



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA E MATEMÁTICA APLICADA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS E COMPUTAÇÃO  
MESTRADO EM SISTEMAS E COMPUTAÇÃO



# **Interfaces Cérebro-Computador: Estudo, Design e Desenvolvimento do Jogo AdmiralMind Battleship**

**Alessandro Luiz Stamatto Ferreira**

Natal-RN  
Março de 2014

**Alessandro Luiz Stamatto Ferreira**

# **Interfaces Cérebro-Computador: Estudo, Design e Desenvolvimento do Jogo AdmiralMind Battleship**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Computação do Departamento de Informática e Matemática Aplicada da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito final para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas e Computação.

Linha de pesquisa:  
Engenharia de Software

Orientador

Prof. Dr. Leonardo Cunha de Miranda

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS E COMPUTAÇÃO (PPGSC)  
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA E MATEMÁTICA APLICADA (DIMAP)  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA (CCET)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE (UFRN)

Natal-RN

Março de 2014

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / SISBI / Biblioteca Setorial  
Centro de Ciências Exatas e da Terra – CCET.

Ferreira, Alessandro Luiz Stamatto.

Interfaces cérebro-computador: estudo, design e desenvolvimento do jogo  
AdmiralMind Battleship / Alessandro Luiz Stamatto Ferreira. - Natal, 2014.  
117 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Cunha de Miranda.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro  
de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Sistemas e  
Computação.

1. Interação humano-computador – Dissertação. 2. Headset – Dissertação. 3.  
EEG (Eletroencefalograma) – Dissertação. 4. Movimento imaginado – Dissertação.  
5. Emotiv – Dissertação. 6. EPOC – Dissertação. I. Miranda, Leonardo Cunha de.  
II. Título.

RN/UF/BSE-CCET

CDU: 004.5

Dissertação de Mestrado sob o título *Interfaces Cérebro-Computador: Estudo, Design e Desenvolvimento do Jogo AdmiralMind Battleship*, apresentada por Alessandro Luiz Stamatto Ferreira e aceita pelo Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Computação do Departamento de Informática e Matemática Aplicada da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sendo aprovada por todos os membros da banca examinadora abaixo especificada:

---

Prof. Dr. Leonardo Cunha de Miranda

Presidente

Departamento de Informática e Matemática Aplicada (DIMAp)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

---

Prof. Dr. José Antonio dos Santos Borges

Examinador Externo

Instituto Tércio Pacitti de Aplicações e Pesquisas Computacionais (NCE)

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

---

Prof. Dr. Jair Cavalcanti Leite

Examinador Interno

Departamento de Informática e Matemática Aplicada (DIMAp)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

---

Prof. Dr. Marcos César Madruga Alves Pinheiro

Examinador Interno

Departamento de Informática e Matemática Aplicada (DIMAp)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Natal-RN, 28, Março de 2014

À minha estrela guia: Sarah.

# Agradecimentos

Agradeço a todos que - conscientemente ou não - me apoiaram, ajudaram, e/ou acreditaram em mim.

À Sarah, minha "dupla dinâmica" que me acompanha em todas as temporadas. Obrigado Sarah, por ser minha musa iluminadora. Você me inspira todos os dias com o seu poder das nove musas originais: mostrando a elegância de Calíope, imergindo-me em histórias de Clio, cantando ao estilo Euterpe, Emotiva como Melpômene, faz-me rir por Talia, brilha como estrelas Urânia, caio em amores Érato, rodopias graciosamente - fofa como Terpsícore, e tens uma bondade Polímnia. 사랑해 ; )

À minha família primária - Adir, Inês, e Luane. Obrigado, pelo patrocínio, centenas de conversas e discussões, carinho, e apoio. Graças a vocês pode me dedicar exclusivamente ao mestrado, sem precisar me reestabelecer em outro teto. Agradeço também a minha segunda família - Akihiko, Edilza, e Carlos. Obrigado, por também lutarem por mim e me aconselharem em diversos momentos. Agradeço também a membros não convencionais da minha família: Neblina e LukeLuke. Obrigado, pela suas amigadas caninas, pela guarda, e pelos laços de estimação.

À meus "Toddyinhos" - companheiros de aventuras. Desde aqueles mais próximos, como Nicolau e Rodrigo, até aqueles longínquos que - infelizmente - estão mais distantes devidos a circunstâncias da vida, como Marcos e Ígor. Obrigado, por nunca desistirem da nossa amizade, me convidarem para as mais diversas aventuras, e por sempre aparecerem - de uma forma ou de outra - em momentos importantes para mim.

À meu Orientador workaholic - Leonardo. Obrigado, por estar sempre presente durante todo o mestrado, ajudando a realizar pesquisas de qualidade, e por manter a luz acesa do nosso grupo de pesquisa. Este trabalho é fruto das dezenas de reuniões e revisões, que auxiliaram a levar a pesquisa adiante.

À talentosa desenhista - Ana. Obrigado, pelo companheirismo, e pelo design gráfico e inúmeros desenhos que fortaleceram imensamente o jogo desenvolvido durante minha pesquisa.

À meus colegas de trabalho do grupo PAIRG - Ana, Diego, Manoel, Leonardo, Gabriel, Erica, Juvane, Paulo e Alyson. Obrigado, pelo companheirismo, conversas, e por me fazerem sentir parte de um grupo de pesquisas inovadoras.

Aos Professores Selan, Madruga, Flávia, Ivan, Benjamin, João Marcos, e Jair. Obrigado, pelo amplo conhecimento, sabedoria, ensinamentos, por aumentarem o fascínio que tenho pela área, e pela atuação profissional de cada um de vocês - essencial para a minha formação.

À banca examinadora - Antonio, Jair, e Madruga. Obrigado, por aceitarem o convite da minha defesa, e dedicarem tempo para aprimorarem este trabalho.

À todos aqueles que não me vêm a memória, ou que não tomei consciência - "XYZ". Obrigado, por me ajudarem e apoiarem da forma tão especial como vocês o fazem.

Obrigado.

*“the most important person in my gang will be a systems programmer. A person who can debug a device driver or a distributed system is a person who can be trusted in a Hobbesian nightmare of breathtaking scope; a systems programmer has seen the terrors of the world and understood the intrinsic horror of existence. The systems programmer has written drivers for buggy devices whose firmware was implemented by a drunken child or a sober goldfish. The systems programmer has traced a network problem across eight machines, three time zones, and a brief diversion into Amish country, where the problem was transmitted in the front left hoof of a mule named Deliverance. The systems programmer has read the kernel source, to better understand the deep ways of the universe, and the systems programmer has seen the comment in the scheduler that says “DOES THIS WORK LOL,” and the systems programmer has wept instead of LOLed, and the systems programmer has submitted a kernel patch to restore balance to The Force and fix the priority inversion that was causing MySQL to hang. A systems programmer will know what to do when society breaks down, because the systems programmer already lives in a world without law.”*

— James Mickens

# Interfaces Cérebro-Computador: Estudo, Design e Desenvolvimento do Jogo AdmiralMind Battleship

Autor: Alessandro Luiz Stamatto Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Cunha de Miranda

## RESUMO

Interface Cérebro-Computador (ICC) é uma área que vêm sendo estudada há décadas, mas apenas nos últimos anos atingiu um nível de maturidade suficiente para permitir o seu uso com jogos digitais. Considerando que no futuro as ICCs farão parte de sistemas interativos, é preciso estudar o seu uso, avaliar quais são seus desafios e limitações e, também, entender de forma mais apurada como adaptá-la para uso conjugado com outras formas usuais de interação humano-computador. Nesta pesquisa, investigamos apenas as ICCs não-invasivas por entendermos que esse tipo de ICC poderá ser, de fato, utilizada por usuários finais nesse “novo” paradigma de interação. Um dos grandes potenciais de uso de ICCs é no domínio de jogos digitais, onde podem aumentar a imersão e a diversão através de um controle via ondas cerebrais. Apesar disso, nos dias atuais, ainda existem grandes dificuldades nos processos de design e desenvolvimento de jogos dessa natureza. Como resultados da pesquisa destacamos o extenso levantamento da área, a identificação de desafios de interação relacionados a ICCs, a identificação dos stakeholders através do referencial teórico-metodológico da Semiótica Organizacional, a confecção de um design-rationale para apoiar o processo de design de jogos dessa natureza e, ainda, o design e a implementação, em C++, de um jogo de batalha naval controlado via uma ICC híbrida baseada em movimento imaginado para uso com o headset EEG Emotiv EPOC.

Palavras-chave: Interação Humano-Computador, Headset, EEG, Movimento Imaginado, Emotiv, EPOC.



# Brain-Computer Interfaces: Study, Design, and Development of the Game AdmiralMind Battleship

Author: Alessandro Luiz Stamatto Ferreira

Advisor: Prof. Dr. Leonardo Cunha de Miranda

## ABSTRACT

Brain-Computer Interface (BCI) is an area that has been studied for decades, but only in recent years has reached a sufficient maturity level to allow its use with digital games. Whereas BCIs in the future will be part of interactive systems, it is necessary to study its use, evaluate its challenges and limitations, and also understand how to adapt it for use in conjunction with other usual forms of human-computer interaction. In this study, we investigated only non-invasive BCIs because we believe that this type of BCI may be, in fact, used by end users in this "new" paradigm of interaction. A major potential use of BCIs is the field of digital games, where they can increase the immersion and fun through control via brain waves. Nevertheless, nowadays, there are still major difficulties in the design/development of such games. As results of this research we highlight an extensive survey of the area, identifying challenges related to BCIs interaction, identification of stakeholders through the theoretical and methodological framework of the Organizational Semiotics, the making of a design-rationale to support the process of designing such games, and the design and implementation, in c++, of a battleship game controlled via an hybrid BCI based on imagined movement, for use through Emotiv EPOC EEG headset.

Keywords: Human-Computer Interface, Headset, EEG, Imagined Movement, Emotiv, EPOC.

# Lista de Figuras

Figure 1. Noninvasive equipments used to capture cerebral information (a) EEG electrodes (b) fMRI scanner (c) spectroscopic sensors. Sources: [1] .....	24
Figure 2. CI headsets (a) NeuroSky MindSet (b) Emotiv EPOC (c) fNIRS sensors covered with a headband. Sources: [38],[1],[119].....	24
Figure 3. Spellers based on (a) P300 (b) SSVEP. Sources:[104],[51].....	25
Figure 4. BCI for car driving in virtual simulator CARRS-Q. Source:[50].....	27
Figure 5. Contacts flash, one by one, detecting the user visual focus. A phone call is made to the chosen one. Source: [15]. .....	28
Figure 6. Multitouch display interface, where objects are enlightened one by one, triggering a P300 wave. Source: [137]. .....	29
Figure 7. A user selects the “prepare meal” in the FRIEND BCI system. Source: [39]. .....	30
Figure 8. A (a) P300-based BCI for controlling (b) a virtual domotics environment. Source: [28]. .....	31
Figure 9. User walks in a virtual street imagining feet movement. Source: [102].....	33
Figure 10. Superflick interaction test using a BCI for auto-correction. Source: [128].....	34
Figure 11. Partes Interessadas resultante da análise do domínio de ICC. ....	46
Figure 12. Graphical interfaces of BCI games based on neurofeedback (a) <i>Mind Garden</i> (b) <i>NeuroWander</i> . Sources: [122][136]. .....	61
Figure 13. Graphical interfaces of BCI games based on visual stimulus (a) <i>Mind the Sheep</i> (b) <i>MindBalance</i> . Sources: [42][63].....	61
Figure 14. Another graphical interfaces of BCI games based on visual stimulus (a) <i>The Maze</i> (b) <i>Connect Four</i> . Sources: [19][77]. .....	63
Figure 15. Graphical interfaces of BCI games based on imagined movement (a) <i>Hangman</i> (b) <i>BCI Tennis</i> . Sources: [44][73].....	65
Figure 16. Graphical interfaces of BCI games based on hybrid detection (a) <i>Bacteria Hunt</i> (b) <i>BCI Tetris</i> . Sources: [94][105]. .....	68
Figure 17. Design rationale for digital games based on BCI, proposed in the present work. ....	72
Figure 18. Symbols used in the design rationale.....	72
Figure 19. Overview of the design process for digital games based on BCI, proposed in the present work. ....	73

Figura 20. Jogos relacionados (a) Augmented Reality battleship game, (b) Cellphone GPS-based battleship game (d) Battleship General Quarters (e) Pogo Battleship 2 (f) Cruiser Battleship 2 (g) Hexip (h) Warship Strafe (i) Battleship Fleet (j) Torpedo Attack. ....	82
Figura 21. Um jogo em progresso de Batalha Naval em Papel e Caneta. ....	84
Figura 22. Tela home do AdmiralMind Battleship, dois jogadores encontram-se online disponíveis para uma partida.....	86
Figura 23. Os jogadores têm 45 segundos para posicionar seus navios no campo de batalha. ....	88
Figura 24. Dois usuários jogando o AdmiralMind battleship online. ....	88
Figura 25. Arquitetura do AdmiralMind Battleship.....	91
Figura 26. Trecho do código da aplicação servidora. ....	92
Figura 27. Fluxo de pacotes em alguns cenários.....	92
Figura 28. Diagrama de classes do jogo AdmiralMind Battleship.....	94
Figura 29. Posicionamento dos sensores EPOC seguindo o padrão 10/20.....	97
Figura 30. A ICC em uso controlando o jogo AdmiralMind Battleship (a), e uma imagem em perfil do usuário usando o headset (b). ....	98

# Lista de Tabelas

Table 1. Literature works presented in this survey. ....	35
Table 2. Quadro de avaliação resultante da análise do domínio de ICC. ....	47
Table 3. Escada Semiótica resultante da análise do domínio de ICC.....	49
Table 4. Synthesis of the literature BCI-based games. ....	69
Table 5. Results of the Decisions Rationale for a BCI game. ....	75
Tabela 6. Trabalhos baseados no jogo de Batalha Naval.....	83
Tabela 7. Opções de batalha disponíveis.....	87
Tabela 8. Postos da hierarquia do AdmiralMind Battleship. ....	90
Tabela 9. Os 16 tipos de mensagem do jogo. ....	93

# Lista de Abreviaturas e Siglas

**ICCs:** Interfaces Cérebro-Computador  
**BCIs:** Brain-Computer Interface  
**RM :** Ressonância Magnética  
**fMRI:** Functional Magnetic Resonance Imaging  
**fNIRS:**Functional Near-Infrared Spectroscopy  
**EEG :** Eletroencefalograma  
**EEG :** Electroencephalogram  
**IHC :** Interface Humano-Computador  
**HCI :** Human-Computer Interaction  
**HMD :** Head-Mounted Display  
**VR :** Virtual Reality  
**SSVEP:** Steady State Visually-Evoked Potential  
**SSAEP:** Steady State Auditory=Evoked Potential  
**P300 :** Wave P300  
**SO :** Semiótica Organizacional  
**PAM :** Problem Articulation Method (PAM)  
**ES :** Escada Semiótica  
**PI :** Partes Interessadas  
**QA :** Quadro de Avaliação  
**FPS :** First-Person Shooter  
**RTS :** Real-Time Strategy  
**RPGs :** Role-Playing Games  
**Capt.:** Capitão

# Sumário

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas.....</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>16</b>
1.1 Contexto, Problemática e Motivação .....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.3 Relevância da Pesquisa.....	18
1.4 Estrutura do Trabalho .....	19
<b>2 Survey of Interactive Systems based on Brain-Computer Interfaces .....</b>	<b>21</b>
2.1 Introduction.....	21
2.2 Brain-Computer Interface .....	22
2.2.1 Thoughts Recognition.....	24
2.3 Survey.....	26
2.3.1 Visual Stimulus Response.....	26
2.3.2 Sound Stimulus Response .....	31
2.3.3 Concentration .....	32
2.3.4 Imagined Movement .....	32
2.3.5 Neurofeedback .....	34
2.3.6 Summary.....	35
2.4 Challenges .....	36
2.4.1 Discussion.....	38
2.5 Conclusion .....	40
2.6 Tomada de Decisão.....	41
<b>3 Interfaces Cérebro-Computador sob a Perspectiva da Semiótica Organizacional....</b>	<b>43</b>
3.1 Introdução.....	43
3.2 Semiótica Organizacional .....	45
3.3 Análise de domínio.....	46
3.3.1 Quadro de avaliação .....	47
3.3.2 Escada Semiótica.....	49
3.4 Desafios e Oportunidades.....	51
3.4.1 Mercadológico .....	51
3.4.2 Projetual.....	52
3.4.3 Social.....	52
3.4.4 Educacional.....	53
3.5 Discussão .....	54
3.6 Conclusão.....	55

3.7	Tomada de Decisão.....	55
<b>4</b>	<b>Design Rationale for BCI-based Games .....</b>	<b>56</b>
4.1	Introduction.....	56
4.2	Related Works .....	57
4.3	Literature Review of Games based on BCI .....	58
4.3.1	BCI Games based on Neurofeedback.....	59
4.3.2	BCI Games based on Visual Stimulus.....	61
4.3.3	BCI Games based on Imagined Movement.....	64
4.3.4	BCI Games based on Hybrid Detection.....	67
4.3.5	A Synthesis of the Main Findings of the Literature Review.....	69
4.4	Design Rationale.....	71
4.5	AdmiralMind Battleship Study .....	73
4.5.1	Methodology.....	73
4.5.2	Results.....	74
4.5.3	Discussion.....	76
4.6	Conclusion .....	77
4.7	Tomada de Decisão.....	78
<b>5</b>	<b>AdmiralMind Battleship BCI Game: Design e Implementação .....</b>	<b>79</b>
5.1	Introdução.....	79
5.2	Trabalhos e jogos relacionados .....	80
5.3	AdmiralMind Battleship BCI Game.....	83
5.3.1	Overview de jogos de batalha naval clássicos .....	84
5.3.2	Design da Interface .....	85
5.3.3	Design de medalhas.....	89
5.4	Implementação.....	91
5.5	Decisões quanto a ICC .....	95
5.5.1	Testes preliminaries com usuários. ....	98
5.6	Lições aprendidas .....	99
5.7	Discussão .....	99
5.8	Conclusão.....	100
5.9	Tomada de Decisão.....	101
<b>6</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>102</b>
6.1	Trabalho Realizado.....	102
6.2	Contribuições .....	103
6.3	Perspectivas e Trabalhos Futuros .....	104
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>105</b>





# Capítulo 1

## Introdução

O avanço da tecnologia traz novas formas de interação a sociedade contemporânea. Antigamente a interação do usuário com sistemas computacionais era realizada exclusivamente via comandos textual inseridos num terminal de linha de comando. Com o progresso da humanidade novas formas de interação tornaram-se possíveis, desde o conceito de manipulação direta, até interações mais transparentes, tal como, a interação baseada em reconhecimento de movimento do corpo humano. O estudo de interações traz também a possibilidade de uso da tecnologia por aqueles que antes não podiam, devido a algumas deficiência permanentes ou temporárias, por exemplo, visuais ou auditivas. Uma interação complexa que vem sendo estudada há algumas décadas é o controle da tecnologia através de ondas cerebrais. Essa forma de interação está muito presente em obras de ficção científica, por exemplo, no controle telecinético através da “força Jedi”, mas que também vem ganhando destaque nas pesquisas que estão sendo realizadas ao redor do mundo. Interfaces Cérebro-Computador (ICCs) visam atingir esse objetivo e permitem, ainda que imaturas frente a outras áreas de conhecimento, uma interação baseada na captura das ondas do cérebro do usuário.

Uma área sempre em busca de novas formas de interação é a área de jogos, onde inovações podem aumentar o entretenimento do usuário. ICCs podem ser usadas, e aprimoradas, nesse meio. Servindo como um estudo dessa nova forma de interação.

### 1.1 Contexto, Problemática e Motivação

Interfaces Cérebro Computador (ICCs) vêm sendo estudadas desde os anos 1970, inicialmente para fins militares ou médicos. Atualmente tecnologias de análise cerebral são muito utilizadas no meio médico, como exames de Ressonância Magnética (RM) ou de Eletroencefalograma (EEG).

Porém, apenas recentemente atingiram um patamar de maturidade suficiente para uso doméstico. Um dispositivo de ressonância magnética é muito caro para uso em massa pela população, pois é muito grande, pesado, e seu uso tem que ser feito com o usuário final. Em contraste, dispositivos de Eletroencefalograma (EEG) são “vestidos” na cabeça, variando no formato, tais como, toucas, tiaras, capacetes, ou como fios soltos, são muito mais leves (permitindo mobilidade pelo usuário) e baratos. Um dos usos médicos de dispositivos de EEG é a polissonografia, exame da saúde de sono de uma pessoa. Atualmente empresas vêm comercializando dispositivos de EEG acessíveis a uma parcela de usuários domésticos, graças a essa nova disponibilidade é possível desenvolver aplicações baseadas em ICC voltadas a um público geral, como jogadores.

