até mesmo treinar seus usuários, os jogos virtuais cada vez mais ganham notoriedade no cenário mundial. Atualmente, existem competições transmitidas em tempo real que oferecem altas premiações para os jogadores participantes. Essa prática possui aplicações para todas as idades e está disponível em computadores, *smartphones* e dispositivos dedicados para esta finalidade, conhecidos como consoles ou videogames (MENEZES, 2017).

Um jogo eletrônico pode ser disputado individualmente (contra a máquina) ou com dois ou mais jogadores de forma presencial ou remota, o que possibilita diversas pessoas em diferentes partes do planeta a conectarem seus dispositivos e disputarem uma partida. Geralmente, os jogadores são estimulados de forma auditiva ou visual, e, precisam seguir um conjunto de regras, táticas e instruções para obter a maior quantidade de pontos possíveis. A soma desses fatores atrelada ao desempenho gráfico do jogo, como a quantidade de quadros exibidas por segundo (Conhecida popularmente por FPS, do inglês *frame per second*), definem a jogabilidade oferecida pelo jogo. Dentro desse cenário surgiram diversos gêneros, como: ação (ROYER et al., 2010), simuladores (HAUFE et al., 2011) e os de realidade virtual (LÉCUYER et al., 2008). Essa diversidade de jogos encontrada é justamente para atender vários tipos de público.

Com essa ideia, jogos são aplicados em sistemas de ICM com a intenção de, incluir digitalmente usuários com limitações físicas e para fins de entretenimento (MIRANDA, 2020). Entretanto, a aplicação de jogos a sistemas de ICM não se restringe apenas a inclusão dos usuários. Os jogos podem ser utilizados como forma de *feedback*, ou seja, para que o usuário tenha um retorno da atividade desenvolvida ou como complemento da jogabilidade tradicional, como por exemplo, ao utilizar um comando de uma ICM no jogo, novas funções são habilitadas para os usuários.

Porém, apesar de esforços atuais para a inclusão digital de pessoas com algum tipo de problema neuromotor, em uma busca rápida nas maiores distribuidoras de jogos virtuais é possível observar que grande parte dos jogos virtuais ainda são voltados para pessoas tipicamente saudáveis. Neste contexto, surgem as necessidades de adaptações nos jogos tradicionais para que possam ser disputados por usuários que possuam alguma limitação ao utilizar os controles convencionais, acionados pelas mãos.

Estudos recentes demonstram que a aplicação de jogos em sistemas de ICM torna-se interessante para manter o engajamento dos usuários na atividade. Porém, é necessário que o jogo seja, de fato, relevante para o público-alvo, com características que cativem a sua atenção. Ao utilizar jogos relevantes a qualidade do sinal obtido na etapa de treinamento pode ser melhorada (LIM; KU, 2019).

Neste sentido, uma comunidade de pesquisadores trabalha para que os jogos voltados a sistema de ICM sejam mais acessíveis, com jogabilidade e tempo de resposta mais adequados para os usuários do sistema. Com isso, surgiram jogos que exploram diversas estratégias mentais,

como P300 (KAPLAN et al., 2013), SSVEP (PARAFITA et al., 2013), Imagética Motora (BONNET; LOTTE; LÉCUYER, 2013) e jogos híbridos que utilizam duas estratégias, como realizado em (PIRES et al., 2011). Dentre as estratégias mentais que podem ser adotadas, a mais utilizada para controle de jogos no contexto de sistemas de ICM, segundo (MCFARLAND; WOLPAW, 2008), é a Imagética Motora, correspondente a aproximadamente 40% dos artigos publicados até 2013, um exemplo de jogo ICM baseado em IM pode ser visualizado na Figura 12.

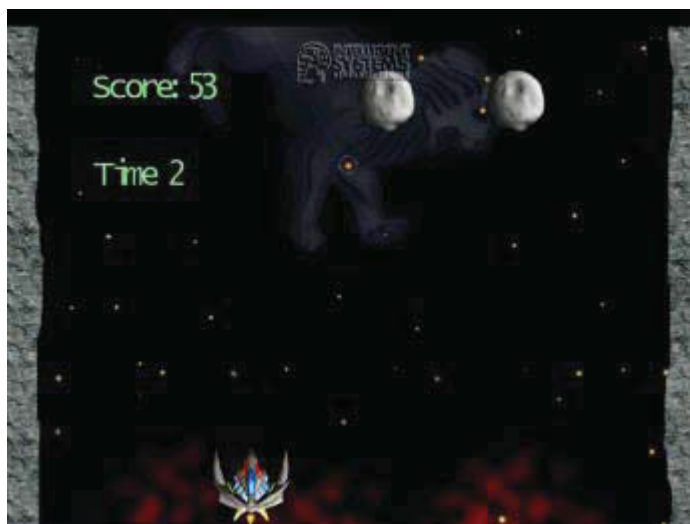


Figura 12 – Jogo ICM-IM. O score e o tempo são apresentados na tela principal do jogo. O jogo possui níveis de dificuldades. (MARSHALL et al., 2013)

Como mencionado no parágrafo anterior, entre os paradigmas utilizados para o controle dos jogos, a IM é uma das estratégias mais adotadas para este tipo de controle. Um dos motivos que levam a IM a figurar na maior parte dos trabalhos é o fato dela não necessitar de estímulos externos o que permite com que os usuários realizem tarefas em tempo real. No contexto de jogos aplicados a ICMs baseados em IM, alguns gênero são frequentemente utilizados, como o gênero de ação, que é utilizado em quase 50% dos jogos (MARSHALL et al., 2013). A vantagem na aplicação deste tipo de gênero, é o desafio proposto ao usuário, capaz de proporcionar a ele maior engajamento do usuário na atividade. Porém, neste gênero o usuário pode ser limitado pela capacidade dos algoritmos e pela própria destreza (MARSHALL et al., 2013).

Pelos fatores mencionados anteriormente, a IM oferece vantagens, como o controle em tempo real dos personagens dos jogos, porém, para que esse controle seja viável, são necessárias algumas adaptações na jogabilidade. No caso dos jogos de ação, é necessário o ajuste da velocidade com que os objetos se movimentam, uma vez que, há um atraso, mesmo que curto, na comunicação do dispositivo de aquisição e o *software* no caso o jogo. Este tempo de atraso é comumente conhecido como latência, e está presente em outros tipos de comunicação, como partidas comuns disputadas online, na qual dependem da latência da internet.

Os desafios oferecidos aos usuários também devem ser levados em consideração, uma vez

que, caso sejam muito difíceis de se atingir, podem introduzir variáveis emocionais, como a frustração, que podem interferir de forma negativa nos sinais de EEG coletados (BOS et al., 2010).

Além disso, no contexto de jogos voltados a sistema ICM, a configuração do sistema ICM em si deve ser levada em consideração. É possível observar três estratégias básicas para a montagem do sistema, uma delas é onde o sistema é considerado simples e o usuário é treinado especificamente para executar tarefas que gerem sinais cerebrais mais adequados, ou o sistema pode ser robusto onde é passado para o usuário uma carga menor de dificuldade na operação do sistema, porém, estes sistemas, geralmente, possuem um custo maior, um dos fatores é o nível de complexidade dos algoritmos. E a terceira estratégia é algoritmos com complexidade média e usuários com algum tipo de treinamento para o controle do sistema.

Ao focar apenas na etapa de aquisição para ilustrar os três tipos de ICMS, pode-se pensar que um sistema simples, por exemplo, contém apenas um canal que capta os sinais de EEG, um sistema com uma complexidade mediana pode conter 10 canais e ainda, pode-se obter o sinal de EEG via 16 ou mais canais, o que pode caracterizar uma ICM mais complexa. Porém, outros fatores podem ser levados em consideração, como os algoritmos que são utilizados na etapa de processamento dos sinais. Então, dependendo da configuração adotada o sistema pode ser ou não complexo, este fator vai depender da configuração *hardware* e do *software* adotado, e o que vai determinar o grau de complexidade da ICM, neste caso, o custo computacional. De forma intuitiva, um custo computacional baixo, significa uma ICM de baixa complexidade.

3 METODOLOGIA

Neste trabalho é proposta uma ferramenta computacional baseada em um jogo virtual na tentativa de oferecer uma alternativa ao problema de pesquisa discutido no Capítulo 1. Então, neste capítulo, são apresentados os métodos adotados para o desenvolvimento da ferramenta computacional baseada no ICM SPACE GAME, um jogo virtual voltado para ICM's

3.1 Requisitos de software

Nos testes realizados para a configuração da plataforma, verificou-se que um jogo baseado em uma interface cérebro-máquina deve atender requisitos, como: tempo de resposta dos algoritmos aos comandos dos usuários e a adaptação de controles. Para isso, a adaptação de controles é realizada com o auxílio de uma estratégia de controle mental (imagética motora). Então, como requisito básico, a imaginação do movimento deve seguir uma cadeia de processamento até ser convertida em um sinal de comando capaz de controlar o ICM Space Game. O sinal de comando resultante é definido com base na última etapa de processamento de sinais descritos na seção 2.6, a etapa de classificação. Este comando é gerado a partir de um conjunto de classificações que podem mensurar a atividade elétrica cerebral com base na imaginação de movimentos do usuário do sistema ICM.

Seguindo a premissa de que a geração de comandos para o controle do jogo só ocorre após pelo menos uma classificação da intenção do usuário os controles para o jogo devem ser adaptados com tempo compatível ao procedimento de tradução de sinais de EEG em comandos. Após o início do jogo, é gerado um *buffer* que armazena as últimas 19 classificações realizadas pela ICM, verifica a mais frequente e gera um sinal de comando. Então, este sinal de comando refere-se a algo que ocorreu nos últimos 2 segundos.

O início da rodada é marcado pela liberação do asteroide, após este início é gerado um comando que move a nave para uma direção, 1 segundo após a liberação do asteroide. Na Figura 13 é possível ter uma noção dos tempos das janelas, classificações e comandos.

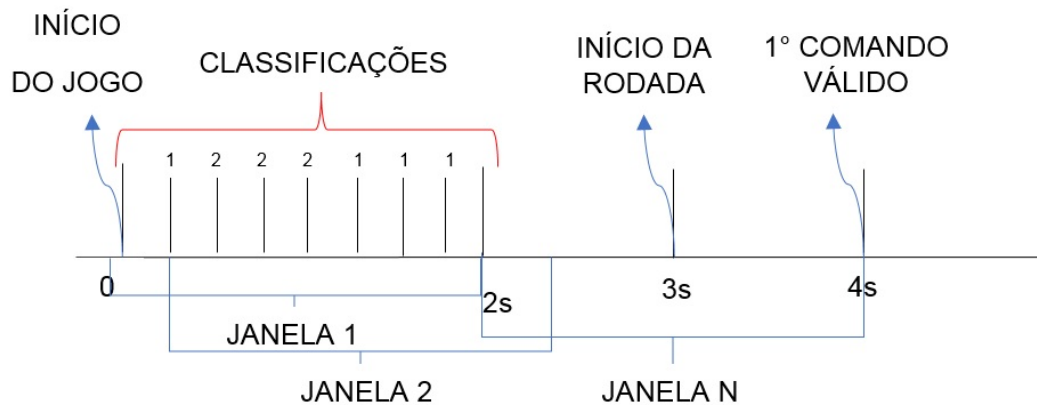


Figura 13 – Exemplificação das janelas de seleção do sinal de EEG. A janela possui uma duração de 2 segundos e são selecionadas a cada 100 ms. Esta seleção é capaz de gerar um comando para o ICM Space Game a cada 2 segundos, com base nas 20 classificações passadas. (Fonte: Autor)

Com isso, o algoritmo do ICM Space Game necessita de ajustes que o diferenciam de uma aplicação convencional, controlada por controles físicos. Além disso, para uma melhor adaptação do ICM Space Game a diferentes tipos de usuários, é desejável que os controles de velocidade dos elementos da tela, como a nave e os asteroides, sejam de fácil configuração, sem a necessidade de que o usuário tenha que realizar ajustes na programação do jogo.

Assumindo que o sistema ICM está configurado para receber os sinais de EEG coletados e a partir de então gerar uma classificação, o tempo que o sistema demora para processar os sinais deve ser adaptado ao jogo para que a comunicação entre a ICM e o ICM Space Game ocorra em tempo hábil e o usuário consiga controlar o jogo.

Em resumo, os requisitos gerais que a ferramenta computacional deve possuir são: o tempo de resposta dos algoritmos adaptados ao tipo de controle utilizado, as configurações do sistema para conectar o ICM Space Game e o software responsável pela coleta de sinais de EEG, e as configurações gerais do jogo.

3.2 Aquisição de sinais de Eletroencefalograma (EEG)

Nesta seção são apresentados os equipamentos utilizados na coleta e monitoramento de sinais de EEG. Para a coleta dos sinais de EEG é utilizada a placa Cyton, um capacete para o posicionamento dos eletrodos e uma estação de trabalho. A placa cyton e o capacete para EEG são utilizados na aquisição e monitoramento dos sinais de EEG, enquanto que a estação de trabalho é empregada na execução da ferramenta computacional.

3.2.1 Estação de trabalho

As etapas de processamento de sinais de EEG e execução do jogo virtual são realizadas em uma estação de trabalho. Essa unidade, configurada com o sistema operacional Windows 7 devido às limitações dos softwares adotados, conta com um processador Intel Core i7 de até 3.4 Ghz de velocidade no processamento de softwares e 16 Gb de memória ram para gerenciamento das tarefas executadas pelos softwares.

3.2.2 Placa Cyton

A placa *Cyton* é dedicada a aquisição de sinais de EEG. Fabricada pela empresa *OpenBCI* a placa é utilizada na coleta e no monitoramento de sinais de EEG. Através do software disponibilizado pela empresa, é capaz de realizar funções básicas, como monitoramento dos sinais de EEG, e avançadas, como o controle de dispositivos eletrônicos com comandos pré-determinados. A placa pode ser visualizada na Figura 14.

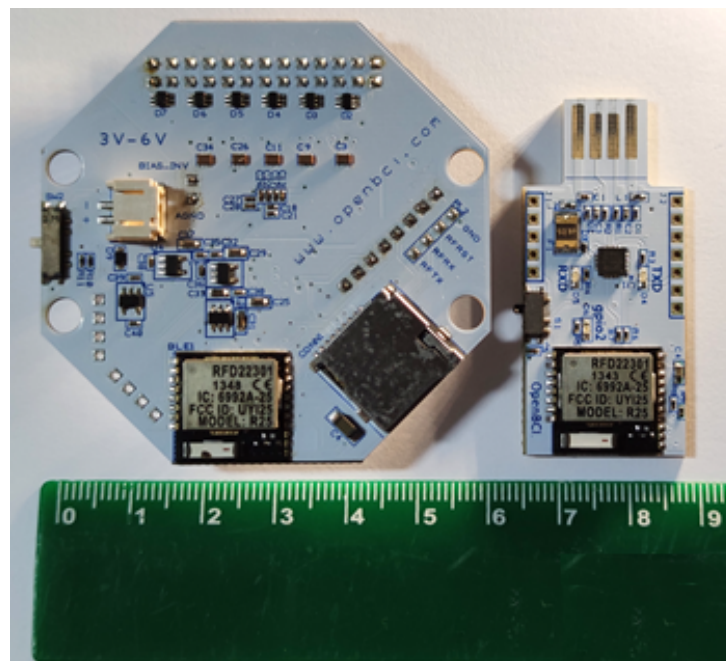


Figura 14 – Placa *Cyton*, a esquerda, utilizada na aquisição e monitoramento dos sinais de EEG e o *dongle*, a direita, responsável pela conexão entre a placa e a estação de trabalho. Abaixo uma régua em centímetros para aferir a portabilidade da *Cyton*. (Fonte: Autor)

No kit de instrumentos que acompanha a placa é possível estabelecer uma comunicação sem fio com o computador, através de um *dongle bluetooth*, capaz de coletar até 16 sinais de EEG a uma taxa de amostragem de até 250 Hz. O funcionamento da *cyton* é do tipo plug-and-play, ou seja, basta conectar a alimentação e os eletrodos, executar o software disponibilizado pela empresa e iniciar o monitoramento de sinais de EEG.

3.2.3 Configuração do capacete para EEG

Na intenção de reduzir o tempo necessário para o posicionamento dos eletrodos no escalpo dos usuários, é utilizado um capacete no qual as posições dos eletrodos são pré-definidas com base no padrão de localização 10-20, mencionado no Capítulo 2. O capacete para EEG pode ser visualizado na Figura 15.

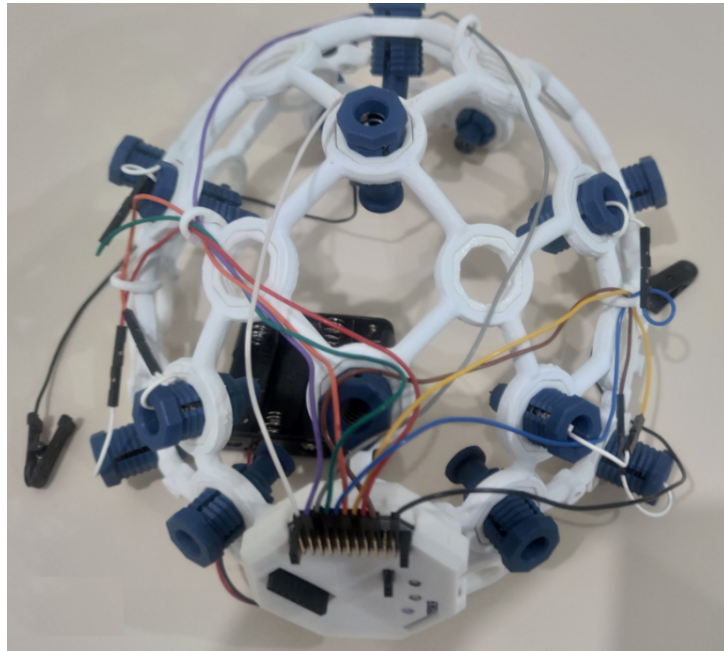


Figura 15 – Capacete para coleta de sinais de EEG com os eletrodos de aquisição e conforto posicionados. Fonte: (Autor)

O capacete tende a minimizar a perda (devida a movimentos involuntários, por exemplo) de contato entre o escalpo do usuário e os eletrodos. Os eletrodos utilizados no capacete podem ser posicionados em diversas regiões do escalpo e dispensam a utilização de gel, o que pode facilitar e agilizar a conexão.

O posicionamento dos eletrodos segue o padrão 10-20, desse modo, devido às limitações do capacete e com base nas áreas do cérebro de interesse para este estudo, são selecionados, 7 eletrodos para a coleta de sinais que são: Fc1; Fc2; C3; Cz; C4; Cp1; Cp2. Esses canais são localizados sobre a região do córtex motor, onde é esperado que as atividades elétricas de imagética motora ocorram com maior intensidade. Os canais possuem a nomenclatura com base na região e no hemisfério do cérebro em que estão localizados, por exemplo, o canal Fc1, está localizado no Córtex Frontal e no hemisfério esquerdo do cérebro. Enquanto o canal Cp2 está localizado no Córtex Parietal e no hemisfério direito. Sendo assim, as letras iniciais dos canais fazem referência a região cerebral e os números referenciam os hemisférios, par para hemisfério direito e ímpar para hemisfério esquerdo.

3.2.4 OpenBCI Gui

O OpenBci Gui é um software disponibilizado junto com a placa de aquisição de sinais, o software facilita a conexão dos eletrodos com o escalpo do usuário, ao fornecer monitoramento em tempo real do nível de conexão de cada eletrodo. O BCI Gui é capaz de executar recursos básicos de filtragem e simulações de pressionamento de teclas do teclado (para controle de dispositivo ou digitação). O software é executado logo após o posicionamento do capacete, para o ajuste fino dos eletrodos. A interface do software pode ser visualizada na Figura 16



Figura 16 – Tela capturada do software utilizado no posicionamento do capacete para coleta de sinais de EEG. (Retirada do OpenBCI)

3.2.5 OpenVibe

Como mencionado no capítulo 2, o ambiente do OpenVibe foi projetado para o desenvolvimento de uma Interface Cérebro Máquina. O OV possui em seu banco de dados, diversas configurações de cenários pré-definidas para a execução da etapas de uma ICM, necessitando ajustes para cada tipo de experimento.

Neste trabalho, o OV é programado para aquistar, processar e enviar os sinais de EEG ao ICM Space Game, através de um driver de comunicação escrito em python. Os cenários para a aquisição de sinais de EEG (processamento de sinais) e a etapa de validação de dados (replay) executados em OV, são descritos a seguir.