Grande parte das pesquisas de ICCs focam nesta tecnologia como forma de ampliar a acessibilidade, oferecendo uma interação para usuários com dificuldades motoras significativas. ICCs ajudam muito nessa área, mas é importante também estudá-las sobre o contexto do usuário sem essas dificuldades.

Nesse contexto, está pesquisa estuda o uso de ICCs por usuários finais que não possuem - necessariamente - dificuldades de acesso. Dentro deste escopo, é preciso identificar onde, e como, ICCs seriam utilizadas: qual seria o público dessa tecnologia? Sobre quais fins usariam ICCs? Um estudo de sistemas baseados em ICC precisa responder a estas, e outras questões. São necessário também pesquisas no que diz respeito a aplicações atuais de ICC, sejam elas no âmbito de controle de casa (domótica), entretenimento (e.g: jogos), ou interações novas para interfaces convencionais (e.g: sistemas operacionais). Além disso, a imaturidade da área quando comparada a outras áreas de conhecimento leva a uma forte necessidade do desenvolvimento de novos sistemas, e aplicações, baseados em ICC - bem como o estudo do processo e desenvolvimento dos mesmos. A carência de documentação, processos, estudos, e meios de desenvolvimento de aplicações ICC é notável: uma mudança nesse cenário seria de grande valia para comunidade científica que anseia por resultados mais tangíveis dessa nova forma de interação.

## 1.2 Objetivos

Considerando o contexto, problemática e motivação apresentados anteriormente, o objetivo principal desta pesquisa é:

- O estudo, design, e desenvolvimento de um sistema interativo baseado em Interface Cérebro-Computador - visando uma ICC financeiramente acessível a usuários domésticos, e levando em consideração tanto aqueles com, como aqueles sem, dificuldades motoras.

O objetivo principal desta pesquisa é dividido nos seguintes objetivos específicos:

- Identificar vantagens, desvantagens, e desafios em métodos e aplicações de ICC atuais dentro do contexto e escopo do objetivo principal;
- Identificar *stakeholders* envolvidos em ICCs, como futuros usuários desta interface e suas expectativas;
- Avaliar o uso de ICCs em sistemas interativos, tais como, ambientes de realidade virtual e jogos;
- Projetar o design de um novo sistema interativo baseado em ICC;
- Implementar o sistema interativo baseado em ICC;
- Avaliar o sistema interativo baseado em ICC desenvolvido;

### 1.3 Relevância da Pesquisa

A evolução da área de Interação Humano-Computador (IHC) proporciona mudanças significativas na forma como utilizamos sistemas interativos. Com a tendência cada vez mais acentuada de uso de *smartphones* e *tablets*, faz-se necessário observar, por exemplo, que a interação dos usuários com as aplicações ocorrerão em *displays* menores e via telas sensíveis ao toque. Enquanto que controles modernos, tais como o Nintendo WiiMote e o Microsoft Kinect, levantam a necessidade de ajustar a interação considerando o movimento físico dos usuários em seu contexto de uso para viabilizar a utilização do sistema de forma adequada. Cada interface tem suas peculiaridades, sendo necessário estudos para o melhor aproveitamento de cada interação.

ICCs oferecem uma interação não usual, e envolvem diversas áreas de conhecimento, por exemplo, Neurociência, Biomedicina, Engenharia de Controle e Automação, e Ciência da Computação. Esse envolvimento multidisciplinar torna complexo o uso de ICCs, sendo necessário pesquisas de cada uma dessas áreas para o progresso efetivo desta forma de interação. Beneficiários dessas pesquisas incluem usuários com severas dificuldades motoras - que poderão ganhar uma nova forma de acesso, bem como usuários sem quaisquer dificuldades motoras - que poderão usar essa tecnologia para uma interação natural e direta.

Esta área de pesquisa ainda é muito pouco explorada quanto parte de interação, provavelmente, pela complexidade intrínseca às áreas envolvidas neste domínio, todavia já existem alguns trabalhos norteados pela área de IHC. Como o trabalho de Solovey et al. [120], apresentando na conferência ACM CHI'12 uma interface multimodal baseado em ICC, e o trabalho de Friedman et al. [36] que exhibe uma ICC com realidade virtual no periódico Human-Computer Interaction. Em ambos os trabalhos é nítida a necessidade da realização de um estudo que identifique de forma clara e objetiva as limitações atuais de ICCs pensadas do ponto de vista

da interação. Existem diversas pesquisas focadas no aspecto físico da tecnologia (e.g: como melhorar a qualidade de captura do sinal), e voltada para fins médicos e acessibilidade - com o uso da tecnologia pensado naqueles usuários com dificuldades motoras. Em contrapartida, pesquisas na esfera de interação (como IHC), e voltada para um público geral (e.g: gamers) são escassas.

A pesquisa contida nessa dissertação se desenvolve em um contexto pouco explorado da área - sistemas interativos com ICCs acessíveis financeiramente a usuários domésticos, e dentro de um escopo ainda pouco trabalhado - usuários que não possuem, necessariamente, dificuldades motoras.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação é composta de uma coletânea de trabalhos desenvolvidos ao longo da pesquisa. Os trabalhos são apresentados em suas versões revisadas e no idioma em que esses trabalhos foram originalmente escritos. A dissertação está organizada em seis capítulos, conforme descritos a seguir:

- **Capítulo 2 – *Survey of Interactive Systems based on Brain-Computer Interfaces*:** Neste Capítulo são apresentados métodos, termos, e tecnologias usadas na área de ICCs. Além disso conta com um levantamento do estado da arte de aplicações ICC para usuários finais;
- **Capítulo 3 – *Interfaces Cérebro-Computador sob a Perspectiva da Semiótica Organizacional*:** O Capítulo 3 apresenta uma análise dos envolvidos através do referencial teórico-metodológico da Semiótica Organizacional. Contando com um gráfico das partes interessadas, um quadro de avaliação com problemas e possíveis soluções de cada parte interessada, e uma escada semiótica com as questões sob a ótica de seis níveis (mundo físico, empírica, sintática, semântica, pragmática, e mundo social);
- **Capítulo 4 – *Design Rationale for BCI-based Game*:** Este capítulo agrupa e classifica jogos baseados em ICC encontrados na literatura. Baseado na análise desses trabalhos, um design rationale foi concebido. Este design rationale tem como objetivo auxiliar desenvolvedores e designers de jogos na utilização de ICCs no seu projeto;
- **Capítulo 5 – *AdmiralMind Battleship BCI Game: Design e Implementação*:** Neste capítulo detalhamos a concepção, design e desenvolvimento do jogo AdmiralMind Battleship. O jogo atua como um estudo de viabilidade e desafios do uso de ICCs neste domínio;

- **Capítulo 6 – Considerações Finais:** O último capítulo fecha a dissertação com um sumário dos resultados da pesquisa e suas contribuições.

## Chapter 2

# Survey of Interactive Systems based on Brain-Computer Interfaces<sup>1</sup>

### 2.1 Introduction

The evolution of technology provides significant changes in the way users use interactive systems. With the ever-increasing usage of tablets and smartphones, it can be observed that interaction between users and applications will take place through smaller displays and touchscreens. Whereas modern controls such as WiiMote and Kinect highlight the need for interaction adjustment considering user physical movements in their context of use to support appropriate utilization of systems. Therefore, design and development of interactive systems should follow new trends of technologies in order to provide better user experience, increasing productivity and offering intuitive actions for execution of different tasks.

With technological advancements different kinds of interaction which use our bodies have emerged, enabling the use of various body parts other than our hands. For example, Harrison et al. [43] demonstrated the possibility of using human skin as a touch interface, Nam et al. [96] presented a wheelchair controlled by tongue movements, and Liu et al. [70] proposed an eye-tracking system as well as several examples of eye-tracking for human-computer interaction. Also, Vernon and Joshi [127] propose using a muscle above the ear – which lost its function along with human evolution – to control a television. However, it is possible to go further and use a part of human body's central axis, already presented in all forms of human interaction: the brain.

Brain-computer interface is a research field been studied since middle of 70s in diverse areas of knowledge such as neuroscience, biomedicine, automation and control engineering and

---

<sup>1</sup> Este capítulo apresenta uma versão revisada do trabalho intitulado “A Survey of Interactive Systems based on Brain-Computer Interfaces” que foi publicado no SBC Journal on 3D Interactive Systems [34].

computer science. Meanwhile only recently cost and accuracy required for civilian use have been achieved. People with severe motor impairments are main beneficiaries of brain-computer interface researches, as persons with locked-in syndrome, i.e. a rare condition characterized by paralysis of voluntary muscles except for the eyes. Nevertheless, we realize that people without any disability are also potential users of solutions which promote interaction between humans and computers through cerebral signals, in the most possible natural way.

However, interactive aspects of BCIs remain poorly explored by researchers, probably due to the intrinsic complexity of areas involved in this research topic. New studies are coming out guided by some computing areas such as Human-Computer Interaction (HCI) and Virtual Reality (VR). A prime example is a work by Solovey et al. [119], which describes the use of brain-computer interaction in a multi-modal interface. Also, Friedman et al. [36] present a brain-computer interface with virtual reality. There is therefore a strong need for a detailed study to identify clearly and objectively current limitation of brain-computer interface from an interactive perspective.

Millán et al. [88] present a brain-computer interface review focused on motor substitution with neuroprostheses and recovery through neurorehabilitation. The authors discuss brain-computer interface applications in an assistive technology context, such as using sensors in a wheelchair for better brain-computer interface control. Lotte et al. [75] review and explore brain-computer interface works that use VR, focusing on the design of brain-computer interface based on VR applications. In this work, we discuss brain-computer interface solutions in an interactive perspective, such as evaluation of user's cognitive workload and the lack of freedom regarding visual attention. Furthermore, our work focus on HCI and VR aspects, while taking in consideration both healthy and impaired users. Afterwards, we identify and discuss several challenges in this context.

This Chapter is organized as follows: Section II contextualizes brain-computer interface area, introducing basic concepts and technologies; Section III presents a survey of brain-computer interface; Section IV presents several challenges related to brain-computer interfaces; Section V discusses this research topic; and Section VI concludes the chapter.

## 2.2 Brain-Computer Interface

Brain-Computer Interface (BCI) is a mode of interaction between human beings and computers which does not use any muscle, since system is controlled through user's mental activity captured with specific equipment. According to Wolpaw et al.[133], BCI is a communication system with two adaptive components that mutually complement each other. For these authors, at the current technology stage, users should fit into BCI to control the system since it should adapt itself to

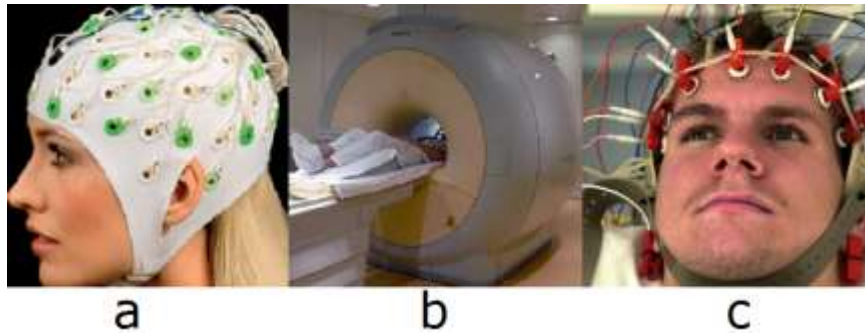
user's mental signals. Hence, user must understand the system which must adjust itself to user, both required for BCI to succeed.

BCI requires reception of brain signals captured directly from human brain. There are **three different ways to capture** these signals, i.e. (i) invasive, (ii) partially invasive, and (iii) noninvasive. **Invasive capture** is characterized by introduction of implants into user's encephalic mass, directly into the gray matter, providing high quality signal reading; however it causes great inconvenience and risks to human health. In **partially invasive capture**, implants are placed beneath the skull without drilling the brain. Despite its lower quality signals, this signal capture form presents lower risks to health as compared with invasive approach. Lastly, **noninvasive capture** enables gathering information without any implant since sensors are placed on the scalp, fully external to the body. Noninvasive BCIs are more convenient and easy to use, and due to technological advancements of current solutions, provide good quality signal capture. It is also the only one to not present risk to users' health. For this reason, this work focuses only on noninvasive BCIs.

There are three most common **techniques to obtain cerebral information**, i.e. (i) electroencephalogram (EEG), (ii) functional magnetic resonance imaging (fMRI), and (iii) functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). With **EEG**, brain activity is captured through sensors called electrodes. It is possible because neurons communicate with each other via electrical signals, which eventually reach brain surface and then are captured by electrodes. The **fMRI** technique measures brain activity through blood oxygenation and flow, which increase in the specific area involved in mental process. This capture technique requires usage of equipment with considerable dimensions and a scanner with a large magnetic field. And **fNIRS** method also measure brain activity through blood oxygenation and flow, but it is based on identifying variation of optical properties in brain images. Near-infrared light is sent into the user's forehead and, through light detectors, the reflected rays are picked up and correlated to specific concentration of oxygen.

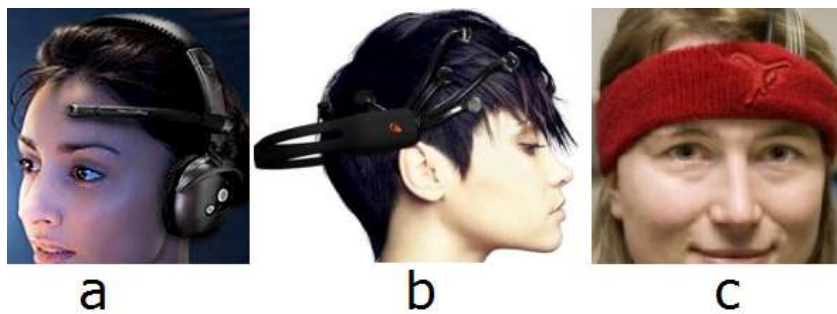
Fig. 1 shows different equipment to gather cerebral information in a noninvasive way with the above mentioned techniques, i.e. EEG electrodes capturing electrical signals (Fig. 1a), scanner fMRI with magnetic resonance imaging (Fig. 1b), and spectroscopic sensors with near-infrared radiation (Fig. 1c). Nowadays, only EEG and fNIRS enable to gather cerebral information in a real usage scenario due its relative low-cost and portability. Moreover, EEG has the best temporal resolution, which means that it captures signals faster than others, and hence this method is the most used in BCIs.





**Figure 1. Noninvasive equipments used to capture cerebral information (a) EEG electrodes (b) fMRI scanner (c) spectroscopic sensors. Sources: [1]**

There are different capture devices, which vary greatly in shape and may be a cap, tiara, headband, helmet, or even loose electrodes. In this work we unify all these terms in a single one: headset. Hence, we consider as headset a set of sensors placed on user’s head. For marketing purpose, companies have been developed more portable headsets with attractive designs at lower costs. These devices aims to provide greater comfort as compared with equipment showed in Fig. 1. In 2009, NeuroSky<sup>2</sup> has launched MindSet, a wireless headset with a single EEG electrode and capable of measuring user concentration. This company has others headsets available such as MindWave, launched in 2011. In 2009, other company named Emotiv<sup>3</sup>, launched EPOC: a wireless headset in a tiara format. EPOC has 14 EEG electrodes and a gyroscope, which measures head movements. BCI researches with fNIRS in real usage scenarios usually use sensors covered with a headband in order to maximize comfort. Fig. 2 shows some BCI headsets, i.e. NeuroSky MindSet (Fig. 2a), Emotiv EPOC (Fig. 2b), and fNIRS sensors covered with a headband (Fig. 2c).



**Figure 2. CI headsets (a) NeuroSky MindSet (b) Emotiv EPOC (c) fNIRS sensors covered with a headband. Sources: [38],[1],[119].**

### 2.2.1 Thoughts Recognition

BCIs require recognizing a thought or mental activity in order to activate an action. An ideal scenario should be to think about turning a lamp on and then, BCI system recognizes this thought and turns a lamp on automatically. Currently, recognizing specific thought such as “turn

<sup>2</sup> <http://www.neurosky.com>.

<sup>3</sup> <http://www.emotiv.com>.

lamp on” is still very difficult. However, there are **three mental activities** recognized with certain precision, which are commonly used on BCIs applications, i.e. (i) **concentration**, in which *Alpha* and *Beta* waves are used to estimate user’s attention and relaxation/meditation, (ii) **stimulus response**, in which brain responses are detected when user focus on certain flashing graphic elements (visual stimulus) and/or special sound patterns (sound stimulus), and (iii) **imagined movement**, in which is possible to detect kinetic thoughts, such as imagining your right hand opening and closing, due to the synchronization and desynchronization of *Mu* rhythm.

The **detection for a stimulus response** (ii) is subdivided into two types, i.e. oscillating stimulus and transient stimulus. In **oscillating stimulus**, elements are differentiated by frequency, such as LEDs where each one flashes – oscillates – in a different frequency, inducing a natural response from brain and generating electrical activity in the same or multiple frequency of stimulus. Other example of oscillating stimulus is in the case of two sounds from different frequencies, which generates a specific response to the focus in each one. The response for a visual oscillating stimulus is called Steady State Visually-Evoked Potential (**SSVEP**) and a response for a sound oscillating stimulus is called Steady State Auditory Evoked Potential (**SSAEP**). **Transient stimulus** are differentiated by response to a transition from a visual/sound state to another. When an individual waits for a certain stimulus among other similar stimulus, a wave called **P300** is generated as a response. An example would be five squares, off most of the time, which each one turns on for a short time and turns off again. User concentrates in one square and when this square turns on, a P300 wave is generated due to the small “surprise” caused by the transition from off to on. Likewise, it is possible to identify a user’s response when listening a sound repeatedly and then suddenly, a different sound occurs.

One of the first visual stimulus-based applications commonly used in tests is typing, called speller. In this test, screen contains letters from ‘A’ to ‘Z’ arranged in a grid/matrix and user must concentrate in a specific letter. BCI recognizes which letter and presents it to user. Then, user can focus and concentrates in other letter and therefore, letter by letter to form words. In SSVEP-based BCIs, each letter flashes intermittently in different frequencies, whereas in P300-based BCIs, one line/column flashes at time in a random pattern. When the line corresponding to the user’s chosen letter flashes, P300 wave is recognized, indicating that user is focusing on that line. Likewise, when the column flashes this wave is identified. Thus, with both the line and column recognized, it is possible to identify the letter chosen by user. Fig. 3 shows two different spellers which enables word entry like as a keyboard. In Fig. 3a the speller is used on P300-based solutions and Fig. 3b illustrates a speller for SSVEP-based solutions.



Figure 3. Spellers based on (a) P300 (b) SSVEP. Sources:[104],[51]

In BCIs, **processing** can be performed online and offline. **Online processing** occurs in real time while the user utilizes a BCI and **offline processing** is performed after user experiment with a post-processing approach in order to obtain the maximum precision. There is also a BCI classification regarding **rhythm**, i.e. synchronous and asynchronous. In **synchronous BCIs**, commands are interpreted at a constant time rate. Therefore, after every certain amount of time, a command is recognized regardless of user's intent. Whereas **asynchronous BCIs** – also called self-paced – give control to the user to recognize a command only when wanted.

We consider pertinent presenting some fundamental concepts of the BCI area in order to provide a refined understanding about the literature works presented in this survey. The objective of this background is to present a theoretical overview, not an introduction tutorial about BCIs. The following section presents a survey that comprises a relevant part of the literature about this research topic.

## 2.3 Survey

The survey presented in this work describes works which address new BCIs. These interfaces are related to daily task accomplishment, now possible through cerebral waves. Therefore works presented demonstrate the potential of new interaction forms with interactive systems through BCIs. Moreover, to a greater identification of proposes and challenges of this research area we grouped works according detection approach it utilizes, i.e. (a) visual stimulus response, (b) sound stimulus response, (c) concentration, (d) imagined movement, and (e) neurofeedback.

The search strategy consisted of automatic and manual searches in scientific libraries and bibliographic databases. Automatic search was conducted in IEEE Xplore, ACM DL, Springer, Elsevier, Scielo, Scopus, ISI Web of Knowledge, and also in Google Scholar; manual search was made in PLoS Biology and Frontiers in Neuroscience Journals. In the search process we used a combination of the following keywords in English (presented in this work in alphabetical order): BCI, brain, computer, HCI, human, interaction, interface, reality, virtual, and VR. For this study we select only recent works, i.e. paper published in the last five years.