3.2.5.1 Cenário de aquisição de sinais

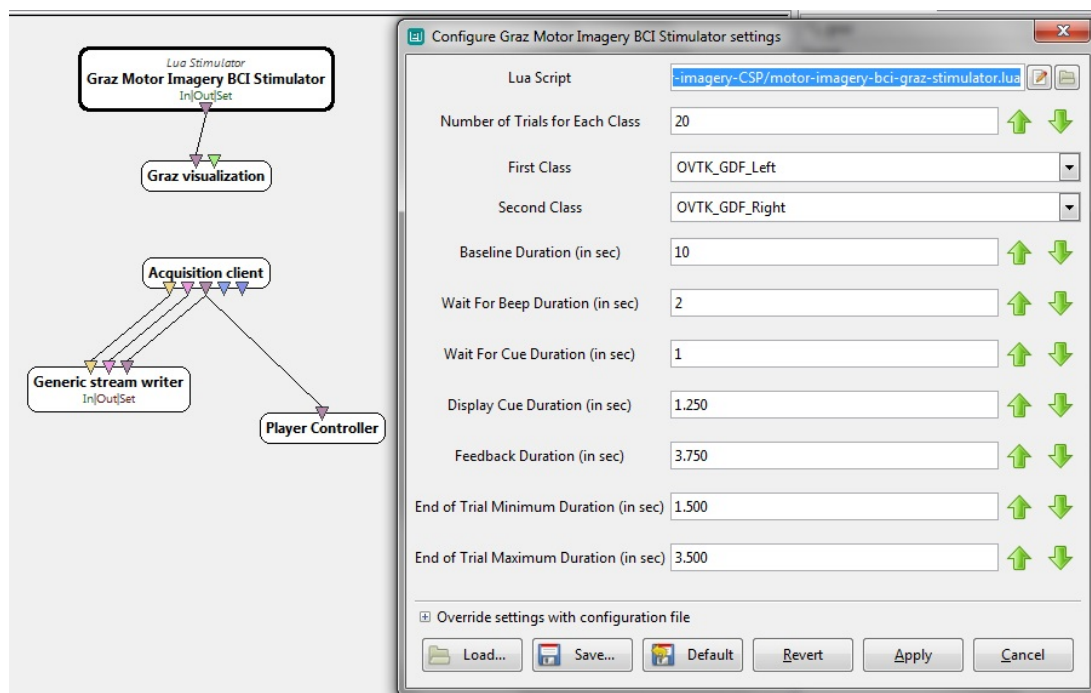
Este é o início do Sistema ICM em termos de software, após a implementação deste cenário é possível criar um banco de dados com os sinais de EEG coletados. Neste cenário são ajustados 3

parâmetros no software, o primeiro ajuste necessário é no tempo em que cada etapa do protocolo convencional é realizada e a quantidade de vezes que o usuário deverá realizar a imagética. Este ajuste serve para rotular o sinal de EEG. Estes rótulos são utilizados para a associação do sinal de EEG com cada etapa do protocolo, com isso, torna-se possível analisar o sinal de EEG no momento em que o usuário realiza a imaginação de movimentos de uma classe, por exemplo. O segundo ajuste disponível neste cenário é a quantidade de tarefas que o usuário deverá executar, também configurada antes do início do experimento. Por fim, são ajustados os parâmetros de salvamento do banco de dados, como nome e localização.

Para este trabalho, são propostas 40 tarefas de imaginação de movimentos, 20 imagéticas da mão direita e 20 imagéticas da mão esquerda, executadas em 3.75 segundos ou 3750 milissegundos cada.

As configurações de tempo e quantidade de tentativas das etapas do protocolo convencional podem ser visualizadas nas Figura 17

Figura 17 – Tela de ajustes iniciais para coleta de dados de EEG



A esquerda o cenário configurado para aquisição de sinais de EEG. A direita os ajustes que podem ser feitos na aquisição de sinais, como o tempo até o experimento iniciar (10s), exibição da dica (1,25s) e execução da tarefa(3,75s) (Retirada do OpenVibe)

3.2.5.2 Cenário para o treinamento dos algoritmos CSP e LDA

Na segunda etapa da execução de uma ICM em OV, o cenário é ajustado para a implementação de algoritmos de filtragem temporal, para remoção de sinais indesejáveis e do treinamento dos algoritmos CSP e LDA, responsáveis pela classificação de sinais coletados. Nesta etapa o banco de dados é carregado de forma offline, ou seja, independentemente de qualquer tarefa executada

pelo usuário. Basicamente, no cenário de treinamento do CSP, o algoritmo lê o banco de dados, seleciona os sinais presentes nos canais Fc1; Fc2; C3; Cz; C4; Cp1; Cp2, passa-os por um banco de filtro composto por 10 filtros de 4 Hz em uma faixa de frequência de 8 a 30 Hz, faz um recorte no sinal por uma janela de 2 segundos e utiliza para treinar o CSP para reconhecer a imaginação de movimentos da mão direita e da mão esquerda. Com isso, as janelas treinadas no CSP são utilizadas para treinar o algoritmo LDA. Para o cenário de treinamento do LDA, o CSP é carregado e o sistema calcula a energia através do log na base 10 da média do quadrado do sinal. Esta configuração é salva e utiliza nos cenários offline e online. Uma visão geral destes cenários e da configuração adotada em cada um é apresentada nas Figuras abaixo.

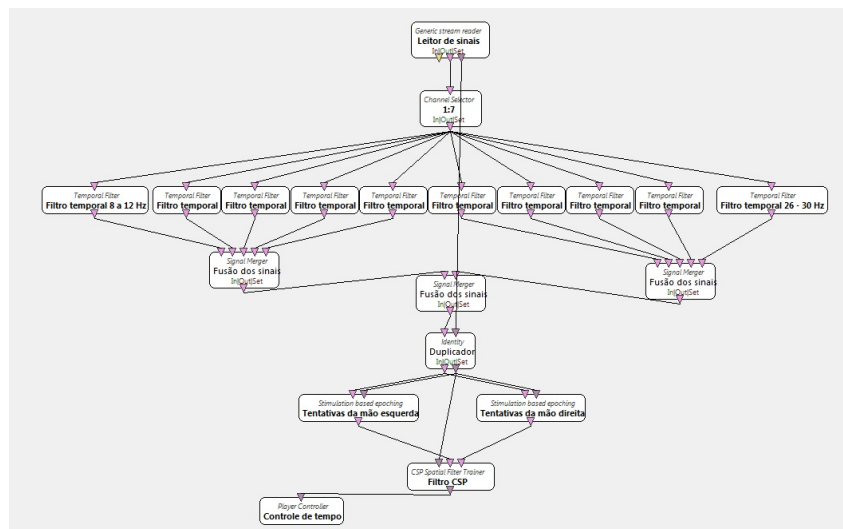


Figura 18 – Programação do cenário de treinamento do CSP. Destaque para a implementação de banco de filtros com detalhe para o primeiro filtro de 8 a 12 Hz, o segundo de 10 a 14 Hz e o último de 26 a 30Hz (Retirada do OpenVibe)

3.2.5.3 Cenário para validação de dados (Replay)

Este cenário, executado de forma offline, é utilizado para carregar os algoritmos treinados e reproduzir o banco de dados, gerado pelos voluntários, na intenção de verificar a taxa de acerto do sistema na classificação de sinais de EEG. Nesta etapa os voluntários não participam, apenas os sinais coletados previamente são utilizados para a aferição da acurácia.

3.2.5.4 Cenário em tempo real

No cenário em tempo real, online, o voluntário fica livre para a imaginação de movimentos, cabe ao sistema identificar e retornar um comando para o ICM Space Game que represente a intenção do voluntário. É indicado ao usuário que tente realizar imaginações dos movimentos semelhantes as imaginadas no ajuste dos algoritmos. Este cenário pode ser gravado para utilização de forma offline.

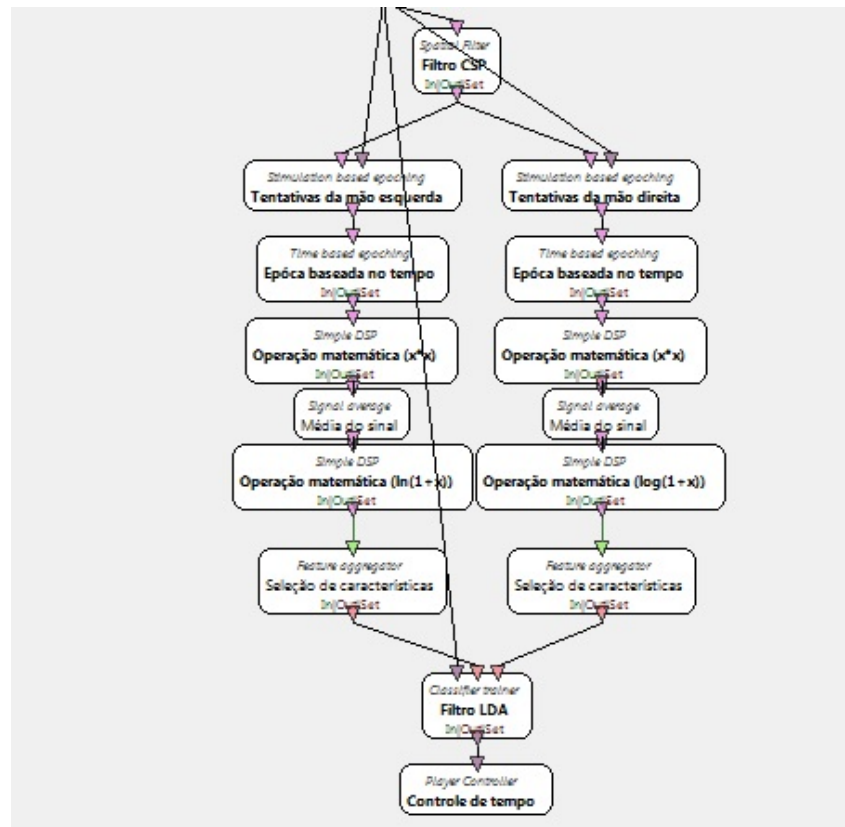


Figura 19 – Etapa para o treinamento do LDA, acima do bloco CSP, se repete como a figura anterior (Retirada do OpenVibe)