### 2.3.1 Visual Stimulus Response

Mauro et al. [85] exhibit the use of a BCI to control the cursor of a desktop operating system. They implemented two BCIs based on P300, one exogenous and other endogenous; in an exogenous interface the user focus is external, while on an endogenous interface the user focus should be at the center (internal). Both interfaces allow four movement directions with four squares – one in each side – representing position objectives for testing purposes. On the exogenous interface, those squares flash, and the user has to focus on the square in desired

direction. The squares do not flash in the exogenous interface. Instead, one letter is showed on the center of screen, alternating between the initials of Italian words for directions, i.e. *alto* (up), *destra* (right), *basso* (down), and *sinistra* (left). The user has to count the occurrences of the letter representing the desired direction. Eight patients, half healthy and the other half in advanced state of paralysis, participated in the experiment. Results demonstrated that there was no difference on the precision of the healthy group versus the paralyzed one, which indicates that the interfaces devised do not depend on motor abilities.

Hood et al. [50] developed a BCI control for a car driving virtual simulation using CARRS-Q. CARRS-Q simulator consists of a platform with 180 degrees frontal projection and three simulated mirrors. The BCI uses three LEDs as SSVEP stimulus, each one offering a configurable command. One possible configuration would be with three LEDs, i.e. one to right steer the wheel, another one for left steering it, and the last for straight steering. It reached good precision rates but still cannot be applied in real situations, because it is not safe enough. In the authors opinion, a virtual ambient will be essential for improvements on the interface and safety guarantees of future car-driving BCIs. Fig. 4 showcases the system being used.



Figure 4. BCI for car driving in virtual simulator CARRS-Q. Source:[50].

A different BCI application is a web browser created by Mugler et al.[93]. The BCI is based on the P300 and follows Mankoff et al. [78] web usability needs. For Mankoff et al. 77 all web browser systems must offer the following features: web navigation, page navigation with fewest commands possible, history browsing, bookmarks, and text input. In addition to those ones, the authors add functionalities like an URL bar. Speed is considered an interesting factor but not a need. Another BCI web browser is the one created by Xu et al.[134], which uses the SSVEP approach. The application allows searching in Google and inputting text. The authors mounted a hardware, in which a small LED board with six LEDs is attached on a conventional notebook. Each LED represents an option and these LEDs are used to input characters, to navigate a 6x6 menu, and to select web browsing commands like “next URL” and “HOME”. The interface achieves great precision (92%) but it is very slow (four and a half minutes for a simple Google search). Although the described application is interesting, Liu et al. [70] argue that SSVEP BCIs have a fatigue factor due constant and intermittent flashes. For this reason, these authors created an alternative BCI. Like the usual SSVEP, the interface uses a visual stimulus differentiated by

frequency and also a movement frequency instead of the usual light frequency. According to the authors, this new SSVEP interface offers an increased comfort with a good precision (83%).

Ceccoti [17] developed an asynchronous BCI speller based on SSVEP. The speller objective was to achieve an intuitive system where even inexperienced users could successfully use it, while causing the least possible discomfort. Therefore, the letters are divided into groups and what flashes is the contour of those groups. The system automatically configures the BCI and the asynchronous nature of the interface leaves the user more relaxed. Another interesting work is the one presented by Campbell et al. [15] that proposes the NeuroPhone, a iPhone application in which phone calls are made through a BCI using the EPOC. A contact photo grid is showed to the user and one photo flashes at time in a P300 fashion. Then, the user focuses on the contact to call. Fig. 5 shows the process of calling a contact.



**Figure 5. Contacts flash, one by one, detecting the user visual focus. A phone call is made to the chosen one. Source: [15].**

A remote robot is controlled in the SSVEP BCI made by Gergondet et al.[37]. In this system, a real-time video displays the robot “vision”, i.e. a camera coupled on the robot. On the controlling machine – notebook – the interface mixes the robot vision with four red squares at the four sides – top, bottom, left, and right – that act as the visual stimulus. Focusing on one of these directions, the robot increases speed in the same direction. For testing purposes the authors use a robot benchmark known in the robotic area as SLALOM, the robot BCI successfully passes in the benchmark test. Yuksel et al. [137] employ a P300 BCI for object selection. These objects are arranged in a multi-touch table display and a computer vision algorithm computes the approximated shape for each object. This shape is expanded and flashed under the object following the same process in P300 spellers with an object grid instead of a letter grid. Fig. 6 exhibits the BCI table in action.



**Figure 6. Multitouch display interface, where objects are enlightened one by one, triggering a P300 wave.**  
Source: [137].

Grierson e Kiefer [38] test MindSet – conventionally used to detect concentration – for a BCI based on P300. The efficacy was benchmarked through an experiment, in which two squares – one blue and one red – take turns flashing and the BCI has to detect which one the user is focusing. With squares of same size the precision is good (78.5%), while with squares of different sizes the precision is close to 100%. The results indicate that it is possible to use a commercial headset for BCI applications based on visual stimulus. Wang et al. [130] developed a smartphone BCI application based on SSVEP for calling contacts by number typing. The interface contains numbers 0 to 9, a confirmation option (Enter), and a correction option (Backspace). Frequencies between 9 and 11Hz are used as visual stimulus. Normally those frequencies cannot be achieved in a smartphone due to screen refresh rate but the authors employ a special technique of black/white alternating patterns to circumvent this restriction. A good precision was achieved (close to 100%).

Hakvoort et al. [42] implemented a SSVEP BCI game, whose goal is to lead sheep into a sheep pen by controlling shepherds dogs. Kapeller et al. [54] remark the importance of analyzing BCIs in a distracting context. They did a benchmark where a user has to focus on SSVEP visual stimulus, overlaid on a movie. The experiment showed that some precision – 6% on average – is lost in this distraction context. One of the participants had a very large loss of precision (40%) and according to the authors this indicates that some users are more sensible to visual distractions.

Escolano et al. [30] developed a BCI telepresence system, wherein a robot is remotely controlled from a different geographic location. A camera on top of the robot shows his current “vision”. The BCI is based on the P300 and the graphical interface imposes options as augmented reality on the robot vision with commands like “turn left” appearing as icons. Besides the camera, the robot is also equipped with a laser sensor, wheelchair and a location tracker based on measurements of the rotations of the wheel. The BCI developed has two operating modes: robot navigation, where a point grid is used as Visual Stimulus for choosing a destination and camera exploration, in which the point grid is used to indicate where the camera should look at. Five users participated in an experiment, having to navigate the robot through close space situations, all users managed to control the robot successfully to the final position.

An assistive BCI application is the one by Grigorescu et al.[39], where the interface controls a robotic assistant for helping people with motor deficiencies. The system is named by the authors as FRIEND (Functional Robot with dexterous arm and user-frIENDly interface for Disabled people). The BCI was an addition to a new generation of the robot system to supply quadriplegic needs. FRIEND combines several modules, i.e. wheelchair, robotic arm with gripper, EEG headset, monitor and camera (used for machine vision). The BCI uses the SSVEP approach, where five LEDs act as visual stimulus, each one representing a menu option. FRIEND is a semi-autonomous robot and has two modes, i.e. (i) complete autonomous mode, wherein objects are automatically recognized and manipulated, and (ii) shared control mode, where the user assists the system with ambient information, like approximate object positions. System performance is measured in four scenarios: prepare and serve a drink, prepare and serve a meal (showed in Fig. 7), tasks at a library service desk, and tasks for keyboard maintenance (checking if they're working correctly). Those tests indicate that Friend still needs improvement for real world usage but it has great potential.



Figure 7. A user selects the “prepare meal” in the FRIEND BCI system. Source: [39].

Kaufmann et al. [56] developed the Optimized Communication System, a P300 BCI speller where a single button automatically configures and adjusts the system. The user presses the button one time to start EEG signal capture, and a second time to stop the capture and use the data collected to configure and calibrate the system. It also improves on other spellers in information transmission speed through word auto completion – the word prevision was written in Python –, the complete words appear together with the letters in the grid. Following the idea of less configuration as possible, the application creates the word base automatically - navigating the web and computing word frequencies for a determined idiom. Poli et al. [107] take BCI domain to space interaction, creating an spaceship navigation BCI controller. BCI usage on space applications have great potential since they allow piloting, collaboration and machine control without the, in several situations restrict, movement of hands. The developed BCI uses P300 approach with an innovative graphical disposition. Eight gray circles form a greater circle and one by one is flashed to red or green – randomly selected – color. Three volunteers participated in a simulation, whose goal was to make a path with the ship, passing as close as possible to the sun. The authors also devised a cooperative mode, in which the control is made simultaneous by more than one person. On the experiments the cooperative mode had better precision than the single-

person mode. Still, the BCI developed has to improve to achieve high-enough precision for real world usage. Nevertheless, it is an excellent result and offers an optimistic vision for future BCI space applications.

Edlinger et al. [27][28] developed a domotics BCI application based on a hybrid approach, using SSVEP for turning on and off the application, while using P300 for command selection and activation. They define four requirements for domotics BCIs, i.e. (i) signal amplifiers must work even on noisy environments, (ii) EEG capture has to be made with a portable device, to avoid collisions and user irritations, (iii) for real time experiments it's necessary to connect the BCI to a virtual reality simulation, and (iv) the communication interface between BCI and VR needs to offer a satisfactory degree of freedom. In the VR the user is equipped with 3D glasses and a head-position tracker. EEG signals are captured through g.MOBillab+ amplifier, those are send to a PC which controls the virtual ambient using XVR (eXtreme VR). Video output is projected into a high resolution surface (powerwall). The virtual ambient is composed of three rooms, each one with controllable devices like television, music player, telephone, lights and door. Commands are divided into seven categories: lights, music, telephone, temperature, television, move and “go to”. Each of those categories act as an interface “mask”, one screen that has only the relevant commands for that category. Fig. 8 shows the BCI and controlled virtual ambient.



Figure 8. A (a) P300-based BCI for controlling (b) a virtual domotics environment. Source: [28].

### 2.3.2 Sound Stimulus Response

Lotte et al. [76] developed a sound stimulus based BCI using a P300 approach. Their objective is to present a BCI efficient in a scenario of great mobility, where concentration in a visual stimulus is a hard task and user movement can cause interference on EEG capture, since movement is responsible for a great part of brain electrical activity. The BCI developed uses two sounds as stimulus, one rarely appears – a ring bell sound (“Ding Dong”), while the other sound frequently plays – a buzzer sound. The user has to focus on the ring bell sound, counting the number of occurrences, eliciting a P300 wave each time the sound plays. They conducted an analysis to identify movement interference on P300 detection and three movement states were tested, i.e.



sitting, standing and walking. Experiment results were promising: no significant precision was lost due to movement interference and a good EEG capture was possible in all states tested.

On the work of Kim et al. [58] a BCI based on steady state evoked potential was conceived. However, sound frequency (SSAEP) was used instead of the usual visual flashes frequency (SSVEP). Two sounds of different frequencies are used, each one in different sides of the user – left/right – to strengthen contrast between them. A good precision was achieved, 71% online and 86% offline. One disadvantage of such sound based BCIs is the binary choice, i.e. the user can only choose between two options (sounds). Hill and Schölkopf [46] research ways to improve sound based BCIs. They use the same approach of SSAEP – sound frequency – combined with spatial location – one on the left of the user, the other on the right – in a way that resembles the “surprise” associated to P300 approaches. Their BCI achieves higher performance, obtaining 85% precision online.

### **2.3.3 Concentration**

Coulton et al. [23] created a smartphone game named Brain Maze, which uses BCI as one of the controllers using the MindSet. The game objective is to move a ball from a start point to a finishing destination. Moving the ball is done through accelerometer, but some obstacles need to be overcome using a BCI. Some paths are blocked by closed gates. There are two types of gates, i.e. attention and meditation gates. The user has to increase concentration to open attention gates, while he needs to relax to open meditation gates.

Marchesi [79] presents a BCI prototype for interactive cinema, the Neu system. Neu system measures the user degree of concentration/relaxedness using a MindWave and those measurements affect course of events in the history of the interactive movie. Neu is an evolution of MOBIE System, developed by the same author. Mobie monitors and records the degree of concentration/relaxedness of the user while he watches a movie. From this feedback the user engagement in each scene is obtained. Neu takes this concept one step beyond offering, in the authors' viewpoint, a BCI interactive, immersive, and personal experience.

### **2.3.4 Imagined Movement**

Poor et al. [108] assess EPOC capacity in a BCI based on the imagination of kinetic actions. On the experiments the objective was to rotate a cube after an initial brain signal recording and calibration. The precision was low (59%) but the authors attribute the cause to training lack and immaturity of Stimulus-Less BCI systems and techniques. Friedman et al. [36] conduct research on navigation in a cave virtual environment based on imagined movement. The VR consists of a street with people spread out and stores on the sides - those can be projected in stereo view shutter glasses for increased realism and experience. To walk, the user has to imagine the user

feet moving, while head rotation – tracked through an accelerometer – is used for changing walking direction and imagined hands movement – to pass the impression of “touch” – is used for interacting with other persons on the street. The virtual people remain at still until the user interacts with them. In that instant, they start to walk to indicate interaction success.

One of the first authors’ experiments [66] was conducted with a quadriplegic patient, who successfully moved across the virtual environment as displayed in Fig. 9. Another experiment [102] with 10 participants compared BCI precision in two different scenarios: a controlled choice scenario and a free choice scenario. In the first one, user receives a sound cue for the action he must realize and in the other one, user freely chooses which action to perform. The precision on the controlled choice scenario was higher (82.1%) than the free choice scenario (75%), which presents a challenge to be overcome, since freedom of choice is essential in interactive systems.



**Figure 9.** User walks in a virtual street imagining feet movement. Source: [102].

Leeb et al. [67] leverage a conventional game – i.e., which was not originally designed to work with a BCI controller – named PlanetPenguin Racer. In the original game a penguin is controlled to descend a snow mountain, collecting fishes on the way. The game was modified to float all the fish, suspending them mid air. Jumping is the only way to catch the fish in this new version and to jump, user has to imagine feet movement. For increased immersion the game happens on a cave virtual reality, where the user is surrounded by walls with projectors directed to each one of them. As such, the game uses a multimodal interface: the penguin’s direction is controlled by a joystick and the jumps by BCI. An experiment with 14 users demonstrated that concomitant use of joystick with BCI did not decrease BCI precision. Furthermore, leg positioned sensors proved that jumps – BCI control – did not use any muscles. A pure joystick control achieved highest precision on catching the fish, as expected by the authors. However, the majority of users preferred the BCI controls, remarking the fun of jumping only through mental power. According to authors, the game needs only a short time of training, being entertaining without leaving the player bored with long sessions of training.

### 2.3.5 Neurofeedback

Vi and Subramanian [128] were able to detect an electrical potential called Error-Related Negativity, caused by user frustration when an interaction does not occur as planned. An example is when the user tries to select an option among others but misses, by user or system error, and chooses one he did not want, getting the user frustrated. A BCI detecting this frustration – through Error-Related Negativity potential – a system could try to auto-correct the interaction error, choosing the closest option of the one miss-selected. An experiment was made to measure the precision of successfully detecting this potential. The authors choose to analyze the precision through an interaction test known as Superflick, where a user has to “throw”, with a drag-and-drop movement, a small ball into a big target ball. If the user misses the target the system must auto-correct the interaction, trying to achieve a most satisfactory state for the user. The BCI application conceived achieved 70% precision, and proved that is possible to detect interaction errors, and use this information to provide a better experience for the user, compensating the error with an action rollback, giving a small advantage to a player, or selecting close objects. Fig. 10 shows a user participating on the Superflick test, “throwing” a ball while the headset captures the user frustration.

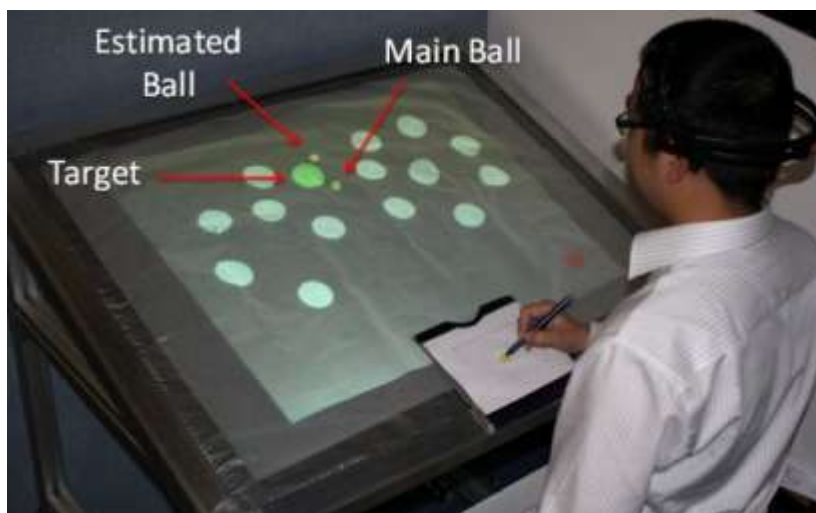


Figure 10. Superflick interaction test using a BCI for auto-correction. Source: [128].

Solovey et al. [120] created a BCI application – Brainput – that avails the priority of tasks being done by the user. This priority is estimated through detection, using fNIRS sensors, of three mental states of concurrency, i.e. (i) branching, when the current task is interrupted, and replaced, by another of increased priority, (ii) delay task, where a user receives another task but chooses to ignore it, implicitly indicating that few resources must be allocated to that lower priority task, and (iii) dual task, where the user works on two tasks of same priority, and constantly switch between them. The BCI system conceived by the authors adapts to allocate more resource to tasks of higher priority. For testing this BCI an experiment was made with 11 users, they needed to remotely control two robots, one blue and one red. They could only control

one robot at time, switching between them. Both robots expanded resources to move, and had to reach a specific destination and send a signal. A priority was assigned to each robot, and performance was compared between a Brainput interface doing the robot control switch, and an interface where the robot where more autonomous. The results showed the Brainput interface as the better one.

### 2.3.6 Summary

Table I summarizes 29 interactive systems based on BCI presented above and grouped in this table by year of publication. As previously described, BCIs go beyond of computer control, comprehending domains such as domotics, assistive interfaces, robot control and electronic games. It is important to highlight that most of stimulus-based BCIs uses a visual form due to its higher precision. Table 1 shows approach used by BCI classifying works in (V)isual stimulus, (S)ound stimulus, (C)oncentration, (I)magined movement, and (N)eurofeedback.

**Table 1. Literature works presented in this survey.**

Work		Detection approach	Brief description
Year	Ref.		
2007	[66]	I	Avatar control/walking in a virtual street
2009	[134]	V	Web browsing and speller
	[76]	S	BCI control while walking
2010	[92]	V	Web browsing
	[70]	V	Web browsing and speller
	[17]	V	Asynchronous speller
	[1]	V	Call a contact through smartphone
	[137]	V	Object selection in a real ambient
	[130]	V	Phone dialing
	[36]	I	Avatar control/walking in a virtual street
2011	[85]	V	Mouse control
	[37]	V	Robot control with real time vision-camera
	[38]	V	Headset benchmark
	[42]	V	Sheep game
	[28]	V	Domotic control in a virtual house
	[58]	S	SSAEP benchmark
	[23]	C	Smartphone Maze Game
2012	[108]	I	Commercial headset benchmark
	[30]	V	Telepresence robot with vision-camera
	[39]	V	Auxiliary robot for disabled people
	[56]	V	No configuration speller with word prediction
	[27]	V	Domotic control in a virtual house
	[50]	V	Car control on virtual CAVE simulation
	[46]	S	SSAEP + P300 benchmark
	[79]	C	Interactive movies
	[128]	N	Superflick interaction test
2013	[120]	N	Resource control through brain concurrency detection
	[107]	V	Spaceship control in a virtual simulation
	[67]	I	CAVE VR game

## 2.4 Challenges

Through reflection on the BCI literature review, we identified several challenges with implications for user interaction. These challenges must be faced in order to BCIs been used in a more effective manner with interactive systems. To a better understanding, we grouped challenges in topics.

Most of existing BCIs causes a **high level of fatigue**, demanding **high concentration or attention** to quick and intermittent stimulus. In addition to fatigue inconvenience, BCI may not work since user cannot reach enough level of concentration. In [44], Hasan and Gan try to assure BCI's operation even when user is tired. The BCI implemented by these authors properly monitors user performance and when it declines, system activates an adaptation which reduces the concentration limit necessary to interact with system. The use of VR in BCI applications may assist in this process, providing a high immersive environment. It motivates the user while interacting with the system, consequently increasing users' attention and concentration levels.