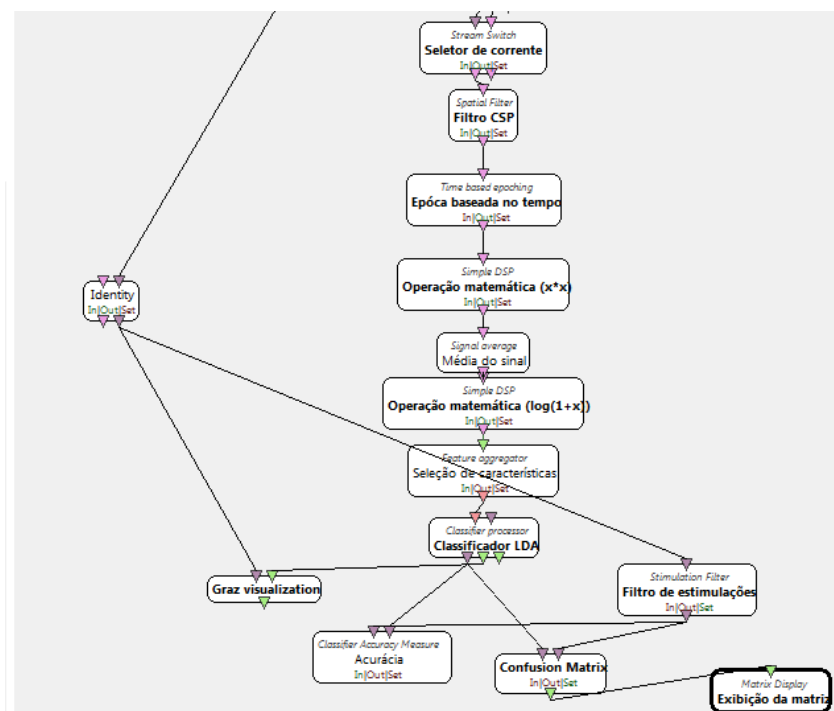


Figura 20 – Etapa de processamento da exibição da matriz de acurácia. (Retirada do OpenVibe)

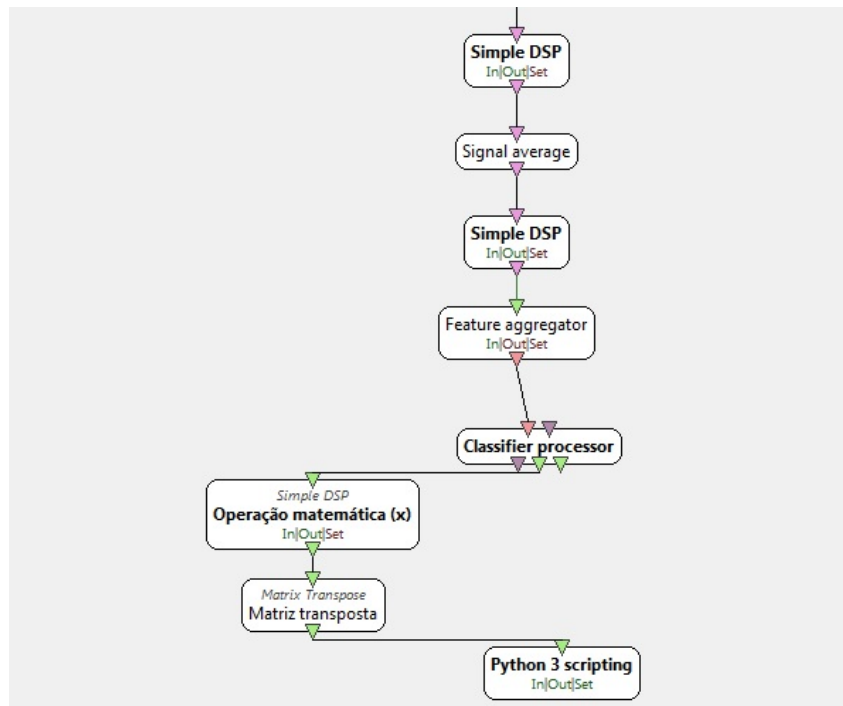


Figura 21 – Detalhe da Box "Python Scripting" onde o módulo de controle do jogo é executado, em python. (Retirada do OpenVibe)

3.3 ICM Space Game

3.3.1 Princípios do ICM Space Game

O jogo explorado neste trabalho é do gênero de ação. Inicialmente, oferece até dois movimentos (duas classes de IM) ao usuário. Baseado em algoritmos de baixa complexidade, na tentativa de diminuir problemas de processamento e comunicação, o jogo virtual possui apenas um nível, porém, a dificuldade deste nível pode ser ajustada previamente, no menu principal do jogo. Neste caso, o ajuste da dificuldade é referente a velocidade com que os obstáculos se movimentam na tela. Ao final da partida, as estatísticas do usuário ao utilizar o jogo são apresentadas.

De forma intuitiva, os usuários devem controlar uma nave espacial com a imaginação dos movimentos da mão direita ou da mão esquerda. Cada tipo de imaginação gera um comando diferente, como exemplo: caso o usuário imagine o movimento da mão direita, a nave deve se locomover para a direita. Os obstáculos, asteroides, aparecem na tela de forma aleatória no eixo x e suave no eixo y, sempre com movimento de cima para baixo da tela, a pontuação do jogador é obtida através da quantidade de asteroides que o jogador é capaz de desviar. Os asteroides aparecem em um número baseado na quantidade de tempo especificada nas configurações do jogo, por exemplo, para um minuto, o usuário deve desviar de aproximadamente 4 asteroides, valor que pode ser elevado com base no tempo determinado para o jogo.

3.3.2 Módulos do jogo

A arquitetura do jogo é composta por três módulos: a ICM (projetada em OpenVibe), o módulo de controle projetado em python e executado no OV e o módulo visual programado em python (tela do jogo). A ICM é responsável por identificar e traduzir os sinais de EEG em comandos. O módulo de controle é responsável pela comunicação de dados entre o sistema ICM e o módulo visual. O módulo visual é responsável pela interação entre o usuário e o sistema ICM. A operação do módulo de controle e do sistema ICM é restrita aos técnicos que conduzem o experimento, e o módulo visual é controlado pelos usuários (jogadores).

O módulo de controle é responsável por ler a saída binária do classificador do sistema ICM e transformar em comandos que movimentam a nave para a esquerda ou para a direita. Este módulo concatena 20 classificações advindas do sistema ICM, elimina a primeira classificação e retorna a classificação mais frequente dentre as 19 classificações restantes. Após isso, torna-se possível gerar um sinal de comando a cada 2 segundos. Esta estratégia é utilizada para evitar o excesso de comandos e para conseguir realizar um link entre a intenção do usuário e o sistema ICM.

O módulo visual, recebe os comandos do módulo de controle e retorna ao usuário se a tarefa de ICM executada está condizente com os comandos exigidos no jogo. Logo, para que o jogador seja, de fato, capaz de controlar a nave, é necessário seguir a cadeia de processamento descrita na Figura 22. É válido ressaltar que os módulos são iniciados de forma automática, ao executar o sistema ICM.

3.3.3 Aspectos do ICM Space Game

O jogo é desenvolvido de forma que o usuário possa realizar duas ações que são associadas à imaginação de movimentos da mão direita e da esquerda. Por isso, no desenvolvimento dos elementos da tela, as ações dos usuários são limitadas para que seja possível ensinar ao usuário como gerar os padrões cerebrais referentes a cada ação do jogo. Ou seja, se o jogo indica que o usuário deve desviar do asteroide deslocando a nave para a direita, caso o usuário colida a nave com o asteroide, sofrerá uma punição na pontuação final da partida.

A missão do usuário é desviar do maior número de asteroides possíveis em um tempo pré-estabelecido. E a missão do técnico responsável pelo experimento além de configurar e preparar o experimento é auxiliar o jogador na prática das tarefas mentais de forma condizente com as tarefas executadas no treinamento. Leva-se em consideração a tarefa mental executada pelo usuário, ou seja, por mais que o jogador não consiga desviar do asteroide completamente, se ele realizar as tarefas pré-configuradas, o sistema vai identificar e considerar no cálculo de acurácia do sistema ICM.

A quantidade e velocidade dos asteroides pode ser configurada na tela inicial do jogo, assim, é possível alterar os níveis de dificuldades do jogo para diferentes usuários. É esperado que a

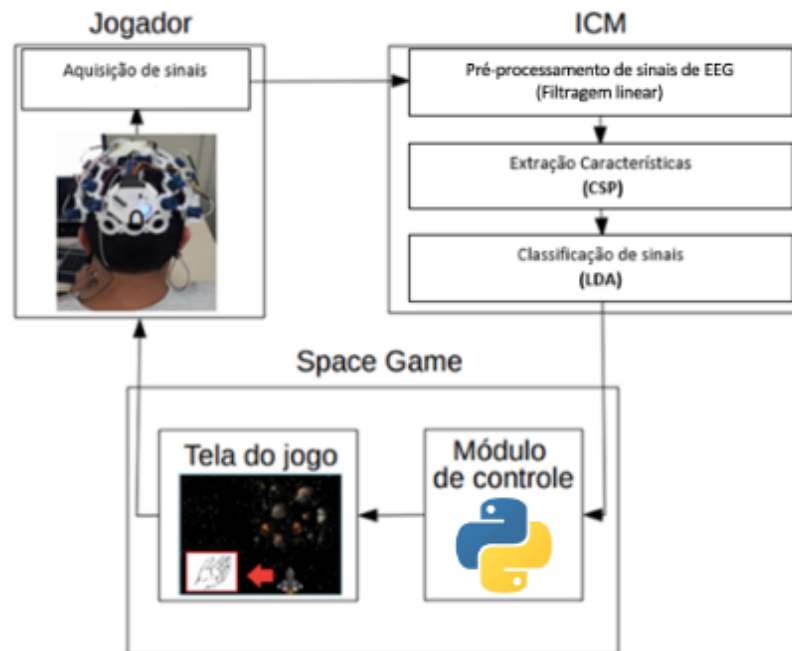


Figura 22 – Apresentação do fluxograma de execução do ICM Space Game, válido ressaltar que a única forma de comunicação entre o jogador e o módulo de controle se dá quando o jogador observa a tela do Space Game e envia os comandos, mentalmente, através do sistema ICM. Então, de modo simples, o jogador deve observar a tela do jogo e realizar tarefas de imagética motora (lidas pelo sistema ICM e enviadas ao módulo de controle) de forma com que consiga vencer a partida. (Fonte: Autor)

cada partida o jogador consiga desenvolver padrões cerebrais mais adequados para o controle do sistema ICM. A tela inicial do jogo é apresentada na Figura 23



Figura 23 – Destaque para as configurações que o técnico responsável pode fazer antes do usuário iniciar o jogo. A tela do jogo é representada pelo retângulo azul. (Fonte: Autor)

No intuito de facilitar a jogabilidade, todas as vezes que a nave colide com o asteroide,

os comandos são desabilitados e a nave é reiniciada na posição inicial do jogo. A Figura 24 representa o momento da colisão da nave com um asteroide.