Concentration required to stimulus also causes a **mixture between input and output** since mental activity is being constantly monitored and user's focal point changes the input. Instead of relax, user must concentrate on a point as input and look to the output. For example, a user watching a movie; the user has to look at a specific point on screen instead of a part of scene that the user wants to see. At this stage, interaction has a forced aspect, instead of natural aspect presented in the case of user may decide which region of visual output the user wants to focus. A similar challenge occurs with traditional interactions since interaction flux often depends on user perceiving certain feedbacks, mainly the ones issued by computational system. In VR environments this issue is exacerbated since the lack of visual freedom may disrupt the immersion. This challenge is also applied in other 3D environments such as augmented reality, which may bring other problems such as safety since user has to focus on a certain point and may not pay attention in what comes ahead.

According to Wolpaw et al. [133], with current BCI technologies, users must fit themselves into the system in order to control it; speed and satisfaction of this adjustment depends on system's intuitiveness. During tasks accomplishments on applications, the study of user's visual focus and intuitiveness of graphical interface are conducted by HCI researchers. These researchers must apply HCI techniques in BCI context in order to develop a visual interface with as fewer nuisances as possible regarding constant transitions of user's visual focus and also easy-to-use, providing a fast user's adjustment to the system.

Using a BCI system is often a **complex task**. It is necessary to verify electrodes' position on user's head and configure different parameters before using the system. Furthermore, users must know which technology is best suited to their needs, including purpose and profile. Randolph [28] evidences that factors such as gender, caffeine and experience on videogames or

musical instruments, affect mental states and waves, which are tracked by capture technologies. Hence, different people may have different needs regarding BCIs, which makes the use of this kind of interaction in a practical way even more difficult. 3D environments technologies are also impacted by this challenge since technology which provides the best user experience may vary for each user. So, when mixing both 3D and BCI technologies, user's needs must be considered carefully.

In most cases BCIs **do not provide mobility** to users. Users must obligatorily remain at still and quiet, preferably sitting down, during test application. However, in a real using situation user may need to use BCI while the user walks on the street in order to control a smartphone, for example. In addition, BCIs must also provide comfort to user. An EEG headset must be easy to carry on and simple to use on daily routine, as well as a person uses a headphone to listen to music. An EEG headset must be lightweight, not only to provide mobility but also to enhance use experience; its weight must not be uncomfortable to user. Other significant inconvenience is caused by a gel, which is applied on electrodes in most of EEG headsets in order to enable signal capture, even though Guger et al. [40] indicate that dry electrodes are priority to user. To meet this requirement, authors present a non-commercial EEG headset with dry electrodes and high precision.

Another similar challenge is the possible **conflicts between different interface devices**, i.e. using a Head-Mounted Display (HMD) together with an EEG headset can prove to be difficult given that the EEG sensors must stay on position. Choosing an EEG headset becomes a complex task if we consider mobility and comfort requirements. Equipment presented in Fig. 1 and Fig. 2 must be redesigned to be used in real situations. Some of equipment use wires or cables, and most of them require application of gel or saline substance to capture mental signals with high precision. The contribution of HCI in this BCI issue is exactly proposing the redesign of such equipment considering, for example, accessibility, usability, and ergonomic aspects. An ideal BCI headset must not use wires or cables, which hamper mobility; neither use gel or saline solutions, which are one more component to be carried on and make headset's use more difficult. We understand that this device must be lightweight and without additional parts, for example, batteries.

In BCIs, system needs to constantly adapt itself to user's signals. This adjustment must be fast and with precision. Current BCIs present a **very low information transmission speed rate**, being necessary, for example, almost two minutes to "digitalize" a simple word. Nowadays, this challenge is minimized with the use of word completers, accelerating the speed, as described in [56]. The **BCI precision does not always reach a satisfactory value**, mainly in BCI based on visual stimulus. Sometimes, actions repetition or undo are required, causing discomfort or even discontent in the usage of interactive systems with this kind of interface. The sum of these factors may generate frustrations to user and, consequently, resistance to the BCI usage. Furthermore, the performance of low-cost BCI commercial devices must be investigated, such as EPOC which

presents less electrodes than other EEG headsets with medical purposes. In a comparison performed by Al-Zubi et al.[1], this headset with 14 electrodes presented only 5% fewer precision than a professional EEG headset with 128 electrodes.

BCI tests and experiments are often conducted in **controlled environments, in laboratory**, that **does not correspond to the real context of use** of desktop computers, where users usually perform different tasks in parallel and work simultaneously, breaking their concentration constantly, either to answer the phone or to fetch a glass of water. This fact seems to demonstrate that currently asynchronous BCIs have more advantages in real situations, since they provide greater facility to the user when performing tasks in parallel, without prejudicing interaction with computer.

BCIs with wireless headsets are more practical and comfortable. Many manufacturers state that EEG signals are encrypted before transferred to device. However, it is necessary to note that, in a future with massive use of BCIs, cryptography breaking enables attackers to capture cerebral waves, which transmit not only commands but also mental states and feelings. As BCI area progresses, this challenge has more severe consequences since the higher the precision and greater the amount of information, the greater is the risk of privacy loss. Looking forward, when BCI technologies reach advanced stage, information espionage will no longer use phone tapping and network sniffers. Instead, it will use mind tapping and cerebral signals sniffers. Thus, with research advancements, new challenges arise and the presented survey is taken as starting point to development and evolution of BCIs.

### 2.4.1 Discussion

The brain is in constant activity and humans think all the time, even while they are asleep or dreaming. When a person uses a computer, an information wave is lost, e.g. concentration level, frustrations, cognitive workload and user's tension. This information could be used in BCIs, enabling interactive systems to adjust to their users, for example, changing the amount of text and figures [100], changing desktop screen sizes to control resources [120] and to offer more space to important applications, identifying and correcting interaction mistakes [128], choosing a more suitable video to user [135], or even presenting more relevant information based on the user cerebral activity.

Invasive BCIs based on implanted chips using biocompatible materials are mature enough to enable monkeys to control a mechanical arm only with thought, as for example presented by Carmena et al.[16]. However, it requires a long period of training. Also, the invasion levels, costs and health risks make it an unviable procedure to healthy humans. Whereas noninvasive BCIs are not mature enough to be used as a single input, although it may already be adopted on multimodal interfaces efficiently in real usage scenarios. In addition, BCIs without stimulus, in which a simple thought would control an entire system, are the most desired ones. However,

with current technologies, without stimulus, it is only possible to recognize mental states with certain precision, such as concentration.

Thus, based on the BCI literature review, we identified that most of noninvasive BCIs depends on visual stimulus to reach satisfactory precision and speed (see Table I). Such a care with design becomes even more important in these interfaces, since input/output depends on system's graphical interface. BCIs based on sound stimulus also face a similar difficulty, because these BCIs require a special concern regarding warning sounds in order to sounds do not disturb the feedback to sound stimulus.

There are no ready-to-use models in which we can model interaction between users and computers via brain waves. It is henceforth necessary to develop methods, techniques, approaches and technologies to greater support works in this area. The interaction documentation of a specific user based on information captured from user's brain may be used to evaluate interfaces and indicate, as a result, the system's intuitiveness. Moreover, user's behavior pattern directly captured from brain activity may contribute to enhance the interaction quality of adaptive interfaces since system may learn about user's behavior and automatically provide a molded interface.

For widespread use of this interaction form, it is necessary to face current limitations and overcome its challenges. Whereas precision involves partially HCI area, concentration, speed, comfort, environment, difficulty in its usage, and privacy are constant concerns of interactive systems. The fact that most of works using noninvasive BCIs needs visual stimulus increases the need of a greater concern from HCI and VR communities in BCI research. Even in BCIs without visual stimulus, these areas may contribute since it is important to consider the feedback, making the command more intuitive with HCI and more immersive with VR. BCI technologies are a fundamental step to more transparent ubiquitous interactions, in which we'll control different devices simply by our "will". Through capture and identification our thoughts, no effort will be required in daily interactions with devices. Using muscles will not be necessary, except those ones responsible for vital activities of organism, such as involuntary movements of heartbeat.

We believe that, if HCI knowledge is associated from the beginning, it is possible to advance toward more comfortable, suitable and easy-to-use BCIs, so that users may have a higher degree of satisfaction in interactive systems. Our research group is exploring this area, in order to purpose new BCIs guided by human factors, which are involved in this high complex form of (brain)human-computer interaction. In the same way, we believe that the area of VR plays a vital role in brain-computer interactions, providing an immersive environment, easing movement imagination and increasing focus on visual stimulus.



## 2.5 Conclusion

This Chapter presented a survey of BCI and additionally, based on this review, we identified and discussed several challenges for BCI in the interactive systems context. We believe that these challenges must be addressed so that BCIs may be adopted in interactive systems more effectively. Furthermore, due to advancements and price reduction of headsets, BCIs will be common in the near future as well as other kinds of interface/interaction are today, for example, such as those provided by mobile devices and by Kinect.

We are aware that thinking about interaction design in this domain involves various areas of knowledge, especially to reach its full potential. However, it is important to point out that HCI can contribute to the expansion of knowledge frontiers; outcomes achieved with this study is a concrete example since it enhances the importance of this review and outstands the merit of literature works. Considering different related areas and the diverse use possibilities of BCI, this research topic deserves greater attention from both HCI and VR communities in order to undertake further studies on interaction in BCIs.

As future works we make an interaction design study and we will implement a visual stimulus-based BCI game for use with a low-cost noninvasive EEG headset.

## 2.6 Tomada de Decisão

Depois de levantarmos o uso de ICCs na literatura, assim como seus desafios de interação, demos continuidade ao objetivo principal - O estudo, design, e desenvolvimento de um jogo baseado em Interface Cérebro-Computador.

Percebemos que é importante identificar, e analisar, o público alvo de um jogo baseado em ICC. Com o intuito de ter uma visão mais ampla, decidimos expandir esta análise para todos os envolvidos nessa nova forma de interação. Para fundamentação desta pesquisa usamos o referencial teórico-metodológico da semiótica organizacional.



## Capítulo 3

# Interfaces Cérebro-Computador sob a Perspectiva da Semiótica Organizacional

### 3.1 Introdução

No âmbito de cidades inteligentes é importante que a comunidade utilize a inteligência coletiva e encontre novas estratégias de interação, expandindo e aprimorando a forma como vivemos nos espaços urbanos. Uma forma de interação inovadora são aquelas proporcionadas por Interfaces Cérebro-Computador (ICCs), que permitem o controle de sistemas computacionais através de ondas cerebrais, sem haver a necessidade da utilização de músculos voluntários. Essa interação ocorre por meio de um dispositivo de captura de biosinais advindos do cérebro. Esses sinais podem ser capturados eletricamente via eletroencefalografia (EEG), magneticamente via ressonância magnética e, opticamente, via espectroscopia infravermelha. A grande maioria das ICCs captura os sinais via eletrodos EEG dispostos, por exemplo, em headsets comerciais – e.g., Emotiv EPOC4 e NeuroSky MindWave5 –, por ser a forma mais “fácil” e “barata”, se comparado a outros métodos de captura.

O Brasil é um dos líderes atuais em ICCs invasivas – onde sensores de captura são implantados na massa cinzenta do cérebro do usuário, através de cirurgia – com as pesquisas de Nicolelis [97], sendo um dos pioneiros da área tendo, inclusive, realizado experimentos em que macacos obtiveram controle mental de braços robóticos [98]. ICCs invasivas apresentam a melhor qualidade do sinal capturado, mas em compensação possuem os maiores riscos à saúde, e são mais utilizadas no caso de controle de próteses. Já as ICCs não-invasivas dispensam cirurgia e não oferecem riscos à saúde dos usuários. No entanto, o sinal capturado possui qualidade

---

<sup>4</sup> <http://www.emotiv.com>.

<sup>5</sup> <http://www.neurosky.com>.

inferior. Entendemos ser fundamental, visando o uso geral de ICCs pela população mundial, que a tecnologia de ICC seja de fácil uso, e sem complicações a saúde humana.

Pelo exposto, nossa pesquisa está direcionada a ICCs não-invasivas, visando o uso universal dessa tecnologia. Vislumbramos, inclusive, avanços nas ditas interações humano-computador de forma implícita [114] onde a interação cérebro-computador, idealmente, seria automática e transparente para os usuários. Esse avanço, potencialmente, poderá alavancar a criação de ambientes inteligentes aplicados à computação ubíqua para cidades inteligentes, uma vez que ICCs contribuem com as três propriedades definidas por Weiser [132], ou seja, (i) computadores em redes, distribuídos, e acessíveis transparentemente, (ii) interações computadores e humanos mais escondidas, e (iii) cientes do contexto do ambiente. Com as ICCs o processo de interação poderá ser realizado de forma mais transparente e intuitiva, com pensamentos específicos convertidos, diretamente, em ações.

Em nosso trabalho prévio [34] realizamos uma análise de ICCs do ponto de vista da área de IHC, revisando os principais trabalhos do estado da arte, e apontando desafios de IHC relacionadas a ICCs, tais como, interrupção do foco do usuário, fadiga do usuário devido ao uso prolongado, adaptação necessária por parte do usuário, e carga cognitiva elevada envolvida no processo de interação.

Neste trabalho, de forma diferenciada, realizamos uma análise deste domínio utilizando o referencial teórico-metodológico da Semiótica Organizacional [71] com o intuito de identificar oportunidades e desafios de ICC numa perspectiva socio-técnica, para a comunidade científica. Cabe ressaltar que a análise que será apresentada neste trabalho foi inspirada por análises realizadas sob a ótica do mesmo referencial em outros domínios, tais como, artefatos físicos de interação para a televisão digital [91] e redes sociais online [93]. Neste trabalho, utilizamos a Semiótica Organizacional para analisar, especificamente, o domínio de ICCs não-invasivas.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 provê uma breve introdução à Semiótica Organizacional; a Seção 3 apresenta a análise do domínio de ICCs sob a perspectiva da Semiótica Organizacional; a Seção 4 levanta oportunidades e desafios de ICCs numa perspectiva socio-técnica; a Seção 5 discute os resultados obtidos; e a Seção 6 apresenta as considerações finais.

## 3.2 Semiótica Organizacional

A Semiótica Organizacional (SO) [71] é um ramo da Semiótica que entende que todo comportamento organizacional é realizado através da interpretação de signos, onde essa interpretação varia dependendo do indivíduo ou grupo de pessoas. De forma simplificada, um signo representa qualquer objeto, concreto ou abstrato, com o uso e interpretação variante e dependente do observador. Através de métodos e conceitos da SO é possível analisar as várias esferas humanas envolvidas com os signos. No contexto deste trabalho, os signos em estudo estão relacionados as ICCs, visando uma reflexão sobre o aprimoramento dessa tecnologia e o uso desse tipo de interface.

Para a análise de domínio, que será apresentado neste trabalho, utilizamos o Problem Articulation Method (PAM) da SO, que permite uma clarificação do domínio investigado. Sendo esse capaz de expor os problemas de cada nível de um projeto, até mesmo nos seus estágios iniciais. São utilizados três artefatos nessa análise, i.e. (i) Partes Interessadas, (ii) Quadro de Avaliação, e (iii) Escada Semiótica. O artefato Partes Interessadas (PI) permite o estudo dos stakeholders envolvidos no desenvolvimento e no uso de tecnologias de ICCs. Em seguida, o artefato Quadro de Avaliação (QA) [10] identifica as questões relevantes para os papéis descritos em cada camada do PI, e o artefato Escada Semiótica (ES) aborda questões acerca do domínio do problema sob seis diferentes visões.

Na análise do PI, os stakeholders do domínio de problema/solução são distribuídos em quatro camadas, i.e. Contribuição, Fonte, Mercado e Comunidade. Quanto mais perto que o stakeholder estiver do “centro” desse artefato, mais influente essa parte interessada é em relação ao domínio analisado. O QA, por sua vez, levanta problemas e possíveis soluções relacionadas a cada uma das quatro camadas do PI, na forma de questionamentos. Já a ES divide os fatores relacionados aos signos em seis diferentes visões, i.e. (i) Mundo Físico, e.g. sinais, trilhas, hardware e densidade de componente, (ii) Empírico,

e.g. padrões, diversidade, ruído, entropia, capacidade do canal, redundância e codificação, (iii) Sintático, e.g. estrutura formal, linguagem, lógica, dados, registros, software e arquivos, (iv) Semântico, e.g. significados, propósitos, validade, verdade, significação e denotação, (v) Pragmático, e.g. intenções, comunicação, conversações e negociações, e (vi) Mundo Social, e.g. crenças, expectativas, compromissos, lei e cultura. Cabe comentar, ainda, que os três primeiros níveis da ES – i.e. mundo físico, empírico e sintático – estão mais relacionados a plataforma tecnológica, e que os três últimos níveis da ES – i.e. semântico, pragmático e mundo social – estão mais relacionados as funções do sistema de informação humano. Neste trabalho, utilizamos esses três artefatos – i.e. PI, QA e ES – para realizar uma análise socio-técnica da área de ICCs. Ainda, ressaltamos que o nosso intuito com esta seção não foi “ensinar” SO, mas oferecer a base

mínima necessária para o pleno entendimento dos resultados da análise realizada, e apresentada a seguir.

### 3.3 Análise de domínio

A Fig. 11 apresenta o PI resultante da análise do domínio de ICCs para refletirmos de forma mais apurada a inserção de ICCs e, a seguir, apresentamos alguns importantes considerações acerca desse PI.

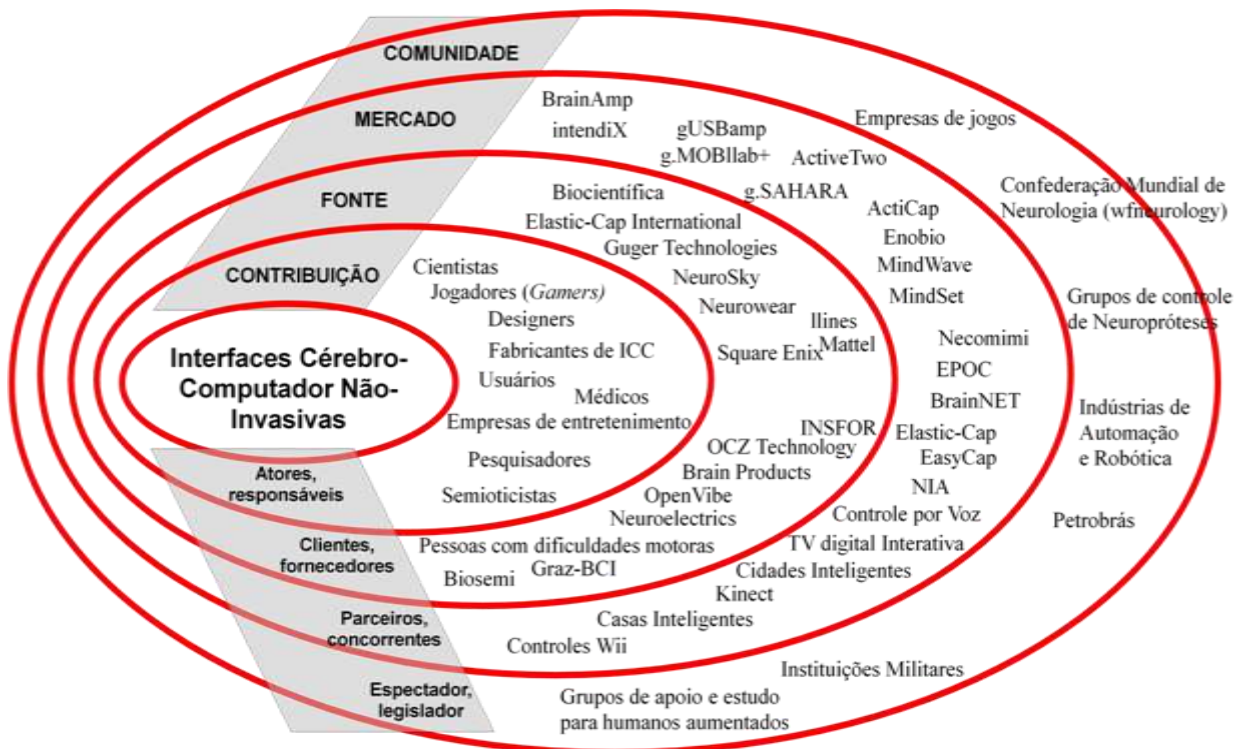


Figure 11. Partes Interessadas resultante da análise do domínio de ICC.

As partes interessadas descritas em Contribuição, Fonte e Comunidade indicam que as associações médicas e instituições militares, bem como, a área de jogos estão mais diretamente envolvidas, no momento, com ICCs. Na área médica o foco está no desenvolvimento de ICCs para pessoas com deficiências motoras, como forma de tentar prover maior acessibilidade, ou recuperação de capacidades motoras perdidas ao longo da vida. Existem algumas empresas desenvolvendo tecnologias de ICCs para fins médicos, tais como a Biocientífica que fabrica o amplificador EEG BrainNet, e a INSFOR (Innovative Solutions for Robotics) uma empresa de projeto que oferece soluções robóticas, algumas utilizando ICCs. No entanto, ainda não há uma atuação forte no desenvolvimento de ICCs para outros fins, tal como, entretenimento.

Existem poucas tecnologias de ICCs no âmbito de jogos, apesar dos gamers serem usuários em potencial de ICCs, mesmo com o investimento de famosas empresas de jogos – como a

Square Enix, e empresas de brinquedos – como a Mattel. Nessa esfera de jogos as duas maiores empresas de ICCs são a NeuroSky e a Emotiv, cada uma com uma estratégia de mercado diferente. A Neurosky foca em dispositivos de captura por EEG simples e baratos, normalmente com apenas um eletrodo, enquanto que a Emotiv desenvolve dispositivos de captura por EEG mais sofisticadas e caros com, por exemplo, 14 eletrodos EEG e acelerômetro em um único headset. Ambas empresas oferecem headsets comerciais, e fazem parte do pequeno grupo de empresas que oferecem tecnologia de ICCs acessíveis a “usuários finais”. Apesar dessa fato, encontra-se o envolvimento de universidades na área de ICCs, inclusive no Brasil: com trabalhos como os de Costa e Cabral [22] da USP e o de Barbosa et al. [3] da PUC/RJ. Ainda, temos os trabalhos de Ramos Jr. et al. [109] e Benevides e Bastos [7], ambos da UFES. Também, Müller et al. [95] da UNICAMP e Ferreira et al. [32] da UFRN.

Em Mercado é possível observar que os principais concorrentes, ou possíveis parceiros, de ICCs são dispositivos que oferecem novas formas de interação, tais como o Microsoft Kinect<sup>6</sup> e o Nintendo Wiimote<sup>7</sup>. Assim, parece ser de benefício geral parcerias para criação e uso de interfaces multi-modais, onde uma forma de interação – diferente de cérebro-computador – complementa a outra (ICC). Outra parceria em vista será a utilização de ICCs em cidades inteligentes, onde um usuário de ICC poderia, por exemplo, rastrear sua felicidade durante passeios turísticos [116], enquanto que espaços públicos adaptar-se-iam a situações urbanas dependendo do estado emocional da multidão [64].

### 3.3.1 Quadro de avaliação

Os resultados da análise de domínio sob a ótica do QA são apresentados na Tabela 2. Nessa tabela são descritos alguns problemas pertinentes aos stakeholders descritos no PI (Fig. 11) do domínio de ICCs, listando várias (Q)uestões que deveriam ser analisadas e, na medida do possível, tratadas visando o desenvolvimento desta área.

**Table 2. Quadro de avaliação resultante da análise do domínio de ICC.**

Partes Interessadas	Problemas e Possíveis Soluções
Contribuição (atores e responsáveis)	<p><b>Q1.</b> Considerando os diversos atores diretamente envolvidos com o desenvolvimento de ICCs, qual seria o papel de cada um deles no processo de design de uma nova ICC? <b>Q2.</b> Como moldar a interface/interação para um grupo de usuário – público-alvo – específico? <b>Q3.</b> Será suficiente apenas adaptar métodos existentes para</p>

<sup>6</sup> <http://www.xbox.com/en-US/KINECT>.

<sup>7</sup> <http://www.nintendo.com/wii>.



---

<p>Fonte (clientes e fornecedores)</p>	<p>outros tipos de interface de usuários para as ICCs? <b>Q4.</b> Como adaptar de forma adequada os métodos existentes para esse paradigma de interação? <b>Q5.</b> Quais questões abordar com usuários num Design Participativo de ICC? <b>Q6.</b> Que tipos de heurísticas devem ser empregadas ou desenvolvidas para melhor avaliar a interação dos usuários com ICCs? <b>Q7.</b> Qual seria o interesse da população, em geral, em utilizar ICC? <b>Q8.</b> Existem empresas fabricantes de ICCs interessadas em expandir suas tecnologias para além de fins médicos? <b>Q9.</b> Vale a pena desenvolver tecnologias próprias relacionadas a ICCs?</p>
<p>Mercado (parceiros e concorrentes)</p>	<p><b>Q10.</b> Como unir o esforço dos diversos parceiros para o progresso da área? <b>Q11.</b> Haveria interesse da parte dos concorrentes em juntar outras formas de interação, como controle por gestos, com ICCs? <b>Q12.</b> Qual o valor que ICCs agregariam a interações modernas, como televisão digital e dispositivos móveis (e.g. smartphones e tablets)? <b>Q13.</b> Como misturar tecnologias de diferentes parceiros, em vista das implicações legais do uso de softwares proprietários e hardwares protegidos por patentes?</p>
<p>Comunidade (espectador e legislador)</p>	<p><b>Q14.</b> Qual a influência dos diversos governos na produção de conhecimento e tecnologia de ICCs? <b>Q15.</b> Considerando o avanço da área, seria necessário criar padrões para preservar a qualidade e a concorrência leal? <b>Q16.</b> A regulamentação – normatização – atual contempla todas as esferas da criação de ICCs?</p>

---

Tendo vista o QA apresentado, é possível perceber que a utilização de ICCs na indústria ainda é incipiente, será preciso atuação de forma mais empenhada das empresas, para que a área possa prosperar. O benefício de ICCs depende do interesse da população, e é necessário descobrir o perfil de uso dos atuais e futuros usuários de ICCs. Por outro lado, o governo desempenha um papel importante como colaborador, oferecendo incentivos para aprimoramento tecnológico, e regulamentações para controle de qualidade da tecnologia desenvolvida.

### 3.3.2 Escada Semiótica

A Tabela 3 exibe a ES resultante da análise do domínio, onde foram levantadas questões sob a ótica: do Mundo (F)ísico, (E)mpírica, (Si)ntática, (Se)mântica, (P)ragmática, e do Mundo (S)ocial.

**Table 3. Escada Semiótica resultante da análise do domínio de ICC.**

Nível	Questões
Mundo Social	<p><b>S1.</b> As ICCs atuais proveem acesso universal? <b>S2.</b> Como as indústrias poderiam ganhar com a produção de ICCs? <b>S3.</b> ICCs voltadas ao entretenimento poderia diminuir o consumo de jogos, videogames, smartphones e TVs? <b>S4.</b> ICCs voltadas à interação com sistemas disponíveis em ambientes públicos dentro de uma cidade alterariam a forma com que os usuários utilizam os serviços públicos? <b>S5.</b> Usuários sem problemas motores poderiam se beneficiar de ICCs voltadas a um público com problemas motores? <b>S6.</b> Usuários com dificuldades motoras conseguiriam usar ICCs com foco em entretenimento, e não em acessibilidade? <b>S7.</b> Existiria resistência por parte dos usuários quanto ao uso de ICCs? <b>S8.</b> Quais seriam os medos da população, perante essa nova forma de interação? <b>S9.</b> Essa população estaria disposta a um período de treinamento ou adaptação para utilizar ICCs?</p>
Pragmático	<p><b>P1.</b> Quais seriam os motivos pelos quais usuários estariam dispostos a utilizar ICCs? <b>P2.</b> Quais as características de ICCs que variam em relação ao tipo de usuário almejado? <b>P3.</b> Qual grupo de usuários apresenta o maior potencial de ser beneficiado por essas tecnologias? <b>P4.</b> Quais aplicações (e.g. Televisão Digital Interativa, Interação com smartphones, jogos, serviços públicos e privados) apresentam o melhor apelo para ICCs?</p>

Semântico	<p><b>Se1.</b> Como garantir que os textos envolvidos com a tecnologia de ICC – como manuais de instruções – sejam entendidos por qualquer perfil de usuário? <b>Se2.</b> Como tornar a interface gráfica, de uma ICC baseada em estímulo visual, intuitiva? <b>Se3.</b> Qual deveria ser o design do produto de hardwares de ICCs – como os headsets EEG – para que o produto final possa ser colocado corretamente na cabeça por um usuário final sem conhecimento, por exemplo, de Neurociência? <b>Se4.</b> De que maneira esses usuários aprendem a usar a ICC, e realizam as tarefas como “contar o número de flashes” ou “imaginar o movimento da mão direita”?</p>
Sintático	<p><b>Si1.</b> Quais jargões seriam utilizados na linguagem de ICCs? <b>Si2.</b> Este jargão muda de dispositivo para dispositivo, ou de fabricante para fabricante? <b>Si3.</b> As palavras empregadas são adequadas – de uso simples, e fáceis de aprender – para toda a extensão do público-alvo? <b>Si4.</b> Como podemos formalizar uma linguagem de interação baseado em ICCs?</p>
Empírico	<p><b>E1.</b> Qual a taxa de transferência de informação mínima aceitável pelos usuários? <b>E2.</b> Quais tipos de ICCs atingem essa taxa atualmente? <b>E3.</b> Os materiais envolvidos na construção de dispositivos de ICCs são de ampla disposição e domínio? <b>E4.</b> Quais os protocolos de comunicação de dados que podem ser utilizados entre o headset e o computador? <b>E5.</b> Como permitir a captura das informações sem que isso implique no vazamento e no acesso indevido dessas informações?</p>
Mundo Físico	<p><b>F1.</b> Como seria o design de um headset de ICC, com a finalidade de que atenda os princípios do Design Universal? Que tipo de eletrodos EEG utilizar em headsets de ICC? <b>F2.</b> O tipo de eletrodos EEG variaria dependendo do perfil do usuário? <b>F3.</b> Como esses usuários saberão se os elétrodos estão nas posições corretas, segundo o modelo 10/20<sup>8</sup>? <b>F4.</b> Os headsets de ICC devem ser desenvolvidos em vários tamanhos, ou um tamanho único seria suficiente?</p>

A utilização universal de ICCs é um ponto recorrente, com questões relacionadas em todos os níveis da ES. É importante que esta tecnologia possa ser usada por experts e leigos, usuários com ou sem dificuldades motoras, usuários interessados em ICC para entretenimento ou acessibilidade, e crianças ou adultos. Ficam nítidos nos resultados da ES como as questões

<sup>8</sup> O Sistema 10-20 define e padroniza as possíveis posições dos eletrodos para captura de sinais via EEG [59].

relacionadas ao Mundo Social são importantes e deveriam, em nossa visão, serem consideradas quanto ao desenvolvimento de novas ICCs. O nível Pragmático expõe questões relacionadas a preocupação com a intenção de uso das ICCs, considerando a diversidade de nossa população. Alguns domínios de aplicações de ICCs com grande potencial são, por exemplo, a televisão digital, controle de dispositivos móveis, jogos, e ambientes de simulação. Por sua vez, a análise dos níveis Semânticos e Sintáticos demonstram diversas indagações sobre as estruturas e os significados em ICCs.

Após apresentarmos os resultados do PI, que contribuiu na identificação e agrupamento dos stakeholders; do QA, que contribuiu com a identificação de problemas as diferentes partes interessadas e, finalmente; da ES, que contribuiu levantando lacunas, que servem como direcionamento, para cada um dos seus níveis, apresentamos na próxima seção as oportunidades e desafios acerca de ICCs não-invasivas.

## 3.4 Desafios e Oportunidades

Para melhor organização, optamos por agrupar essas oportunidades e desafios em quatro categorias, i.e. mercadológico, projetual, social e educacional, conforme descritos a seguir.

### 3.4.1 Mercadológico

**Escassez de tecnologias de ICCs de baixo custo:** Apesar de pesquisas na área de ICCs serem realizadas desde 1970, apenas pesquisas recentes conseguiram oferecer a tecnologia de forma efetiva e a um custo acessível para fins comerciais. As questões Q8/Q9 levantam dois pontos importantes em relação ao mercado. Os ganhos com ICCs devem ser claros para que políticas públicas possam ser criadas pelo Governo a fim de alavancar o desenvolvimento e a oferta de tecnologias de ICC. As questões Q10-Q13 apresentam algumas opções a serem refletidas pelas empresas atuantes nessa área.

**Escassez de plataformas abertas de ICCs:** A originalidade da indústria de ICCs estimula a disseminação de plataformas fechadas, com empresas focando em proteger suas tecnologias para dominar o mercado. Em nossa concepção, para que a área de ICC avance, plataformas abertas devem ser consideradas. Por isso, entendemos que as pesquisas relacionadas ao tema que estão sendo desenvolvidas pelas Universidades devam ser, na medida do possível, sem restrições de acesso aos seus resultados e tecnologias resultantes. Nessa esfera, o Governo e organizações regulamentadoras, podem ter um papel decisivo, conforme destacado nas questões Q14-Q16.

Uma das poucas iniciativas de software aberto nessa área é a plataforma OpenVibe<sup>9</sup>, de código aberto, e desenvolvida para apoiar o design, teste, e uso de ICCs. Inicialmente, a plataforma focava na aplicação de controle em ambientes virtuais, porém a plataforma foi expandida para contemplar outros usos de ICCs.

**Indisponibilidade de tecnologias de ICCs:** A tecnologia de ICC concentra-se em soluções para fins médicos, como o BrainNET da Biocientífica, enquanto que o acesso a headsets EEG para fins comerciais, como o Emotiv EPOC, é dificultado quando estes precisam ser importados de outro país, já que taxas de importações podem encarecer significativamente a aquisição. Nesse aspecto é preciso melhor refletir sobre as questões Q7-Q9 para que o Governo possa decidir em que posição gostaria de ter seu país em relação ao mercado mundial de ICCs. A aquisição de tecnologias de ICC ainda é cara, mesmo com esforços internacionais para produção e desenvolvimento de tecnologia de baixo custo, este custo não é baixo para a realidade sócio-econômica de grande parte do mundo.

### 3.4.2 Projetual

**Falta de suporte para projetar ICCs:** Ainda não foram definidos métodos e técnicas que apoiem o designer a projetar novas ICCs. Nessa esfera, as questões Q1-Q6 teriam uma influência tangencial à criação de metodologia de suporte a atividade de design de ICC, inclusive de forma participativa [16]. Nesse sentido, entendemos a carência de, por exemplo, frameworks, padrões, e metodologias adequadas para apoiar o design de novas ICCs.

**Falta de suporte para avaliar a interação de ICCs:** Realizar avaliações ou testes para identificar falhas, ou aprimoramentos possíveis, em ICCs desenvolvidas atualmente não é uma tarefa trivial de ser realizada, pois no momento, a avaliação da interação do usuário em ICCs estão sendo realizadas apenas através de questionários [84][13][92], observando atributos como entretenimento e o quanto é intuitivo sua utilização. Seria interessante desenvolver formas mais adequadas para avaliar a interação do usuário com esse tipo de interface de usuário, e não apenas testes de benchmark [49][72][18] (vide questão Q6).

### 3.4.3 Social

**Resistência ao uso de ICCs:** É preciso levar em consideração que alguns potenciais usuários irão apresentar resistência ao uso (vide questão S7), seja por medo de riscos à saúde ou a sua privacidade. Outro fator de resistência é a ansiedade, o receio em parecer tolo, ou menos elegante, com o uso de um headset. Nesse aspecto é importante que tecnologias de ICC não

---

<sup>9</sup> <http://openvibe.inria.fr>

sejam associadas, unicamente, a deficientes e fins médicos. Algumas questões relacionadas com a resistência ao uso de ICCs foram identificadas na ES (vide questões S8/S9/P1).

**Acessibilidade e diversidade:** Atualmente, as tecnologias de ICCs precisam de adaptações para cada usuário precisando de, no mínimo, uma análise automática dos padrões cerebrais antes do seu uso efetivo, e cada um possui afinidades tecnológicas diferentes. Um estudo feito por Randolph [110] demonstrou que vários fatores alteram a afinidade do usuário com as ICCs, tais como, gênero, hábitos alimentares, idade e, até mesmo, experiências com jogos, tecnologias e serviços. A tecnologia deve também abranger a diversidade, um usuário pode estar interessado em expandir suas capacidades, enquanto que um gamer pode querer apenas diversão. É preciso que as tecnologias de ICCs sejam acessíveis (vide questões S1/S5), podendo ser usadas por todos, e ao mesmo tempo atendendo a usos diferentes (vide questão S6), satisfazendo a diversos públicos.

**Segurança das informações no uso de ICCs:** Como ainda não há estudos aprofundados sobre o uso em larga escala de ICCs, os impactos da captura de informações relativas a, por exemplo, pensamentos, lembranças e sentimentos das pessoas podem provocar problemas sociais sérios com a captura e o uso indevido dessas informações por terceiros. Desse modo, protocolos e tecnologias deveriam ser incorporados a soluções de ICCs, para que fossem sanados ou minimizados problemas relativos à segurança e privacidade (vide questão S8). Quanto segurança, o medo pode ser bem fundamentado visto que, por exemplo, Martinovic et al. [82] já demonstram que o uso de um headset EEG oferece valiosas informações para atacantes, e destacam a necessidade de um canal de ICC seguro entre o headset e o computador.

#### 3.4.4 Educacional

**Falta de material profissionalizante/educativo de ICCs:** A profissionalização na área de ICC é bastante difícil, pois existe muito pouco material de apoio – principalmente em outros idiomas que não seja o Inglês –, e esses ainda tem o foco científico, sendo de difícil entendimento por muitos profissionais da indústria. A padronização e regulamentação poderia deixar o conteúdo de cursos profissionalizantes, e o Governo poderia agregar investimentos na tecnologia e treinamento público. A questão Se1 identifica o cerne dessa questão. Universidades podem melhorar esse aspecto oferecendo uma disciplina complementar que trate de ICCs, voltada para alunos de Pós-Graduação, ou mesmo para alunos de Graduação em Ciência da Computação, Engenharia da Computação ou Engenharia Elétrica. Nos EUA, por exemplo, algumas universidades já oferecerem disciplinas de ICCs em seus cursos, tais como, Pen State University<sup>10</sup>, Brown University<sup>11</sup>, University of Pennsylvania<sup>12</sup>, University of Washington<sup>13</sup>, University of Illinois<sup>14</sup> e UC San Diego<sup>15</sup>.

---

<sup>10</sup> [http://www.cse.psu.edu/cpath/html/brain\\_computer\\_interfaces.html](http://www.cse.psu.edu/cpath/html/brain_computer_interfaces.html).

<sup>11</sup> <http://cs.brown.edu/courses/csci2950-o.html>.

**Inserção de ICCs em escolas e universidades:** No futuro ICCs poderão fazer parte do sistema educacional de escolas e universidades, o que leva ao questionamento de como essa tecnologia poderia ser, de fato, inserida nesse contexto. ICCs já são capazes de medirem a concentração do usuário, e dessa forma os professores poderiam saber rapidamente a concentração de seus alunos durante uma aula. É preciso pensar sobre a ética e invasão causada pelo uso dessa tecnologia (vide questões S7/S8). Outro problema é a segregação social (vide questão S1), onde estudantes de classes mais privilegiadas adquirem treinamentos modernos enquanto que estudantes da classe baixa “ficam para trás” tornando-se defasados para trabalhos dependentes de uma nova forma de interação. No futuro o ensino de ICCs apenas como disciplina complementar em Universidades pode não ser o suficiente, sendo necessária a inclusão de treinamento em escolas de Ensinos Fundamental e Médio.

Cabe ressaltar que as oportunidades e desafios supradescritos, não se configuram como uma lista exaustiva de oportunidades e desafios numa perspectiva sócio-técnica, e nem essa foi a nossa intenção com a realização deste trabalho. No entanto, servem como direções concretas para que pesquisadores interessados pelo tema.

### 3.5 Discussão

ICCs não-invasivas proporcionam uma das mais novas interações no mercado, com empresas mundiais interessadas no futuro da área. Apesar disso, ainda não existe um esforço significativo por parte de empresas no investimento dessa tecnologia.

É preciso que a tecnologia seja expandida para além da academia, ganhando posições em empresas, de modo que possa ser aproveitada, no futuro, pelo usuário final. ICCs permitirão melhores interações em várias aplicações, com o uso efetivo por grandes empresas, como a empresas petrolíferas que podem usar, por exemplo, ICCs para simulações e controle de ambientes virtuais. A Petrobrás é uma das empresas líderes em pesquisas de ambientes virtuais para simulação e treinamento, e essa área pode ser uma das que mais impulsionará o desenvolvimento de ICCs em nosso país. Organizações públicas e privadas podem tirar proveito dessas interfaces para oferecer melhores serviços para população em geral. Empresas de vídeo games que estão sempre interessadas em novas interfaces, utilizando controles gestuais (e.g. Nintendo Wiimote) e reconhecimento de gestos (e.g. Microsoft Kinect). A televisão digital, e o controle delas com o cérebro entrará como uma das interações possíveis advindas com as ICCs.

---

<sup>12</sup> <http://www.ircs.upenn.edu/compneuro/be421.pdf>

<sup>13</sup> <http://www.cs.washington.edu/education/courses/cse599e/12sp/>.