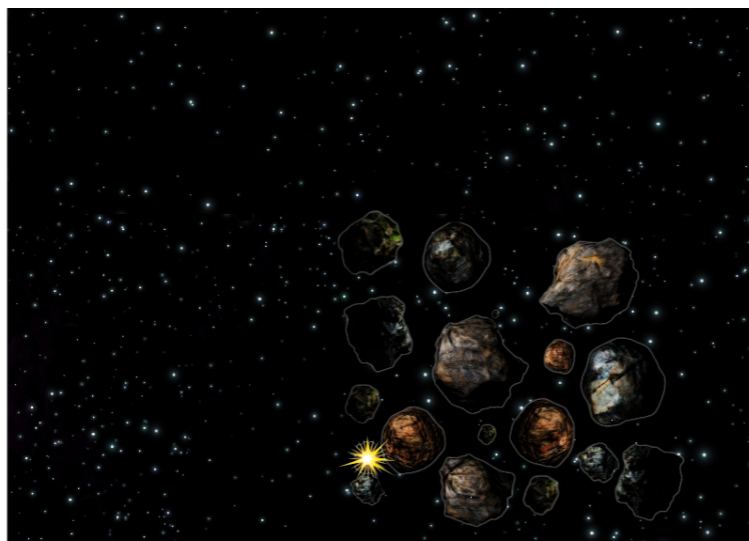


Figura 24 – Ao colidir com um obstáculo a nave retorna à posição inicial com efeito visual de explosão e com os comandos desabilitados até o surgimento de novos asteroides, este tempo pode ser utilizado como descanso aos usuários até uma nova tentativa. (Fonte: Autor)

O jogo é composto pelos elementos seguintes:

A tela - A tela do jogo é composta por 3 subtelas: a tela de início, a tela principal, e a tela de relatórios. Na tela de início, o usuário tem acesso ao menu principal do jogo, nesta tela é possível iniciar a partida ou realizar pequenas configurações no ajuste dos componentes (asteroide, tempo, nave). A tela principal é onde o usuário deve cumprir as missões do jogo para obter as pontuações. E na tela de relatórios, são apresentadas as estatísticas dos usuário no ICM Space Game. O usuário pode reiniciar uma partida através do botão de reinício, presente na tela de relatórios. O ICM Space Game é configurado para uma resolução SVGA de 800x600 pixels considerando as bordas do jogo que incluem os comandos de fechamento e minimização da tela.

A nave - A nave possui um tamanho de 142x137 pixels e pode se locomover tanto para a direita quanto para a esquerda, mantendo a velocidade constante de 9 pixels durante as movimentações, essa velocidade pode ser alterada e assumir valores de 1 a 300 pixels. O ponto central da nave inicia sempre na faixa inferior da tela de forma com que a nave fique centralizada horizontalmente. Essa localização é de aproximadamente 346 pixels no eixo X e próximo ao fim da tela no eixo Y a 450 pixels. A faixa de localização disponível para o início da nave pode ser visualizada na Figura 25.

Após a tela de configurações, o técnico responsável não tem mais contato com o usuário e a partir deste momento a tela principal é iniciada, onde o usuário deve realizar as imaginações de movimentos para desviar a nave dos asteroides. Para possibilitar uma percepção visual ao usuário, a nave inclina para a direção em que o sistema ICM entende que o usuário gostaria

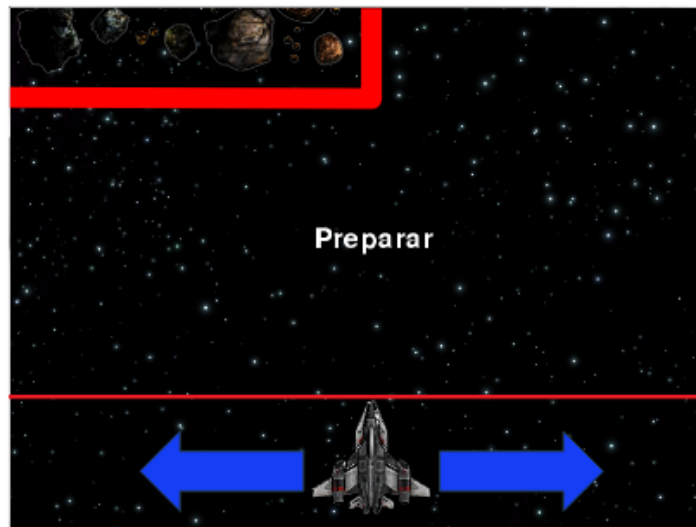


Figura 25 – Faixa disponível para o posicionamento de naves no jogo, dentro desta faixa a nave pode ser posicionada em posição livre no eixo X, respeitando os limites da tela do jogo, e nas posições abaixo da linha vermelha no eixo Y. As setas em azul indicam a movimentação disponível para a nave, após o tempo de preparo. Em vermelho os asteroides. (Fonte: Autor)

de movimentá-la. As três posições: sem movimento, movimento imaginado para a esquerda e movimento imaginado para a direita, disponíveis no jogo podem ser visualizadas na Figura 26.

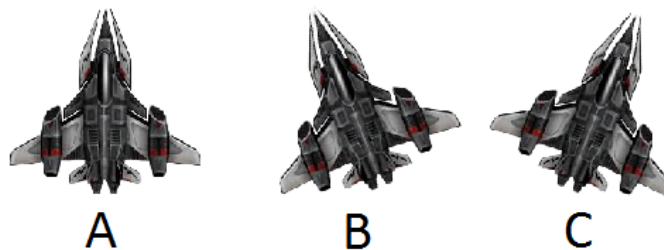


Figura 26 – A é a representação da nave ao sistema identificar que o usuário não executa tarefas de IM. B e C, ocorrem quando o usuário imagina o movimento da mão esquerda e direita, respectivamente. (Fonte: Autor)

Os asteroides - Por sua vez, os asteroides são projetados para induzir o usuário a realizar a tarefa mental desejada, ou seja, na teoria não há como o usuário desviar do asteroide ao realizar uma tarefa mental diferente da solicitada pelo jogo. Por isso, a tela é dividida em duas zonas, onde os asteroides aparecem de forma aleatória na zona da esquerda ou da direita. A velocidade do asteroide pode ser configurada ao acessar a tela inicial do jogo. Por padrão, o ICM Space Game é configurado para que o asteroide tenha uma velocidade constante de 5 pixels por segundo. Os asteroides só aparecem na tela, no momento em que o asteroide anterior desaparece completamente, com exceção do primeiro. Para o primeiro asteroide o usuário tem um tempo de preparo de aproximadamente 3 segundos, e após este tempo, o usuário deve realizar as tarefas de imagética motora por 5 segundos. Com apenas um movimento correto, o usuário é capaz de

desviar a nave do asteroide, no entanto, deve manter a concentração para que a nave não colida até o fim da rodada

Outros efeitos - Além dos elementos principais, nave e asteroide, ainda é possível observar que o fundo da tela, apesar de não interferir na pontuação do jogo, é dinâmico com o objetivo de tornar o jogo intuitivo. Os efeitos sonoros são restritos para não interferir na concentração dos usuários, podendo ser ativados para testes.

3.4 Procedimentos experimentais

Esta seção relata as etapas de execução do experimento com o ICM Space Game. Para iniciar o experimento é necessário seguir o roteiro de instruções disponível de forma impressa no laboratório e apresentado no Anexo B deste documento.

O experimento é dividido em duas etapas. Na primeira etapa de experimentos, é utilizado o protocolo convencional para o treinamento dos algoritmos de inteligência artificial. Na segunda etapa é realizado o treinamento dos usuários, nesta etapa o protocolo convencional e o ICM Space Game são utilizados. Ao todo, os usuários participam de 6 sessões de coleta de sinais. Uma sessão para o treinamento dos algoritmos, realizada em OV. Três sessões para o treinamento dos usuários, em OV e no ICM Space Game. Uma sessão em OV para avaliação dos usuários. E a sexta e última sessão é apenas para os usuários do protocolo convencional, nesta sessão é utilizado o ICM Space Game, para conhecimento.

A metodologia sofreu alterações em seu desenvolvimento devido a pandemia do COVID-19. No total, foram coletados sinais de EEG de 12 usuários, no período entre maio de 2021 e junho de 2022, resultando em um total de 19 coletas. Os 12 usuários do sistema possuem faixa etária entre 23 e 30 anos na data das coletas, aproximadamente 83% são do gênero masculino e 75% possuem experiências com jogar virtuais. Este número é ainda menor, quando analisada a experiência com uma ICM, onde apenas 33% dos usuários possuem conhecimentos básicos sobre a área de estudo. Ao final foi gerado um banco de dados com 50 coletas de sinais de EEG.

Após análise dos sinais, verificou-se que 4 usuários tiveram suas coletas comprometidas, hora por quantidade de repetições do experimento, hora pela baixa confiabilidade na qualidade do sinal de EEG captado. Com isso, foram utilizados dados de 8 usuários, onde: 4 usuários treinaram o controle de uma ICM com o auxílio do protocolo convencional enquanto os outros 4, executaram o ICM Space Game. Ao final do primeiro momento, os usuários invertem as estratégias a fim de avaliar a satisfação do usuário ao adotar um método para realizar o treinamento.

Como exemplo, um usuário que realizou o treinamento seguindo o protocolo convencional por um total de 5 vezes, utiliza o ICM Space Game para ter uma noção de como o treinamento pode ser executado, como pode ser visualizado na Figura 27.