<sup>14</sup> <http://igert.beckman.illinois.edu/ECE%20598%20TC.pdf>.

<sup>15</sup> <http://thiscourse.com/ucsd/cogs160bci/wi13/>.

Por fim, cabe comentar que este trabalho provê uma análise de fatores organizacionais envolvidos com ICCs e, até onde sabemos, é o primeiro a explorar o referencial teórico-metodológico da SO no domínio de ICCs, que nos permitiu analisar o domínio de ICCs sob o ponto de vista informal, formal e técnico. Os resultados deste trabalho, ainda, complementam o nosso trabalho anterior [34], que analisou fatores humanos relacionados a ICCs.

## 3.6 Conclusão

Este trabalho apresentou uma análise do domínio de ICCs baseado na Semiótica Organizacional. Ainda, com base nessa análise, apresentamos oportunidades e desafios de ICC numa perspectiva sócio-técnica para a comunidade científica. Este trabalho, portanto, contribui com a literatura da área, apresentando direções concretas para melhor associação de ICCs aos seus usuários. Com a realização deste trabalho, ficou claro que essa inovação tecnológica exige certa cautela. Para que as ICCs venha a ser, de fato, utilizada no cotidiano das pessoas é necessário que a comunidade de computação, nas suas várias subáreas de atuação, além de outras partes interessadas fora do ambiente acadêmico, se engajem nas oportunidades e nos desafios de cunhos mercadológico, projetual, social e educacional descritos e discutidos neste trabalho.

Como trabalho futuro, sugerimos a implementação da ICC descrita no cenário de uso com o intuito de verificar junto aos usuários finais as vantagens e desvantagens deste tipo de interface in loco no contexto de uso do usuário.

## 3.7 Tomada de Decisão

Com a identificação, e análise, dos envolvidos avançamos mais no objetivo principal - O estudo, design, e desenvolvimento de um jogo baseado em Interface Cérebro-Computador. Iniciamos o Design do jogo, e então observamos que este processo envolvia muitas decisões importantes.

Para o bom Design do jogo buscamos na literatura os jogos, baseados em ICC, mais importantes e significativos para destacarmos vários exemplos de Design atuais. Entendemos que havia a necessidade da confecção de um Design Rationale para jogos baseado em ICC, não existindo nenhum no momento de nossa pesquisa. Este Design Rationale apoiaria a construção final do jogo.



# Chapter 4

## Design Rationale for BCI-based Games<sup>16</sup>

### 4.1 Introduction

The digital games industry is growing increasingly, attracting all kinds of people with innovations in several areas, such as hardware, software, 3D graphical interfaces and new ways of interaction. The scope of new interaction ways has motion sensors – e.g. Nintendo WiiMote sensors – accelerometers in smartphones, visual recognition of gestures – e.g. through Microsoft Kinect – and augmented reality. Even in this scope, one of the most promising interaction ways for the “future” is the one provided by Brain-Computer Interfaces (BCIs), which allows interaction desired by many users/players, i.e. control of games only through the brain, without using any physical artifact of interaction, even the innovative ones as the Adjustable Interactive Rings [89][90].

Nowadays, electroencephalography devices (EEG) are able to provide a BCI where the interaction is done by capturing the user’s brain activity. The development of commercial<sup>17</sup> EEG headsets<sup>18</sup>, for example, by NeuroSky (e.g., ThinkGear AM, MindWare, Mindwave Mobile and MindSet), by Emotiv (e.g., EPOC Neuroheadset and EEG Neuroheadset) and by BCINet (e.g., NIA Game Controller), allows end users to submerge in this “new” interaction paradigm, also in the context of digital games. The three most used detection techniques in BCI-based systems are: (i) **neurofeedback**, in which Alpha and Beta waves are used to estimate focus,

---

<sup>16</sup> Este capítulo apresenta uma versão revisada do trabalho intitulado “Understanding and Proposing a Design Rationale of Digital Games based on Brain-Computer Interface: Results of the AdmiralMind Battleship Study” [31].

<sup>17</sup> Information about each mentioned headset can be found, respectively, in: <http://www.neurosky.com>, <http://www.emotiv.com>, and <http://www.bcinet.com>.

<sup>18</sup> The term “headset” is used in this work to unify the various formats of capture devices that may include headbands, caps, bandanas, headphones and helmets.

relaxing/meditation and concentration of the user; (ii) **visual stimuli**, in which an element being watched by the user is recognized by detecting brain response to a visual effect that acts as stimulus; the detection depends on the visual stimulus used. A transient stimulation is characterized by elements that blink one by one and when the target element lights, that one observed by the user, the brain answers with a “surprise” wave – the P300 – detected by an EEG device. In an oscillating stimulus – called Steady State Visually Evoked Potential (SSVEP) – all visual elements blink simultaneously, each at a different frequency, which causes the user’s brain to respond in a frequency similar to the frequency of oscillation of the target element; and (iii) **imagined movement**, in which it is possible to detect kinetic thoughts as, for example, the imagination of the user’s right hand opening and closing, thanks to the synchronization and desynchronization of the Mu rhythm<sup>19</sup>.

For this work, we start from previous results already achieved with accomplishment of research in the field of BCI. In [34], we describe the state of the art of interactive systems based on BCI, as well as present and discuss the main challenges of this domain. In the present Chapter, our focus is to explore, specifically, digital games based on BCI, therefore, we investigate BCI in the digital games scenario, in order to identify approaches, its limitations, and implications related to the design of BCIs. Also, we develop a design rationale<sup>20</sup>, which supports the design process of BCI-based games. Still, the developed design rationale, was applied in the design process of a battleship game explaining and discussing, in this study, the key issues in designing a BCI game.

This Chapter is organized as follows: Section II describe the related works; Section III presents a literature review about BCI-based games; Section IV describes the developed design rationale; Section IV presents and discusses the results of the application of the design rationale in the design process of a BCI-based game; and Section VI concludes the chapter.

## 4.2 Related Works

Lotte [74] identifies BCI challenges in the context of games, highlighting five drawbacks of current BCIs: (i) the user needs to be in a stationary position, since movements can cause interference in the captured signal; (ii) boredom for the user to calibrate the BCI; (iii) discomfort in the use of headsets, due to their limitations, as the need to use gel in the sensors; (iv) high error rate; and (v) limited set of mental activities that can be detected with good accuracy. On the other hand, this author defends the potential of BCIs, explicating, as an example, the use of

---

<sup>19</sup> Mu rhythm is a pattern of brain electrical activity that occurs in the motor cortex, strongly related to the control of voluntary movements. A person suppresses this pattern when performing, imagining, or observing a motor action.

<sup>20</sup> Design rationale [65] is a document with an explicit listing of decisions involved in the design process. Each decision must contain the possible alternatives, their reasons and pro and con arguments.

game's difficulty setting based on the user's tension. Gürkök et al. [41] argue that BCI games are guided by two principles: motivation (“why” play), and interaction paradigm (“how” to play). These authors then identify three elements that can motivate players, i.e. challenge, fantasy, and social. The authors also define three interaction paradigms, i.e. concentration, imagined movement, and response to stimuli, and finally classify four BCI games according to each of these elements of motivation and interaction paradigms.

Sung et al. [123] created an architecture for the development of serious games, i.e., games where the entertainment is not the main goal, but factors such as education, training or simulation. The process proposed by these authors aims to separate those involved on the development, in specific and specialized roles where BCI experts create templates that can be used by those who have no knowledge in the field, as game experts. These authors also show creation tools, based on templates, for game development. Kaplan et al. [55] accomplish a literature review about BCI games that use, specifically, the P300 approach, identifying negative factors for user experience, and how these factors have been overcome.

Bos et al. [14] present the factors and challenges of Human-Computer Interaction (HCI) involved in BCI games, with a study focused on usability and user experience. These authors conclude that more research is needed in real usage scenarios with users acting naturally, and the HCI community involvement is crucial to the improvement of this interaction way. Marshall et al. [80] present a review of BCI games, classifying them into conventional genres. These authors discuss the current use of BCIs in every game genre and based on that, make recommendations for the best use of BCIs for each of the genres presented. On the other hand, van Veen [126] evaluates the current BCI games under the criterion of the paradox of control, which, according to the author, is a requirement that makes an interactive system be considered a game.

Unlike the works mentioned above (related), this work focuses on the interaction involved in games that use this “new” way of interaction with digital games, regardless of the BCI detection approach, and also presents a design rationale that supports game designers with the issues involved in the design of BCI games.

### **4.3 Literature Review of Games based on BCI**

Initially, we present a literature review of BCI games, as a key part of this work, since through this review we will better understand the impact of this interaction way in the design of digital games. Thus it is important to highlight that our intention with this section is not to present an exhaustive list of digital games based on BCI, but a selection of the main works that contribute to a better understanding of design of BCI games. The search strategy consisted of manual and automatic searches in scientific libraries and bibliographic databases. Automatic/manual searches were conducted in IEEE Xplore, ACM DL, Springer, Elsevier, Scielo, Scopus, ISI Web of

Knowledge, and Google Scholar. In the search process, it was used a combination of the following keywords (listed below in alphabetical order): “BCI”, “brain”, “computer”, “design”, “EEG”, “EPOC”, “Emotiv”, “game”, “HCI”, “interaction”, “interface”, “MindSet”, “MindWave”, “NeuroSky”, “P300”, “rationale”, and “SSVEP”. For this study we only selected published papers that, in fact, present a BCI game.

The use of BCI in digital games can be divided into four distinct groups depending on the detection method applied in the BCI game, i.e. (i) neurofeedback based games, such as the measurement of relaxation and/or concentration of the user, (ii) games based in response visual stimuli, (iii) games based on imagined movement, and (iv) games based on hybrid detection, i.e. using a combination of two or more forms as described above in (i) (ii) and (iii). In addition, the game control is considered multimodal when using multiple interaction ways, especially in the input, for example, the use of keyboard and mouse together with a BCI. Therefore, the hybrid detection is related to multiple BCI detection approaches used together, while multimodal indicates that BCI and non-BCI interaction ways are used together.

### 4.3.1 BCI Games based on Neurofeedback

In the *Finding Star* game, developed by Ko et al.[61], control is multimodal, since the concentration and relaxation of the user are captured by MindSet and the movement of the character is done by a conventional keyboard, and the target by a conventional mouse. The accuracy depends on the user’s concentration, i.e. in low concentration, the target becomes unstable; as the former grows, the accuracy of the latter improves. In these battles the character loses energy and need to sleep to recover it. For the game heroine to sleep, it is needed that the user reaches a certain level of relaxing. The user state also affects the visibility of certain items of the game GUI, since some elements appear only when the user is quite concentrated, while others only appear when the user is relaxed.

Kang et al. [53] begin the design of a horror puzzle game that will use a BCI during the stages’ design. In the game, the player needs to win riddles/puzzles while horror elements appear (like spirits appearing suddenly). Through a BCI, the player’s fear will be evaluated, and through that neurofeedback, it will be possible to maximize the terror of the game. In an initial prototyping, the authors have managed to capture the fear of people who watch a horror movie, finding which scenes do cause the greatest fear. This demonstrates that not only concentration or relaxation, fear can be exploited in games with BCI – giving the game the ability to interact directly with the player's feelings, in this case, fear.

Liao et al. [68] developed a more convenient headset, where sensors are placed in a polymer sponge in order to let the user more comfortable. To test the solution, the authors developed *Archery Game*, a game based on the level of user focus, in which the user should focus on a target for 10 seconds, and then an arrow is fired towards the target. The arrow precision is

based on the focus level reached by the user. In an experiment, they compare the performance of a user in a controlled and silent environment, with the performance of the same user in an environment with several distractions, sounds and videos in the sight of the user. There was a decrease in performance that demonstrates the difficulty of users to focus in an uncontrolled environment. Jiang et al. [52] developed a game for rehabilitation, where control is performed by a BCI based on concentration. In the game, the user must maintain a level of attention, to allow a virtual hand to reach and grab a tiny red fruit on a plate. The game aims to assist in the rehabilitation of children with attention deficit.

Coulton et al. [23] created a game for smartphone called *Brain Maze* that uses the MindSet. The objective of the game is to take a ball from a starting point to an ending point. To move the ball, the smartphone's accelerometer is used. However, some roads are blocked by gates. When the user concentrates in attention, attention gates are open, and if the user relaxes, meditation gates are open. Basori [5] developed the *Emotion Walking*, a game that uses a BCI headset together with a motion capture glove to detect the user's feelings, such as happiness and anger, and then change the facial expression of an avatar. The walking speed of the avatar depends on the user's level of exciting. The glove tracks the current state of the hand, and improves the accuracy of the feelings captured. According to the authors, if the user is in a fist and tense, then, the user is angrier, while an open hand and relaxed indicates greater peace or happiness.

Bernays et al. [8] developed a 3D maze game in first person, called *Lost in The Dark*, with a BCI based on neurofeedback. The motion controls are conventional, while neurofeedback acts on various parts of the game. In the game, you must escape a cylindrical maze where a ball – called Light Bot – accompanies the player and lights the way. As the player gets tense or excited, the Light Bot fades, and as the player is calm the light increases. Through the maze, there are locked doors that only open if the player reaches a certain “state of mind”, i.e. calm, excited, or tense. The music of the game adapts to the user's state; when the player is calm, music is quiet low and calm, when excited, music is high and fast.

In the game *Mind Garden* (Fig. 12a), developed by Su et al.[122], the goal is to create and maintain a garden. For this, the player plant trees, and for them to grow, the user must achieve a high level of relaxation. To adorn the garden, the player can also control elements like clouds, sun and rainbow. For these elements to develop, the player needs to achieve a high level of attention, thus, the player must carefully control the attention and relaxation in order to create the desired garden. Yoh et al. [136] add interactivity to the fairy tale “Hansel and Gretel” in the form of a BCI game called *NeuroWander* (Fig. 12b). In the game you need to reach a certain state of mind at every stage, for the characters in the story to have success. For example, it is necessary to relax to spread bread crumbs, and maintain a high level of attention to successfully push the witch – the villain – into the cauldron.



Figure 12. Graphical interfaces of BCI games based on neurofeedback (a) *Mind Garden* (b) *NeuroWander*. Sources: [122][136].

### 4.3.2 BCI Games based on Visual Stimulus

Hakvoort et al. [42] developed the *Mind the Sheep* game (Fig. 13a), whose goal is to control dogs via BCI, to take sheep into a fence. The control uses a multimodal approach, where the visual focus is used to select which dog to move, while the mouse position indicates where the dog must go. The visual focus is detected by a BCI based on SSVEP. On the other hand, Obbink et al. [101] expanded the game cited above – *Mind the Sheep* – to a BCI cooperative version, where the map/scenario is higher and users should control the dogs together. Some difficulties were encountered, such as the fact that participants avoided talking or gesturing to one another, because it caused interference in the BCI SSVEP detection; this limitation made it difficult to communicate. Another problem identified was the breaking of focus in certain natural situations, such as laughter of a user making the others to do wrong moves. Lalor et al. [63] developed the *MindBalance* game (Fig. 13b), a game where a character, similar to a frog, must balance up and cross a tightrope. The game is controlled with a BCI based on SSVEP, where the visual stimulus is two flags, increased by the fact that each flag has squares arranged opposite to each other.

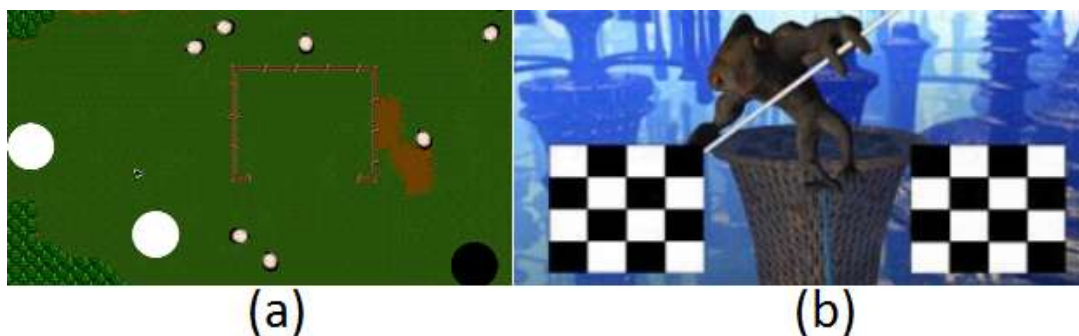


Figure 13. Graphical interfaces of BCI games based on visual stimulus (a) *Mind the Sheep* (b) *MindBalance*. Sources: [42][63].

Another game that uses the same scheme of flags is the 2D racing game developed by Martinez et al.[81], where a car must complete laps on a race track; the flags oscillate in SSVEP style. The car is surrounded by four flags, which represent an up/down and left/right move, and the user must focus the attention on the flag that represents the direction desired for the car to move.

Vliet et al. [129] developed a game controlled by the EPOC, and compared the performance of this commercial EEG headset destined to the end user, with the high cost headset named actiCAP. To put the headset, it was observed that the EPOC was easier, with the user being able to put it in three minutes, while for put actiCAP it was always necessary someone to assist the user, with an average time of 10 minutes. The game developed is tower defense genre, in which the player must protect a tower from waves of enemies, that appear distant from the tower and go towards it. When an enemy reaches the tower, the user loses the game. The game works in two steps, first the user decides the layout, position, and type of the buildings, and builds the tower defense as preferred. In the second step, the user has no control over the game and the enemies begin to appear, as the user only observes whether the defense architecture will be able to protect the tower of three waves of enemies. The game BCI uses the SSVEP approach, but with only a single flash each time. The performance between EPOC and actiCAP vary depending on the capturing time interval; if it is 0.5 seconds, the EPOC has an accuracy of 66% versus 79% of actiCAP, while in the case of 2.2 seconds, EPOC has an accuracy of 85% versus 88% of actiCAP.

Chumerin et al. [19] present a maze game (Fig. 14a), where a BCI based on SSVEP is responsible for controlling the character represented by the face of Bart Simpson (from the Simpsons cartoon), which must reach a donut. Four yellow arrows act as visual stimuli. One difficulty in the design of the game is the fact that it takes certain time to capture and classify the EEG signals, which causes a notable delay in the response of the game. To minimize this problem, “hiding” the “delay”, the character constantly moves while the command is referring to the next decision point – crossroads – of the maze. On the other side, Maby et al. [77] developed a BCI version of the game *Connect Four* (Fig. 14b), whose goal is to form a row, column, or diagonal of four coins. Two players, represented by the colors red and yellow, alternate in choosing a column to enter the coin. A P300 visual stimulus is used, in the form of a rectangle of the player’s color, flashing on each column, one at a time. Fig. 14b shows a game screen where the visual stimulus is on the penultimate column. The rationale time mitigates the time for choosing a column, giving impression that the game follows the same speed than the conventional version.

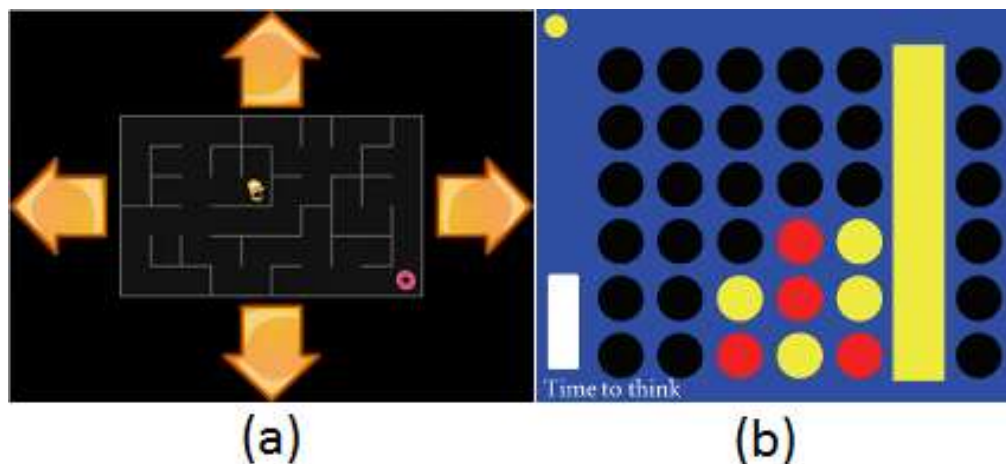


Figure 14. Another graphical interfaces of BCI games based on visual stimulus (a) *The Maze* (b) *Connect Four*. Sources: [19][77].

Congedo et al. [21] developed, supported by the OpenViBE<sup>21</sup> platform, a game with a P300 based BCI, called *Brain Invaders*, inspired by the classic game *Space Invaders*. In this game, gray aliens are presented in a grid and one of them is special, being red instead of gray. The aliens flash randomly, the red flashes to blue, while the other flash to a lighter gray; and to destroy an alien, the user must focus on it visually. The user gains after destroying the alien red, or any 14 aliens. The authors state in their game, three enhancements of conventional BCIs: (i) the alien blink in random groups, providing a higher data speed over BCIs which flash one element at a time, and maintaining a good precision; (ii) the time between two flashes is random, reducing predictability, increasing BCI accuracy and game fun; and (iii) increasing the size of target elements during a flash also increases the accuracy, i.e. the red alien's size is increased by 30% in flashing time.

Angeloni et al. [2] developed a P300 based BCI for a memory game. Five undergraduate students participated in tests with the BCI. Initially each one of them typed words using a BCI speller, aiming to calibrate and configure system parameters. Then they played a game where it is presented a 3x4 matrix of letters. The authors believe that the memory game can be a good way to train users in BCIs. Another P300 based game is *MindGame*, by Finke et al.[35], in which the player, represented by a cartoon character, must move by a grid map. This map contains several trees, and the goal of the game is to visit all the trees. Although the grid contain numerous positions, only those in front of trees are explored, i.e. only those that flash – in P300 style – for the player to select one.

<sup>21</sup> <http://openvibe.inria.fr>.



### 4.3.3 BCI Games based on Imagined Movement

Scherer et al. [112][113] created a BCI called Graz BCI Game Controller, which allows the use of two headsets, the Graz BCI 112 and the EPOC. The BCI was tested in the *World of Warcraft* (WoW) game, that was not originally designed to operate via BCI. The BCI is based on three imagined movements, the right hand turns the screen to the right, the left hand rotates the screen to the left, and the feet moves the character forward. Additionally, certain actions are triggered automatically when the character is standing in the range required to achieve it. Non-critical actions, like picking up a resource, are activated immediately, while critical actions, such as starting a fight with a monster, are carried out only after a period of time, so that the user can cancel the action by moving the character; the biggest limitation found was the low speed of the BCI. This problem has been softened by the macro system of the game, in which a single command may be interpreted as different actions, depending on the current context, making them more flexible and providing a larger input rate. With the EPOC – Instead of Graz BCI – it is possible to send emoticons based on user's facial expression. In this BCI, user's eyes closed make the character sleep, while a user's smile makes the character laugh.

Leeb et al. [67] developed the game *Thinking Penguin* to work via BCI, based on the conventional game PlanetPenguin Racer. In the original game – PlanetPenguin Racer – the player should control a penguin down a snowy mountain, collecting fish on the way. For the BCI version, the authors modified the game putting all the fish in the air. In this new way, the player must enable jumps through the imagination of the movement to lift both feet – dorsiflexion – to collect the fish. For greater immersion, the game takes place in a virtual reality CAVE system, in which the user is surrounded by walls with projectors targeted to each of them. Thus, the game interface is multimodal with movement of the penguin controlled through a joystick and the jumps through BCI. An experiment showed that the concomitant use of the joystick did not compromise the performance of the BCI. According to the authors, the game requires a short training period.

Badia et al. [4] created a serious game for rehabilitation of people, especially adults, who lost the movement of the arms due to a stroke. The game is in first person and the goal of the game is to “block” balls coming towards the player. The game interface changes its input depending on the severity of motor loss of the player, if the player is able to move the arms, interaction is for computer vision: a camera above the monitor tracks the movement of the arms, while a BCI based on imagined movement is used if the player does not have enough arm motor control. The imagination of arm movement stimulates the brain to regain lost motor skills. The control is done by the imagination of the movement of the right and left arms, beginning at the center of the screen (in front of character's torso) and imagination of one of the arms moves it in the right direction (right arm) or left (left arm). The extent of movement is proportional to the

time the player imagine that motion, if it passes a long time imagining, the arm makes a long move to the side of the screen, whereas in a short time the arm makes a small movement.

On the other hand, Bordoloi et al. [12] developed a 2D maze game with a BCI based on imagined movement. The imagination of the movement of both hands simultaneously moves the character up, as the imagination of the movement to close the hand to fist moves the character down, and imagination of one hand moves the character in that direction, i.e. left or right. The game is different from most BCI games, because it switches between capture state, where the BCI tries to classify the thought of the player in one of the imaginations of movement, and the pause state, where no capture is made and the player can relax. To indicate its status, the game presents the symbol of a lamp: when off, the player can relax, and when on, the player must imagine one of the control movements of the game (the lamp symbol was chosen to represent an “idea/thought”). The maze is represented by a square grid, where the square on which the player is standing, is painted in the yellow color.

Hasan and Gan [44] developed a BCI where the game command is not reached from time to time, but when the user decides so. The game is *Hangman* (Fig. 15a), in which the user must find out what is the “hidden” word, by testing whether different letters are part of the word. This game’s BCI is based on two imagined movements, one changes the letters in selection, and other chooses that letter to be tested. The user selects two of three imagined movements detected by the game, i.e. the right hand, left hand, or feet. If the player is tired, the game will notice the performance decrease, and will adapt the control to be more permissive and identify weaker signals of choice. Lopetegui et al. [73] developed *BCI Tennis* (Fig. 15b), a tennis game with a gameplay similar to the classic Pong, but with a theme of the tennis game. An imagined movement of the hand/arm up moves the character upward, and down, moves the character down. The game is intended for users with physical disabilities who cannot play games with the conventional interface via mouse/keyboard.

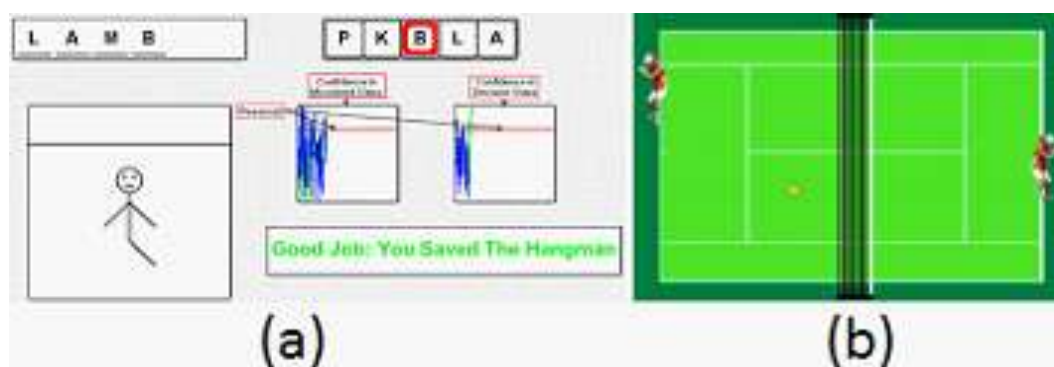


Figure 15. Graphical interfaces of BCI games based on imagined movement (a) *Hangman* (b) *BCI Tennis*. Sources: [44][73].

Laar et al. [125] developed a relatively simple game, called *BrainBasher*, where the player is presented with a symbol representing the left or right hand, and then should quickly imagine the movement of that hand. Speed is the main challenge of the game, following a style of play based on reflection, but this time based purely on a BCI.

Pineda et al. [103] developed a BCI based on imagined movement for a game of the genre First Person Shooter (FPS). The BCI is used only to rotate the character clockwise or counterclockwise. The other commands are made using the conventional keyboard, for example the 'S' key moves the character forward and the 'x' key moves the character backwards. The time needed for training, so that the user can precisely control the character game via the BCI is, on average, of six and a half hours. According to the authors, the immersion in the game accelerated the training process. McCreddie et al.[86], thinking about game accessibility for visually impaired, developed *Auditory Asteroids*, a game where the only feedback is sonorous, i.e. no visual interface. In the pilot study, the authors develop a sound version of the game Asteroids, in which the user controls a spaceship and must avoid asteroids. Seven speakers are arranged on a sphere geometry. The control is a BCI based on imagined movement, with the imagination of the movement of the left and right arm, moving the ship in the corresponding direction.

Wei [131] used the BCI2000<sup>22</sup> system as control to a game where the player must drive a car and avoid obstacles imagining the movement of the right or left arm. The game does not punish the player drastically, in an attempt of not to discourage the user because of the difficulty found in this new interaction way: if the player hits an obstacle, the vehicle simply stops and makes a slow detour around the obstacle. Thus, the feedback error is not frustrating to the user. On the other side, Coyle et al. [24] developed a game of the asteroids genre, in which the player must avoid asteroids imagining left/right hand movement, and feet, causing the ship to move down, and tongue, causing the ship to move up. In the game, a lot of graphic elements appear to distract the player, like stars, that move across the screen. It is not needed to avoid these additional elements, since they exist only to increase the difficulty of the game and make it more interesting.

Bonet et al. [11] study the interaction involved in a game called *BrainArena*, controlled by a multi-user BCI. In *BrainArena* the user must move a ball to right or left, imagining the movement of the hand in the same direction until the ball reaches the bottom of the screen. The authors argue that a BCI may be multi-user at four different levels: (i) level of signal processing, where signals from users are mixed in a single analysis; (ii) level of decision, in which the analysis of each user are used together, for example, finding a dominant emotion of a cine audience; (iii) the level of interaction technique, in which the users' analysis are used to perform a multi-user command, for example, for a user to drag a window, one controls direction and another controls the way, that are combined to perform a single command; and (iv) application level, where each user has independent interaction, such as control of several characters in a virtual world, each

---

<sup>22</sup> <http://www.bci2000.org>.

being controlled by a different user. The game developed by these authors is therefore multi-user at the decision level.

Games with some physical component, different from those purely digital, can also have an interaction by BCI. One of these works is LaFleur et al.[62], that use a BCI in a game called *AR.Drone*, where the player controls an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) – a quadcopter – together with the feedback from a camera attached to the front of the UAV. In the BCI, the player must learn to imagine four hand movements: (i) the movement of the right hand turns the quadcopter clockwise; (ii) the left rotates counter-clockwise; (iii) the imagination of both hands to same time increases the height of the quadcopter; and (iv) at rest/relaxing – without imagination of hand movements – the quadcopter loses altitude. The UAV is constantly moving forward. The goal is to cross 2.30m diameter rings. First the user must go through several training sessions where should learn to control the vehicle in one dimension – just rotate clockwise/anti-clockwise – to then train control in two dimensions, adding the command to raise/lower altitude with imagination of both hands simultaneously versus rest/relaxing state. Then the user must train in a virtual world, to finally control the quadcopter in a real environment. The authors use a school gym to the real environment, with two rings placed close to the center, facing one another at a distance of 5.2m from each other.

Another work that embraces physical elements is *BCI-Pinball*, by Tangermann et al.[124]. These authors change the design of a conventional pinball machine, so that it is played by a BCI. The control is made through the imagined movement of the hands, where each of these movements activates one of the two pinball flippers. To adapt to the current reality of BCIs, three modifications were made: (i) the side exits were closed, so the only way out of the ball is the gap between the flippers; (ii) an obstacle was added between and slightly above the flippers, so that the ball always tends to one of the two sides – since a perfectly vertical fall would require the simultaneous activation of the two flippers, which requires a very high temporal accuracy of the BCI; and (iii) the slope of the machine was reduced to slow the ball drop. With this new machine design, BCI served as a good control, achieving even the need for high-speed response inherent to pinball games.

#### 4.3.4 BCI Games based on Hybrid Detection

In the game *Bacteria Hunt* (Fig. 16a), developed by Mühl et al.[94], the user controls an amoeba to eat bacteria in a certain time limit. The game has four stages, each one using a different detection approach. In the first stage, control is via keyboard, but has a chance of not working. In the second stage, the concentration is used, where high levels decrease the chance of the keyboard to fail. In the third stage, SSVEP stimulus is added, when the character comes close to a bacterium, the user must focus on a circle which flashes upon the amoeba and bacteria, otherwise the

bacteria escapes. In the last stage, P300 stimulus is used, the bacteria are divided into groups and each group increases in size and flashes, at a time.

Pires et al. [105] developed the *BCI-Tetris* (Fig. 16b), a version of Tetris game controlled by a BCI. In the game, the piece rotation is selected by P300 in four possible rotations, while its positioning is done by imagined movement, with the imagination of movement of the left/right hand moving the piece for the respective sides. The authors also experimented alternative designs, before deciding for the hybrid version. In a previous version, the player selected the piece and its rotation at the same time via a P300 interface. The large number of possibilities (16) decreased the accuracy, so the authors attempted a second version where the piece is automatically selected, then the player selects the rotation through P300 and finally chooses one of the four positions for the piece, also in the P300. With the addition of detection by imagined movement for the selection of the position, according to the authors, the game managed to achieve good accuracy while keeping a certain fidelity to the style of the original Tetris.

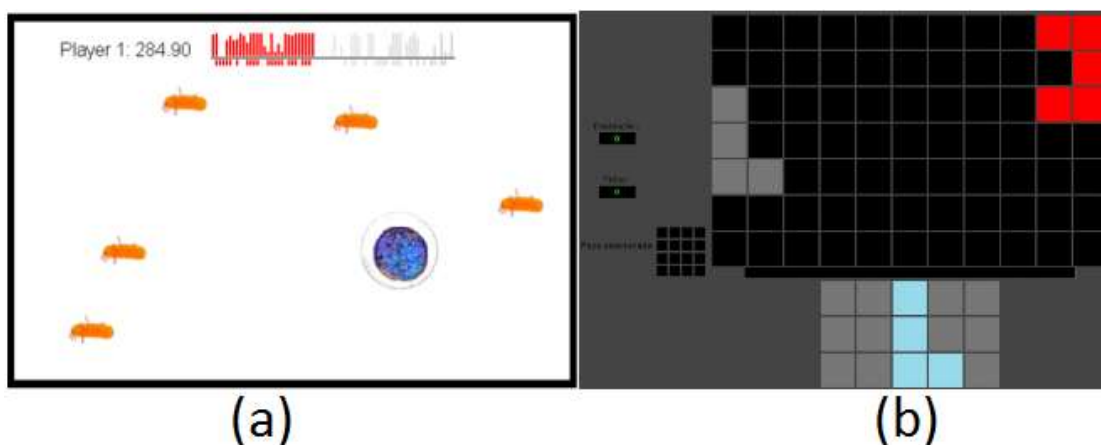


Figure 16. Graphical interfaces of BCI games based on hibrid detection (a) *Bacteria Hunt* (b) *BCI-Tetris*. Sources: [94][105].

An adapted BCI for an existing game is presented by Maruthappan et al. [83], which developed *Brain-Chess*, an elaborate BCI control to play chess. The player must participate in training sessions, which also aims to capture the mental profile of the player in every step of controlling a move. The first training is done with a special memory game in which each type of chess piece is represented by a letter with a picture of a piece. In this training, it is registered a specific signature of the “thinking” associated with each piece of each user. So, after this training, it is possible to detect which piece the player wants to move. In the second part of the training, the player should imagine the movement of the chess pieces, and the signal is recorded for each type of movement, such as “move diagonally” and “move horizontally”. Finally, the player selects to which square he wants the piece to move. This selection is made by P300, where the user defines the position of the board choosing a letter and a number in a matrix.

### 4.3.5 A Synthesis of the Main Findings of the Literature Review

Table 4 presents a synthesis of the BCI-based games presented above.

**Table 4. Synthesis of the literature BCI-based games.**

Work		Game genre	Player	Detection approach	
Year	Ref.				Game name
2009	[61]	<i>Finding Star</i>	Adventure	Neurofeedback	
2012	[53]	(horror game)	Puzzle		
2012	[68]	<i>Archery Game</i>	Sport		
2011	[52]	(ADHD rehabilitation)	Sport		
2011	[23]	<i>Brain Maze</i>	Puzzle		
2013	[5]	<i>Emotion Walking</i>	Simulation		
2012	[8]	<i>Lost in the Dark</i>	Puzzle		
2011	[122]	<i>Mind Garden</i>	Simulation		
2010	[136]	<i>NeuroWander</i>	Adventure		
2011	[42]	<i>Mind the Sheep</i>	Puzzle/ Action		Visual Stimulus (SSVEP)
2012	[101]		Multi		
2004	[63]	<i>MindBalance</i>	Sport		
2007	[81]	(2D race game)	Sport		
2012	[129]	(BCI tower defense)	Strategy		
2012	[19]	<i>The Maze</i>	Puzzle		
2012	[77]	<i>Connect Four</i>	Strategy		
2011	[21]	<i>Brain Invaders</i>	Shooter	Visual Stimulus (P300)	
2012	[2]	(memory game)	Puzzle		
2009	[35]	<i>MindGame</i>	Puzzle		
2011	[112]	<i>World of Warcraft</i>	MMORPG		Massive multiplayer
2012	[113]				
2013	[67]	<i>Thinking Penguin</i>	Racing	Imagined Movement	
2013	[4]	(Motor rehabilitation)	Sport		
2012	[12]	(movement maze game)	Puzzle		
2012	[44]	<i>Hangman</i>	Puzzle		
2011	[73]	<i>BCI Tennis</i>	Sport		
2009	[125]	<i>BrainBasher</i>	Action		
2003	[103]	(BCI for a FPS game)	FPS		
2012	[86]	<i>Auditory Asteroids</i>	Shooter		
2010	[131]	(Vehicle control game)	Simulation		
2011	[24]	(Asteroids-like game)	Shooter		
2013	[62]	(AR.Drone BCI)	Action		
2013	[11]	<i>BrainArena</i>	Sport		
2008	[124]	<i>BCI-Pinball</i>	Action		
2010	[94]	<i>Bacteria Hunt</i>	Action		Hybrid Detection
2011	[105]	<i>BCI-Tetris</i>	Puzzle		
2011	[83]	<i>Brain-Chess</i>	Strategy		

Based on the analysis of games of the literature, it is found that the first trend is the fact that games developed with a focus on BCI are usually simplified so that the BCI is able to exercise total control over it. Although, it is possible to seek the most similar/close genre to a game based on BCI, in order to find the most appropriate BCI approach. These games follow genres based on classic games, like Asteroids (shooter), Pac-Man (puzzle-maze) “snake” game (action-snake) and chess (strategy-board). This trend is due to two reasons, i.e., to simplify the necessary controls and the development of the game, so that the focus is on the BCI design.

When using an interaction based on visual stimulus, is important to take into account the pace of the game: an oscillatory stimulus, in which everything flashes simultaneously, indicates a frenetic pace and high frequencies could indicate a more dangerous element; whereas a transient stimulus, where elements flash one at a time, indicates a milder and calculated pace. As an example, a game with “bombs” could use oscillating stimulus, with higher frequencies indicating bombs about to explode, while a game of puzzle could use transient stimulus, where the user thinks quietly about the next step. Even in games based on visual stimulus, the matrix disposal usually provides greater accuracy. A matrix disposal is good for board games, in which the “world” consists of a grid of squares. Games like Minesweeper and Battleship have a direct mapping to this graphic disposal.

In turn, detection based on imagined movement appears to be most advantageous for a 3D environment control, and has been used in 3D shooting games (FPS), racing, and Massively Multiplayer Online (MMO). Another interesting question is the influence of social elements in these games based on BCI, as the break of the controlled environment due to social interactions outside to *Mind the Sheep*, the use of *Connect Four* in competitiveness, and multi-user interactions in the design of *BrainArena*. The disadvantages of certain approaches, such as limited control offered by detecting the concentration of the user, are not criteria for elimination, but for option – presenting the reality that it is difficult to develop a game that uses only the concentration, but on the other hand, to use it as part of the control of the game can be very interesting.

In *Finding Star*, concentration serves as a relaxed state of the character, which thus can sleep; while in *WoW Alpha*, concentration is used as the “anger” of the user, making the character to be transformed into its wild form. In both games, the concentration is used as part of control, managing the current difficulties of this approach.

In action games, sports, FPS and Real-Time Strategy (RTS) the biggest challenge is the time present in the gameplay. These games need reflexes and quick actions by the user, and the quick and instant pace characterized by these genres is hardly captured by current BCI. In the case of games where there is no notion of time, like puzzle games, strategy and Role-Playing Games (RPGs) based in turns, it is easier to use BCI as control. The smoother pace also resembles the high reasoning required in each step. Shooter genre games, such as asteroids or alien invaders, combine with BCIs based on visual stimulus, because enemies can be used as a focus target.

## 4.4 Design Rationale

Digital games, including BCI-based games, are very diverse applications, ranging in genre, style and target audience. Therefore, it is difficult to define unique guidelines that cover all genres of digital games. A more flexible approach is the development of a Design Rationale – a reflection and documentation about the design decisions, as well as solutions and available technologies [65]. The design rationale of BCI-based games can be useful for the academic community and industry, since it outlines the major design issues that should be considered when developing games that use this new interaction way. In the design rationale, every choice is balanced with pro and con arguments, so that game designers – not necessarily specialize in BCI – can get relevant information about the design. Fig. 17 presents the design rationale developed and mapped with Compendium tool [138][139]. It is important to highlight that the development of this design rationale is based on previous results of our research in the context of BCI [34] and by the analysis of the BCI games from the literature, as discussed earlier.