As avaliações, de desempenho e satisfação, são realizadas em duas fases. A primeira fase

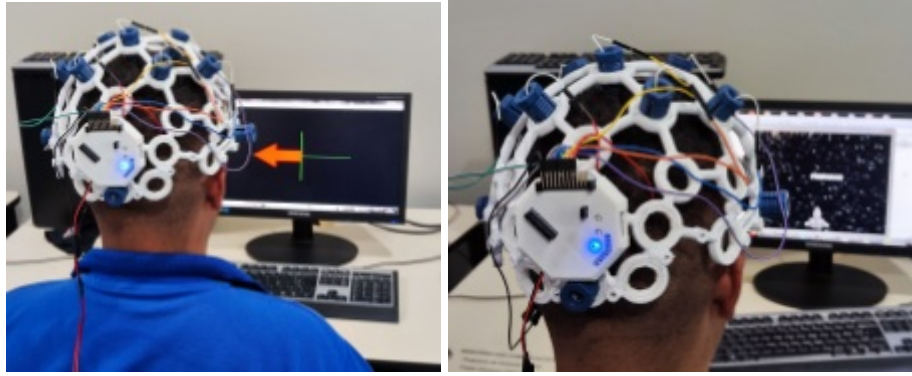


Figura 27 – Comparativo de métodos, a esquerda um usuário ao utilizar o protocolo convencional e a direita um usuário ao utilizar o ICM Space Game. (Fonte: Autor)

de avaliação é realizada após a primeira sessão de treinamento dos usuários. E a segunda, onde é avaliada a satisfação após o segundo treinamento dos usuários. Uma visão geral das etapas abordadas neste capítulo é ilustrada na Figura 28

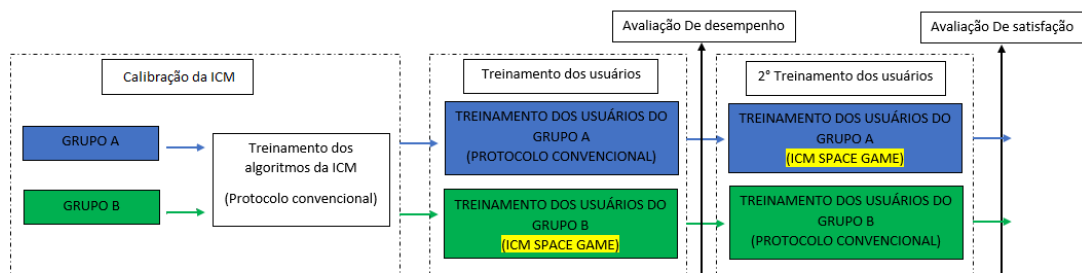


Figura 28 – Ilustração das etapas dos processos para os dois grupos de usuários (A e B). No grupo A a cadeia de processamento é representada pela seta azul. As setas em preto representam as etapas comuns a ambos os usuários. (Fonte: Autor)

3.4.1 Seleção de usuários

Esta pesquisa conta com sinais de EEG de 8 usuários voluntários com faixa etária de 23 a 30 anos. Os 4 primeiro usuários participam do treinamento utilizando o protocolo convencional e os 4 últimos participam utilizando o ICM Space Game. Após a seleção dos usuários, é aplicado um questionário inicial, que pode ser visualizado no Anexo A, para o conhecimento das características físicas e psicológicas dos usuários.

3.4.2 Coleta de sinais de EEG

Para início do experimento, o voluntário é posicionado de forma confortável em uma cadeira de frente para um monitor de computador onde são exibidas algumas instruções, como evitar a movimentação de membros do corpo, sobre as atividades desenvolvidas. Enquanto o voluntário realiza a leitura dos procedimentos, o técnico responsável pelo experimento posiciona o capacete para aquisição dos sinais de EEG. No momento do posicionamento o voluntário é questionado e

alertado para que caso ocorra algum incômodo no manuseio do capacete, o técnico seja avisado de imediato. Como já mencionado, o setup do capacete conta com 7 eletrodos para a aquisição de sinais e 2 plugs para o auxílio no posicionamento, denominados plugs de conforto. Após o posicionamento do capacete, o técnico realiza um teste de conexão entre os eletrodos, a placa cyton e o computador.

No teste, são analisados se os 7 eletrodos estão em contato com o couro cabeludo do voluntário, caso o técnico verifique algum problema de conexão, o capacete é ajustado novamente. Caso contrário, o técnico explica as instruções apresentadas previamente e oferece um tempo para que o usuário sane todas as suas dúvidas a respeito do experimento. Vencida esta fase, a etapa de ajuste de algoritmos é iniciada. O experimento tem duração aproximada de uma hora e 40 minutos, sendo: 30 minutos para o posicionamento do capacete e verificação de conexão; aproximadamente 50 minutos para a realização de 5 coletas de sinais de EEG e 20 minutos utilizados entre as coletas, para conferência de conexão e descanso do usuário.

Os bancos de dados gerados são etiquetados com base no número do usuário e coleta (como exemplo, U1C2: segunda coleta do primeiro usuário) de forma com que preserve o anonimato dos usuários. Esses dados são armazenados para processamento posterior ao experimento.

3.4.2.1 Treinamento dos algoritmos da ICM

Na execução da primeira sessão de coleta de sinais o objetivo principal é ajustar os algoritmos projetados para a ICM. Esta sessão é executada na linguagem OV, onde o protocolo convencional para a aquisição de sinais, comumente utilizado na literatura e descrito na Seção 2.3.1, é reproduzido por um tempo aproximado de 8 minutos. Nesta etapa, comum a todos os usuários, são aquiridos 7 sinais de EEG a uma frequência de 250 Hz. Os 7 eletrodos são posicionados sobre a região do córtex motor, onde se espera que os fenômenos da imagética motora se manifestam com maior intensidade. A distribuição dos eletrodos se dá, como segue: 2 eletrodos posicionados sobre o córtex frontal (FC1 e FC2), 2 eletrodos posicionados sobre córtex parietal (CP1 e CP2) e 3 eletrodos posicionados sobre o córtex central (C3, Cz e C4), mais 2 eletrodos de referência posicionados nos lóbulos das orelhas esquerda e direita.

Para que o ajuste dos algoritmos seja realizado, os usuários são instruídos a seguir o protocolo de aquisição de sinais. O protocolo conta com etapas pré-definidas, onde o usuário deve reproduzir mentalmente as tarefas de imaginação de movimento da mão esquerda ou direita. Os usuários executam a imaginação dos movimentos por 40 vezes, sendo 20 para imagética motora da classe 1 (mão esquerda) e 20 para imagética motora da classe 2 (mão direita).

Após a realização das 40 tarefas de IM, os sinais processados em OV passam por uma filtragem temporal linear composta por um banco de filtros com sub bandas de 4 Hz configurada para fazer uma varredura na faixa de frequência que inicia em 8 e termina em 30 Hz. Após a filtragem temporal, os sinais são entregues ao algoritmo extrator de características, CSP, e por fim, classificados por um algoritmo LDA. Após este ciclo de processamento, é esperado que o

sistema seja capaz de reconhecer as intenções dos usuários e as transforme em comandos que podem possibilitar o controle de dispositivos. O desempenho dos usuários do sistema é baseado na acurácia, que faz uma relação entre a taxa de acertos e o total de tentativas.

Na próxima sessão são discutidos os procedimentos que cada sub-grupo executa ao utilizar o protocolo convencional e o ICM Space Game.

3.4.3 Treinamento dos grupos de usuários

Nesta fase, os grupos são divididos em dois sub-grupos (*A* e *B*) para realizar a comparação entre o protocolo convencional e o ICM Space Game. Os usuários do grupo *A* utilizam apenas o protocolo convencional para o treinamento de suas habilidades no controle de uma ICM, enquanto os usuários do grupo *B* utilizam o ICM Space Game. Para fins de validade do estudo, os usuários não têm o direito a repetição de nenhuma das etapas programadas.

Na primeira sessão de coleta, os dados coletados são utilizados para o treinamento dos algoritmos da ICM. Esta etapa é comum aos 8 usuários, independente de utilização do ICM Space Game ou protocolo convencional. Após esta calibração de algoritmos, os usuários são submetidos a 3 sessões de coletas de sinais de EEG para treinar suas habilidades no controle de uma ICM. Após finalizadas, é realizada a quinta e última coleta de dados, também comum aos 8 usuários, para fins de comparação de desempenho do grupo. A evolução individual dos usuários é analisada, assim como as médias por usuário e gerais, com isso torna-se possível realizar um comparativo com os usuários constituintes do grupo *B*.

3.4.4 Análise de desempenho

O protocolo convencional é adotado pelos 8 usuários para realizar a quinta coleta de dados, o que torna possível realizar análises sobre o desempenho dos usuários. Após o término do experimento é aplicado um questionário onde pode ser avaliada e comparada a satisfação dos usuários ao utilizar o ICM Space Game e o protocolo convencional.

3.4.4.1 Acurácia

Para a medição da acurácia é levada em consideração a discussão levantada na Sessão 2.7, onde é realizada uma combinação entre a taxa total de tentativas pela quantidade de erros e acertos que cada usuário obtém. Dessa forma, torna-se possível avaliar a influência da exposição dos usuários ao ICM Space Game e ao protocolo convencional abordado.

3.4.4.2 Pesquisa de satisfação

Após a medição da acurácia, o estudo entra na fase de avaliação pessoal de cada usuário. No segundo momento do terceiro bloco da Figura 28 as etapas descritas na subseção 3.4.3 são repetidas, porém, os usuários que utilizaram o ICM Space Game repetem os procedimentos utilizando

o protocolo convencional, enquanto os usuários que utilizaram o protocolo convencional passam a utilizar o ICM Space Game. Para manter o entendimento os usuários continuam divididos em grupos *A* e *B*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido uma plataforma computacional baseada em um jogo virtual com o objetivo de propor uma alternativa aos protocolos convencionais adotados para coleta de sinais de EEG. Para validação da plataforma, foram realizados testes comparativos entre usuários que utilizam o ICM Space Game e usuários que utilizam um protocolo de aquisição de sinais de EEG referenciado na literatura. A principal contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento do ICM Space Game de forma operacional.

4.1 O jogo

O jogo é implementado e executado fora do ambiente onde a ICM é executada, com isso, o tempo de processamento dos algoritmos e o tempo de resposta dos usuários foram ajustados para a ICM. Estes ajustes foram implementados na plataforma, como segue:

O primeiro ajuste definido e realizado é com base no tempo e na quantidade de classificações dos algoritmos do sistema ICM. Para isso, foram levados em consideração, o tempo de uma rodada do ICM Space Game. Como o objetivo é obter 3 movimentos por rodada, são geradas 20 classificações que geram 1 comando para o jogo a cada 2 segundos. Caso ocorra a geração de um sinal de comando antes do início da rodada ou logo após o fim da rodada, este comando não é levado em consideração.

Este tempo de 2 segundos por comando foi definido com base em testes práticos do ICM Space Game, para que o tempo de resposta dos usuários seja suficiente para o controle da aeronave no tempo da rodada.

4.2 Pré-experimento

Nas primeiras sessões de coleta ocorreram problemas na sincronização do game com o sistema ICM. Basicamente, foi identificado um atraso de comunicação entre o driver de comunicação e o ICM Space Game que comprometia a experiência do usuário e a posterior análise dos resultados. Após esta observação o protocolo de comunicação adotado, LSL, do OpenVibe com o Python, foi alterado para um código escrito em python executado no OpenVibe. Após verificações nas saídas do OpenVibe e nas entradas do ICM Space Game observou-se que a comunicação estava ocorrendo com atraso na ordem de mili-segundos, não interferindo na experiência e nos resultados obtidos.

4.3 Resultados do experimento

Após os ajustes realizados no código do driver de comunicação, ocorreram novas coletas de sinais de EEG para a comparação com os resultados obtidos previamente no protocolo convencional. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

PROTOCOLO CONVENCIONAL						
	TREINAMENTO DE ALGORITMOS	TREINO 1	TREINO 2	TREINO 3	VALIDAÇÃO	MÉDIA POR USUÁRIO
U1	70,37	48,52	61,61	52,16	49,88	56,51
U2	76,52	45,59	48,68	50,35	49,75	54,18
U3	84,01	48,72	50,06	46,82	48,98	55,72
U4	69,14	51,79	52,1	47,81	50,86	54,34
MÉDIA POR ETAPA	75,01	48,66	53,11	49,29	49,87	55,19

ICM SPACE GAME						
	TREINAMENTO DE ALGORITMOS	TREINO 1	TREINO 2	TREINO 3	VALIDAÇÃO	MÉDIA POR USUÁRIO
U1	68,8	46,29	55,55	38,88	46,19	51,14
U2	71,65	62,96	48,14	62,96	53,16	59,77
U3	75,61	59,61	44,44	45,28	47,85	54,56
U4	60,71	57,4	55,55	33,33	49,68	51,33
MÉDIA POR ETAPA	69,19	56,57	50,92	45,11	49,22	54,20

Tabela 2 – Resultados de acurácia da etapa de treinamento de algoritmos, treinamento de usuários e da validação de dados do protocolo convencional e do ICM Space Game

Ao analisar os resultados obtidos no processamento dos dados coletados, é possível observar que a média das coletas dos grupos A e B estão próximas, com uma ligeira vantagem para o grupo que utilizou o ICM Space Game. Ao analisar o desempenho individual dos voluntários, é esperado que a primeira coleta seja, de fato, a com maiores taxas de acerto. No entanto, é importante observar que a queda de desempenho para as demais coletas é relevante, uma vez que existem coletas com menos de 50% de taxa de acurácia. Ou seja, os algoritmos acertariam menos de 1 tentativa a cada 2 tentativas. Entre os fatores que podem ocasionar este resultado podemos citar: a baixa complexidade dos algoritmos quando comparados com outros sistemas disponíveis na literatura, as interferências notadas na avaliação experimental e o desgaste mental dos usuários ocasionando a não execução das tarefas mentais necessárias.

Com isso, no quesito desgaste mental, pode-se inferir que o ICM Space Game consegue entregar praticamente o mesmo resultado do protocolo convencional, se diferenciando na intenção de uso dos voluntários. Essa intenção foi medida através da aplicação de um questionário onde 87,5% dos voluntários escolheriam o ICM Space Game para coletas futuras. Isto pode se dar, pelo fato do ICM Space Game oferecer aos seus usuários entretenimento e interação com o sistema, tornando a etapa de coleta de sinais mais atrativa.

4.4 Apuração dos resultados

Durante e após os testes, foram relatadas experiências e situações que devem ser levadas em consideração. 25% dos usuários relataram mudanças na forma de executar a imaginação do movimento durante o jogo, na tentativa de melhorar o controle da nave.

Alguns comportamentos involuntários foram percebidos, dentre eles, a movimentação da cabeça de forma a acompanhar o movimento da nave no desvio dos obstáculos, movimentos musculares dos pés e/ou mãos também foram percebidos.

Para fins de verificação da existência de imagética motora nas coletas de validação, com baixo desempenho, os algoritmos foram retreinados e revalidados, como mostra a 3. Esta etapa não pôde ser efetuada para as coletas realizadas com o ICM Space Game pois como a execução de movimentos pelo voluntário é livre, não havia como prever os movimentos executados e por isso o banco de dados não foi demarcado com as tarefas que deveriam ser executadas.

RESULTADOS DE RETESTE					
PROTOCOLO CONVENCIONAL					
	COLETA 1	COLETA 2	COLETA 3	COLETA 4	COLETA 5
	80.58	92.66	78.97	68.69	75.24
U2	86.27	74.4	70.3	77.78	72.73
U3	69.5	65.75	71.33	61.78	67.68
U4	76.24	87.67	74.4	87.32	70.60

Tabela 3 – Matriz de acurácia quando utilizado os algoritmos treinados e validados com a mesma coleta de dados

No entanto, pôde-se observar que para o protocolo convencional, há sim incidência de imagética motora e que os algoritmos conseguem realizar a classificação de forma adequada. Então, surge a hipótese de que o usuário de fato realizou a imagética motora, porém, em um padrão diferente do esperado no ajuste de algoritmos. De forma clara, a hipótese, relatada por alguns usuários, é que o usuário realizou o treinamento com um tipo de "pensamento", no entanto, não conseguiu reproduzir o mesmo "pensamento" nas demais coletas de dados.

5 CONCLUSÃO

Os trabalhos práticos que envolvem uma ICM são árduos. Além de dificuldades comuns a outros trabalhos, é possível relatar a dificuldade na obtenção de ambientes indicados para a coleta de sinais e difícil tarefa de programar algoritmos fiéis na tradução de pensamento dos usuários. Usuários estes que tem parcelas significativas no desenvolvimento desta linha de pesquisa, pois assim como é trabalhoso para o pesquisador, é trabalhoso para os usuários que precisam passar por algumas horas em situações onerosas.

A partir desta dificuldade este trabalho foi produzido. A ideia é oferecer aos usuários uma alternativa mais amigável aos protocolos de coleta de sinais. Infelizmente, os resultados não são os esperados para a plataforma, no entanto, com alguns ajustes no ambiente de coleta (que foi parcialmente improvisado devido aos protocolos de segurança contra COVID-19), na utilização de algoritmos mais robustos e orientações mais rigorosas aos usuários podem ajudar em coletas futuras. Como estudado e relatado por usuários, a tentativa de melhorar o desempenho no ICM Space Game ocasionou uma mudança de pensamento do usuário, como observado na Tabela 3, há casos em que a ICM entende que o usuário executa uma imagética motora, no entanto, diferente da imaginação executa no treinamento dos algoritmos.

No entanto, este trabalho conseguiu, de certa forma, igualar as acurácias do método proposto ao protocolo convencional utilizado e conseguiu ir além, ao ser escolhido por mais de 80% dos usuários para a utilização em coletas futuras. Como resultados desta pesquisa, tem-se o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de realizar a comunicação entre usuário, uma ICM baseada em imagética motora e o ICM Space Game. A plataforma computacional em sua primeira versão foi capaz de gerar os dados necessários para a análise de resultados, embora ainda necessite de ajustes, como demarcação do sinal conforme os eventos das rodadas, melhorias na sincronização entre a ICM e o ICM Space Game, para melhorar as taxas obtidas e a partir daí começar a substituir o protocolo de aquisições citado neste trabalho.

O trabalho apresentou resultados consistentes no desenvolvimento do jogo e comparativo de métodos. Ainda há muito a ser feito, principalmente no desenvolvimento da ICM e no aperfeiçoamento do ICM Space Game, como a incrementação de níveis de dificuldades, desafios e bonificações.

Em pesquisas futuras, pode ser adotado uma configuração hiperparamétrica automatizada para a ICM (VILAS-BOAS, 2021). Com esta estratégia, seria possível ICMs personalizadas para cada usuário, além de melhorias na etapa de configurações do sistema.

A - EXEMPLO DE QUESTIONÁRIO

Questionário pessoal			
Identificação:		Mão de escrita:	☐ Direita ☐ Esquerda ☐ Ambas
Idade:		Gênero:	☐ Feminino ☐ Masculino
Pratica algum esporte? Em caso afirmativo, qual?	☐ Sim ☐ Não _____	Fez uso de algum medicamento ou bebidas alcóolicas nas últimas 24 horas?	☐ Sim ☐ Não
Grau de experiência com dispositivos ICM:	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3	Grau de experiência com jogos eletrônicos:	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3
Possui histórico de distúrbios neurológicos? Em caso afirmativo, qual?	☐ Sim ☐ Não _____	Qual seu nível de cansaço físico?	☐ Baixo ☐ Moderado ☐ Alto
Possui alguma indicação ou observação extra? Em caso afirmativo, qual?	☐ Sim ☐ Não _____	Qual seu nível de cansaço mental?	☐ Baixo ☐ Moderado ☐ Alto
Qual o seu nível de satisfação ao utilizar o protocolo convencional?	☐ Insatisfeito ☐ Pouco satisfeito ☐ Satisfeito ☐ Muito Satisfeito	Qual o seu nível de satisfação ao utilizar o ICM Space Game?	☐ Insatisfeito ☐ Pouco satisfeito ☐ Satisfeito ☐ Muito Satisfeito
Qual dos procedimentos experimentados você gostaria de utilizar em futuras coletas de sinais de EEG?			

Observação: Para melhor compreensão, siga as orientações abaixo.

- Nas questões com escala, considere a seguinte ordem:

☐ 0 - Nenhum ☐ 1 - Pouco ☐ 2 - Médio ☐ 3 - Muito

- Serão aceitas apenas uma resposta por pergunta.

Termo de aceite

Você está sendo convidado a participar como voluntário de um estudo. Por favor, esclareça suas dúvidas antes de assinar este documento.

Se houver perguntas antes ou mesmo depois de assiná-lo, você poderá esclarecê-las com o pesquisador. Se você não quiser participar ou retirar sua autorização, a qualquer momento, não haverá nenhum tipo de penalização ou prejuízo.

Figura 29 – Exemplo de questionário aplicado para conhecimento das condições físicas e mentais dos usuários. (Fonte: Autor)

B - INSTRUÇÕES

Orientações para a realização da coleta	
Montagem e configuração: • Abrir o <i>software openBCI</i> disponibilizado no site; • Verificar o nível das pilhas; • Estabelecer a comunicação entre a placa <i>Cyton</i> e o computador, com o auxílio do <i>dongle</i> (conectado na porta usb); • Desligar a placa e conectar os eletrodos no escalpo do usuário (caso necessário, utilize gel condutor específico); • Ligar a placa; • Desconectar dispositivos que possam causar interferências (ex: ar condicionado, <i>smartphones</i>, dispositivos sem fio). • Verificar as conexões através do <i>software</i> supracitado; • Iniciar procedimentos de coleta padrão.	
Problemas conhecidos:	Possíveis Soluções
O <i>Software</i> não reconhece a placa.	1. Testar pilhas da placa; 2. Reiniciar os dispositivos; 3. Reiniciar o <i>software</i>; 4. Conectar o <i>dongle</i> em uma nova porta USB.
Eletrodo com status desconectado.	1. Verificar a conexão com o escalpo; 2. Aplicar gel condutor.
Do profissional: • Utilizar vestimenta apropriada; • Verificar possíveis erros, do <i>software</i> ou do usuário, no momento da coleta; • Não interferir de forma alguma no momento que o usuário realiza as atividades, salvo casos em que seja necessário o reinício das atividades; • Desligar os <i>smartphones</i>; • Evitar conversas com o usuário e/ou outro profissional sobre assuntos não relacionados ao procedimento; • Atentar para o posicionamento adequado do usuário; • Repassar ao usuário todas as informações necessárias mediante a coleta e conferir o preenchimento do “questionário pessoal”. Obs: O profissional fica responsável pela limpeza e arrumação dos equipamentos utilizados durante a atividade.	

Figura 30 – Orientações para o técnico responsável pela aquisição de sinais de EEG. (Fonte: Autor)

REFERÊNCIAS

- ABDULKADER, S. N.; ATIA, A.; MOSTAFA, M.-S. M. Brain computer interfacing: Applications and challenges. **Egyptian Informatics Journal**, v. 16, n. 2, p. 213 – 230, 2015. ISSN 1110-8665.
- ARVANEH, M. et al. Facilitating motor imagery-based brain–computer interface for stroke patients using passive movement. **Neural Computing and Applications**, v. 28, n. 11, p. 3259–3272, Nov 2017. ISSN 1433-3058.
- BERNARDI, G. B. **Ferramenta Simplificada Para Testes de Algoritmos de Seleção de Características e Classificação em Sinais Cerebrais Captados com EEG para BCIs baseados em Imagética Motora**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2018.
- BONNET, L.; LOTTE, F.; LÉCUYER, A. Two brains, one game: Design and evaluation of a multiuser bci video game based on motor imagery. **IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games**, v. 5, n. 2, p. 185–198, June 2013. ISSN 1943-068X.
- BORDOLOI, S.; SHARMAH, U.; HAZARIKA, S. M. Motor imagery based bci for a maze game. In: **2012 4th International Conference on Intelligent Human Computer Interaction (IHCI)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6.
- BOS, D. P.-O. et al. Brain-computer interfacing and games. In: _____. [S.l.: s.n.], 2010. p. 149–178.
- BRUNNER, C. et al. Bci software platforms. In: **Towards Practical Brain-Computer Interfaces**. [S.l.]: Springer, 2012. p. 303–331.
- BUZZI, A. et al. Extração de características para implementação de um sistema bci baseado em mi: Resultados preliminares. **XXV Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica - CBEB**, 2016.
- CAMACHO, J.; MANIAN, V. Real-time single channel eeg motor imagery based brain computer interface. In: **2016 World Automation Congress (WAC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- CANTARELLI, T.; JÚNIOR, J. M.; JR, S. S. Fundamentos da medição do eeg: Uma introdução. In: . [S.l.: s.n.], 2016.
- DUARTE, R. **Low cost brain computer interface system for ar.drone control**. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.
- F PALMAS G, S. S. P. F. G. S. B. **User adaptive BCIs: SSVEP and P300 based interfaces**. [S.l.: s.n.], 2003. 331–54 p.
- FONSECA, L. G. de A. **Comparação da ativação do ritmo beta em lobo frontal de idosos submetidos a realidade virtual**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.
- FREITAS, D. R. R. d. Plataforma para análise do sinal de eeg aplicado ao erd/ers no reconhecimento em tempo real da imaginação do movimento. Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

GRIGG-DAMBERGER, M.; FOLDVARY-SCHAEFER, N. Sleep-related epilepsy and electroencephalography. **Sleep Medicine Clinics**, v. 7, p. xiii–xiv, 03 2012.

HAGHIPOUR, S.; FIROUZ, N. M. A survey on eeg signal classification with neural network for brain computer interface applications. **Int. J. of Comp. Info. Tech, ijocit**, v. 4, p. 55–62, 2016.

HAMEDI, M.; SALLEH, S.-H.; NOOR, A. M. Electroencephalographic motor imagery brain connectivity analysis for bci: a review. **Neural computation**, MIT Press, v. 28, n. 6, p. 999–1041, 2016.

HAUFE, S. et al. EEG potentials predict upcoming emergency brakings during simulated driving. **Journal of Neural Engineering**, IOP Publishing, v. 8, n. 5, p. 056001, jul 2011.

HEIDRICH, R. d. O. et al. Jogos digitais para interacao com brain computer interface para auxiliar no processo de inclusao escolar de pessoas com paralisia cerebral. **Blucher Design Proceedings**, v. 2, n. 9, p. 3397–3407, 2016.

ISLAM, M. N. et al. Applying brain-computer interface technology for evaluation of user experience in playing games. In: . [S.l.: s.n.], 2019.

KAPLAN, A. Y. et al. Adapting the p300-based brain–computer interface for gaming: A review. **IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games**, v. 5, n. 2, p. 141–149, June 2013.

LIM, H.; KU, J. High engagement in bci action observation game by relevant character’s movement. In: **2019 7th International Winter Conference on Brain-Computer Interface (BCI)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–3.

LOPES, T. **Estudo, implementação e comparação de diferentes tipos de pré-processamento aplicados a um sistema interface cérebro-computador**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso em engenharia elétrica) — Universidade Federal do Pará, 2018.

LÉCUYER, A. et al. Brain-computer interfaces, virtual reality, and videogames. **Computer**, v. 41, n. 10, p. 66–72, Oct 2008.

MACHADO, J. C. **Pré-processamento, Extração De Características E Classificação Offline De Sinais Eletroencefalográficos Para Uso Em Sistemas BCI**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

MARSHALL, D. et al. Games, gameplay, and bci: The state of the art. **IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games**, v. 5, n. 2, p. 82–99, June 2013. ISSN 1943-068X.

MCFARLAND, D.; WOLPAW, J. Brain-computer interfaces for communication and control. **Communications of the ACM**, v. 54, p. 60–66, 05 2011.

MCFARLAND, D. J.; WOLPAW, J. R. Brain-computer interface operation of robotic and prosthetic devices. **Computer**, v. 41, n. 10, p. 52–56, Oct 2008. ISSN 0018-9162.

MENEZES, J. d. S. Mobile game design. Faculdades IDAAM, 2017.

MENG, J. et al. Automated selecting subset of channels based on csp in motor imagery brain-computer interface system. In: **2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 2290–2294.

- MIRANDA, G. A. M. V. . L. C. de. Brain–computer interface games based on consumer-grade eeg devices: A systematic literature review. **International Journal of Human–Computer Interaction**, p. 36:2, 105–142, 2020.
- NICOLAS-ALONSO, L.; GOMEZ-GIL. Brain computer interfaces, a review. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 12, p. 1211–79, 12 2012.
- NICOLELIS, M. Muito além do nosso eu. **São Paulo: Companhia das Letras**, 2011.
- PARAFITA, R. et al. A spacecraft game controlled with a brain-computer interface using ssvep with phase tagging. In: **2013 IEEE 2nd International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6.
- PIRES, G. et al. Playing tetris with non-invasive bci. In: **2011 IEEE 1st International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6.
- PRATTI, R. C.; BATISTA, G. E. A. P. A.; MONARD, M. C. Curvas roc para avaliação de classificadores. In: . [S.l.: s.n.], 2008. v. 6.
- RENARD, Y. et al. Openvibe: An open-source software platform to design, test, and use brain–computer interfaces in real and virtual environments. **Presence: teleoperators and virtual environments**, MIT Press, v. 19, n. 1, p. 35–53, 2010.
- ROBERTO, D. **Plataforma para Análise do Sinal de EEG Aplicado ao ERD/ERS no Reconhecimento em Tempo Real da Imaginação do Movimento**. Tese (Doutorado), 06 2019.
- ROQUE, A.; SANTOS, C.; FERREIRA, M. H. Método de controle para análise de ondas eeg aplicado ao controle de ambiente. In: . [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.
- ROYER, A. S. et al. Eeg control of a virtual helicopter in 3-dimensional space using intelligent control strategies. **IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering**, v. 18, n. 6, p. 581–589, Dec 2010.
- SILVA, C. D. **Processamento de sinais de EEG para classificação de tarefas motoras em sistemas de interface cérebro-máquina**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.
- TANGERMANN, M. et al. Review of the bci competition iv. **Frontiers in neuroscience**, v. 6, p. 55, 07 2012.
- TEIXEIRA, A. R. et al. Uso de um bci para a medição dos níveis de atenção. **Atas do XIX Simpósio Internacional de Informática Educativa e VIII Encontro do CIED–III Encontro Internacional**, CIED–Centro Interdisciplinar de Estudos Educacionais, p. 23–28, 2017.
- VALLABHANENI, A.; WANG, T.; HE, B. **Brain—Computer Interface**. [S.l.: s.n.], 1970. 85-121 p.
- VASILJEVIC, G. A. M.; MIRANDA, L. C. de. Comparing users’ performance and game experience between a competitive and collaborative brain-computer interface. **Behaviour Information Technology**, 2022.

VAZ, Y. **Extração de características para a classificação de imagética motora em interfaces cérebro-computador**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, June 2016.

VILAS-BOAS, V. M. **AUTOBCI: INTERFACE CÉREBRO MÁQUINA COM CONFIGURAÇÃO HIPERPARAMÉTRICA AUTOMATIZADA**. 250 p. Dissertação (Dissertação) — Universidade Federal do Pará, 2021.

ZHANG, R. et al. Control of a wheelchair in an indoor environment based on a brain-computer interface and automated navigation. **IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society**, v. 24, 06 2015.