The reading of the design rationale starts in “Digital games based on BCI” (represented by the icon in Fig. 18a) from where the questions/reflections start, represented by the symbol of Fig. 18b. There is no need to follow the questions in a specific order, but the design rationale suggests an order by numbering each of the questions from the first to the eighth. The seventh question has only importance in cases where detection based on visual stimulus is used, thus, it is a sub-question that comes, situational, from question 6). Thinking first about the game genre facilitates the reflections made by other questions. Each question is linked to choices, possible answers to the question, represented by the symbol of Fig.18c. For each of these choices, there are positive points (represented by the icon in Fig. 18d), negative points (represented by the icon in Fig. 18e), or variable, which can be pro or con depending on the context of the game design (represented by the icon in Fig. 18f). The choices of the genre questioning are represented by a different symbol (Fig. 18g) because they are a definition that comes from the concept of the game, so instead of positive/negative points, they have recommendations linked to them (represented by the symbol in Fig. 18h).



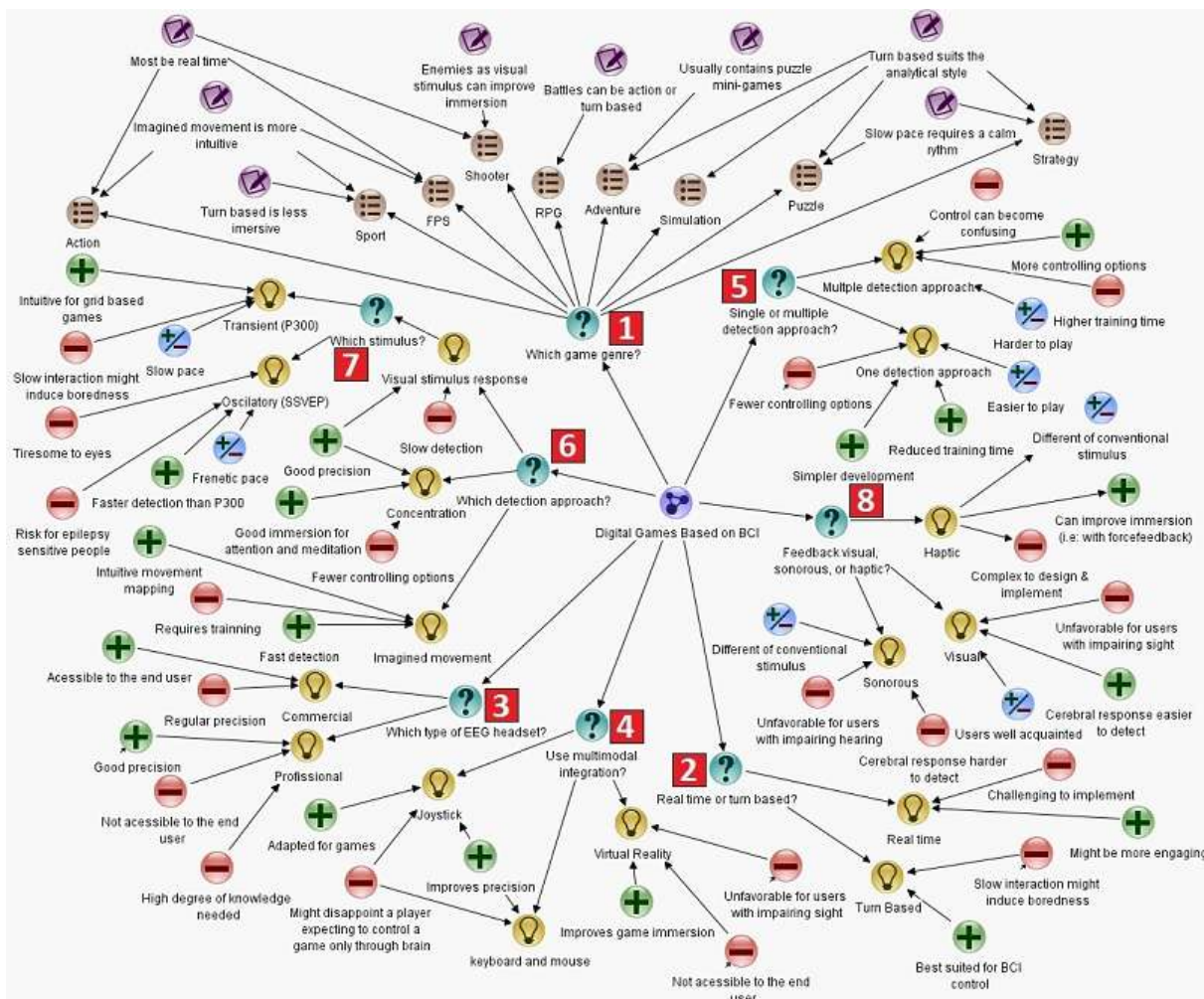


Figure 17. Design rationale for digital games based on BCI, proposed in the present work.

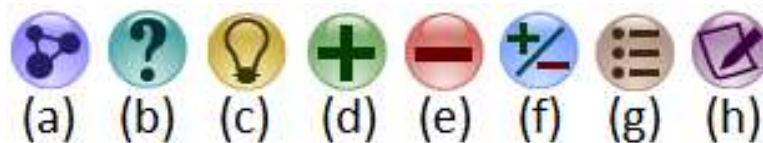


Figure 18. Symbols used in the design rationale.

The design rationale is a tool that allows the game designer to incorporate controls via BCI in a game design, and to consider the current reality of this kind of interface. Hence, the designer can develop a design even without knowledge of the BCI field. Some choices may appear to have very limiting negative points, as “few control options”, but in fact, they not affect the design of certain games, like the acclaimed game Jetpack Joyride, which has only a single button to control. Similarly, there are positive points that will not matter for a specific design. That is, the design rationale does not provide universal answers, but questions to be considered and adapted by the game designer.

As seen, the design rationale presented is intended to explain the opportunities and challenges of each approach, while guiding the designer in the construction of the game –

especially related to controls. The developed design rationale does not embrace decisions that depend of the target audience, such as user’s age or experience, because it intends to be applicable to any game with BCI – independent of the user.

## 4.5 AdmiralMind Battleship Study

In this section, first, we present the methodology used in the study of AdmiralMind Battleship BCI game, and then present and discuss the results of the study.

### 4.5.1 Methodology

The design rationale presented is a tool to be used in the design cycle, shown in Fig. 19, being the second step of each iteration of the cycle. Initially, the game designer must think about the concepts of the game, i.e., its central ideas. In this first step, of **game concept**, do not set any specific control, but the goals of the game, and entertainment elements. In the second step, the designer gets support in the **design rationale** to analyze, and consider, the way a BCI control works in the intended game concept.

Based on the game gender, it is possible to see the recommendations suggested by the design rationale and take them into account, considering other decisions stated on the design. In the third step, the designer should define the reason for each of the decisions, defining the **rationale** of them. This definition is made through the design rationale, providing answers to each one of the questions set out by the design rationale. Finally, the last step of each iteration is the creation and reflection of the **game design**. At this stage, the game should already have a significant planning, with defined gameplay, controls, and goals. If the designer is not satisfied with the game, or if the designer wants to think about alternatives, additional iterations can be made in the design cycle of a game with BCI. The process proposed in this work does not cover entirely the step 4 (game design) as it does not lead to a “complete” game design, but allows the designer to get closer to this goal. The design rationale does not define, for example, a graphical interface for each game.

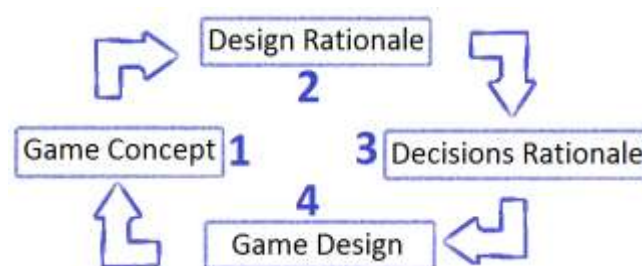


Figure 19. Overview of the design process for digital games based on BCI, proposed in the present work.

As shown in Fig. 19, the output of each step serves as input to the next step. So, it is only possible to use the design rationale after an initial concept of the game; the setting of the decisions should be made after reading, analysis, and reflection of the design rationale; and the game design is built with the decisions made (and the reflections coming from the entire cycle of design).

#### 4.5.2 Results

As a study of the application of the proposed design rationale, decisions are discussed for a Battleship game. The game is played by two players, and each one of them arranges their ships in the respective territory, i.e., a board in grid/matrix style. Then, they alternate in turns, choosing a square of the enemy's territory to attack. The target player indicates whether or not the shot hit, showing if there is a ship in that point. The first decision of the designer is to define the genre of the game, in this case it was decided to draw the game as "strategy", based on how battleship is played. Then, the designer thinks about the pace of the game, if it should be in real time or turn based. It is decided to be turn based, based again in the original game.

Now the designer must make several decisions about the BCI game. What headset use, commercial or professional? Using design rationale, the designer observes that professionals have better accuracy, but it is difficult to acquire – usually present only in research or medical centers. On the other hand, commercial headsets are easier to get and to use. Commercial headsets have less precision, but reach a larger audience. Thus, the designer decides to use a commercial headset. To detection approach, it is desired one that offers enough control to select multiple squares on the board, so by eliminating the concentration way (limited control), and favoring detection by imagined movement – that would be used the imagined movement of the hand to navigate the board, and of the feet to select – and the one based on visual stimulus – where the visual focus allows the selection of the desired square. The imagined movement approach requires training, but it offers a faster interaction and does not depend on game's graphic elements; whilst the visual stimulus approach does not need training, but it has a slow interaction and depends on arbitrary changes on the game visual interface – as continuous flashes. If the visual stimulus is used, the P300 approach seems more appropriate, as it has a good mapping to grid, and mild pace stimulates strategic thinking.

The SSVEP approach seems to be unfavorable, the large amount of square flashing intermittently would cause great discomfort to the user. Then, it is decided what kind of headset to use, professional or commercial? It is expected that the game is played by people outside the academic world, so the best way would be to use a commercial headset – accessible to the target audience. As the game is simple – and has few controls – a multimodal complement with keyboard and mouse would make the game less interesting, and a form of hybrid detection would be confusing and unnecessary, so it is best that the game is purely controlled by a BCI, and only

one detection approach. Still about multimodal interaction, a virtual reality environment is attractive, but the high cost of the equipment would not be accessible to the end user, and would project more complex – requiring a more elaborate graphical interface. Finally, it is defined that the feedback should have be mainly visual, but also a sonorous feedback, indicating right or wrong, would enrich the user experience.

**Table 5. Results of the Decisions Rationale for a BCI game.**

<b>Design decision</b>	<b>Rationale</b>	<b>Game design</b>
1. What is the game genre?	<u>Strategy</u> .	Guessing Game, as the pen and paper game.
2. Real time or turn based?	The design will follow the original style of the game, in which the players alternate in <u>turns</u> .	Each player must choose an opponent's board position, which indicates the hit or miss – ending the turn.
3. Commercial or professional headset?	<u>Commercial</u> , once the target user are gamers with lower purchasing power.	The headset will be EPOC, which has a good cost-benefit ratio between ease of acquisition and resources.
4. Do use of multimodal interface?	<u>No</u> . Battleship has limited commands, the player just chooses a square by turn. More entries would make the game more complex without offering benefits in return.	The game is controlled only by BCI.
5. One detection approach or hybrid detection?	<u>Hybrid approach</u> . A hybrid approach can be more flexible to the player if used with wisdom, despite being necessary to be cautious to avoid a confusing control.	The game will provide more than one detection approach, but only one is active at a time. This will allow the player to select the preferred interaction.
6. Which detection approach to be used?	<u>Visual stimulus</u> , since the game environment is a grid – which is the classic matrix interface. Furthermore, flashes give a clearer impression of a battlefield. Additionally, it will be used detection based on imagined movement – simulating the movement, in the real game, of moving the pin to the target.	The opponent's board squares will act as visual stimuli, flashing at the time of selection. In the imagined movement mode, the player will be able to control a cursor by moving left/right with the imagination of the movement of the arms, moving down with the feet, and moving up with the imagination of arms' movement together simultaneously.
7. Which stimulus to be used?	<u>P300</u> , since a milder pace stimulates thinking and turn's strategy.	The rows and columns will flash randomly, causing an impression of danger.
8. Feedback visual, sonorous or haptic?	<u>Visual</u> , considering that the game depends on visual elements because of the BCI detection approach chosen. Additionally, an audio feedback is necessary to indicate hit or miss of the target.	The constant feedback from the game will be visual, but there will be audio tips to indicate the player's turn, and a blast to indicate a hit.

It is important to detach that the design rationale outlines the questions to be answered by designing a game based on BCI, but does not define specific responses such as, for example,

related to the graphical interface elements of the game. The designer can choose the alternatives, being aware of the pro and con of each one, and adapting it to reality, finally applying the design rationale for the specific scenario. The presentation of the battleship game scenario, as described above, illustrated how the design rationale developed in this work can help in the reflection of the designer, regarding the design decisions of a digital game based on BCI.

### 4.5.3 Discussion

Digital games based on BCI have a different interaction reality, compared to games with conventional controls, e.g. via keyboard and mouse. The BCI control has great potential for immersion, and can be used in various game genres. Several of the literature works show solutions with multimodal interaction, i.e. BCI complemented with another interaction way. This demonstrates, in a way, how complex is the game design based only on BCI.

The use of BCIs in games causes a strong impact on the interaction design, changing gameplay aspects, even related to the graphical interface. Neurofeedback based games often use a bar to indicate the level of attention/relaxation of the user (e.g. both in Fig. 12). On the other hand, games based on visual stimulus need elements that are strange to the game (that operate as the stimuli). In *Mind the Sheep*, the three flashing circles clashes from the scenario (Fig. 13a), while in *MindBalance* game, it was necessary to insert checkered flags on each side of character's rod, notwithstanding balance rods have no flags (Fig. 13b). Still, in *The Maze*, it was necessary to insert huge arrows, occupying half of the screen; arrows that would not exist if this game did not use BCI (Fig. 14a). In *Connect Four*, columns become out of visibility, hidden by the swinging bar, which complicates the player's reasoning (Fig. 14b).

On the other hand, some games based on BCI add unnecessary elements such as a graphic with the reading of brain waves – a feedback difficult to be understood by a player (Fig. 15a/Fig. 16a). The care with the graphical interface is more important in games with hybrid detection, because in these games, control is already complicated and it is difficult to deduce how to play. Choices – such as detection approach – will impact on gameplay and graphical interface. However, the purpose of the design rationale is not to define the graphical interface of the game, but rather support the designer, bringing reflections of how to use BCI in a game.

In games with the “stealth” element, the user should be relaxed to improve the ability to keep on hidden; in puzzle games, mental effort combines with the fun; and in games with virtual reality, BCI extends the feeling of being in another “world”. It is understood that the design rationale, as described, supports the designer in the design of new BCI-based games. It is difficult to adapt conventional games for BCI, as they were developed and guided by other requirements. The pace in conventional games can be very fast, and the required accuracy is very high. Whereas, in the case of BCI, it is necessary to adapt to the current reality, where EEG detection has a delay and consists of an interaction with a slow pace.

Most of these BCI controls require a lot of concentration/focus from the user, which can be complicated in situations of actual use, as the work of Obbink et al. [101] shows, in which the user is not able to “pause” the BCI control. In the literature, most BCI games are based on visual stimulus, generating an accessibility problem that complicates or forbids its use by visually impaired users. Moreover, it affects cohesion/immersion of the design, since having many stimuli – like flashing circles in black and white – clash of the visual style of the game, and visual elements become forced and artificial. A good adaptation can minimize, or even eliminate, these challenges of BCI games. Then, the design rationale helps in creating a game whose BCI control is well adapted, improving the user experience. Another benefit of the design rationale is to encapsulate the knowledge about the BCI field, allowing the design of games by developers who have low knowledge in BCI.

BCIs change significantly the interaction way with systems in the area of BCI games, bringing new interaction ways that create a new connection to the player, such as: the creation of virtual “members” through imagined movement; the transfer of the state of mind to the game characters - which relax or concentrate along with the player; the mental selection with the visual image currently in the brain (the one being focused); the brain control of objects (like the telekinetic power of the gaming world); and even a link between player’s heart with the game character’s – in which emotions like fear are explored in the game. This provides great immersion potential of the game: the player must remain calm as the secret agent infiltrated in the enemy base; the player can feel the fear of the hero in the sudden appearance of a spirit; and imagining an arm wielding a sword, the player can hit a heroic stroke to the villain who terrorizes the city.

This work deals with any type of game controlled by BCI, without being attached to a specific genre or approach. But at the same time, it identifies the differences in each game, arguing that the design depends on the scenario and game desired. Still, it does not point out strict rules to be followed, but the decisions to be made by the designer during the design of a BCI-based game. There are not ideal approaches, it is necessary to adapt to the context and take into consideration that each one has pro and con points. This work presents, as far as we know, the first design rationale to guide designers in the design of new BCI-based digital games. The design rationale is able to cover all kinds of games, without losing the specificity required for each case. Hence, it contributes to any designer interested in developing a game based on BCI.

## 4.6 Conclusion

The chapter offers a literature review about digital games based on BCI. Based on this survey, and on previous results of our research in this area, we developed a design rationale to support game designers in designing digital games based on BCI. Still, we conducted a study where we apply the design rationale in the design process of a naval battleship game controlled by BCI.

As future work, based on the results of this work, we suggest the implementation/coding of AdmiralMind Battleship, whose early stages of the design process were supported by the design rationale presented in this work. Later, it is still considered relevant to evaluate the interface and user experience with the target audience of this BCI game.

## **4.7 Tomada de Decisão**

Apoiado pelo design rationale concebido, podemos dar início a fase final do nosso objetivo principal - O estudo, design, e desenvolvimento de um jogo baseado em Interface Cérebro-Computador.

Esta fase final diz respeito ao desenvolvimento do jogo, que atua como uma prova de conceito na viabilidade de jogos baseados em ICC. A implementação também levantará uma série de técnicas na construção de um jogo moderno, como a possibilidade de se jogar em rede.

## Capítulo 5

# AdmiralMind Battleship BCI Game: Design e Implementação

### 5.1 Introdução

O crescimento da indústria de jogos vêm sendo acompanhado do avanço de novas formas de interação, como jogos de dança baseados no reconhecimento de movimentos do usuário, e o surgimento de jogos com controles via dispositivos sensíveis ao toque, tais como, smartphones e tablets. Assim, o design de um jogo deve, também, levar em consideração a forma de interação cujos jogadores utilizarão. Desse modo, um jogo para desktop possui um controle adaptado para mouse e teclado, além de telas relativamente grandes; e já um jogo para smartphone é limitado a um controle touchscreen e telas pequenas.

Interfaces Cérebro-Computador (ICCs) permitem que aplicações respondam a atividade mental do usuário. Atividades como movimento imaginado, concentração, stress ou relaxamento, e foco visual. ICCs apresentam um potencial de entretenimento com controles "especiais" em jogos permitindo, por exemplo, que um personagem pule quando o usuário apenas imaginar seus pés movendo-se, ou que o personagem durma – e permaneça dormindo – enquanto o usuário estiver relaxado, ou mesmo que o usuário destrua inimigos com seu “olhar”.

Em trabalho anterior [34], destacamos sistemas interativos baseados em ICCs disponíveis para usuários finais, bem como desafios de interação encontrados na tecnologia atual. Analisamos em outro trabalho [33], o público dessa nova interface, e expomos a perspectiva dos envolvidos através do referencial teórico-metodológico da semiótica organizacional [71]. Já em nosso trabalho mais recente, realizamos uma consolidação do design usado em jogos baseado em ICC - nesse trabalho [31], foram identificados e analisados jogos que utilizam ICCs e, baseado nessa análise, desenvolvemos um design rationale para apoiar o design de jogos baseados em ICC.



Fundamentos nestes trabalhos supracitados e como prova de conceito, apresentamos, neste trabalho, o design e implementação de um jogo de batalha naval baseado em ICC, denominado AdmiralMind Battleship. AdmiralMind é jogado em rede, com uma arquitetura cliente-servidor, e conta com diversas variações em relação aos jogos de batalha naval “clássicos”. A ICC usada é baseada em movimento imaginado, onde o usuário seleciona a posição imaginando o movimento dos braços, e atira imaginando o movimento dos pés. Durante o processo de desenvolvimento do jogo, e da ICC, extraímos diversas lições aprendidas, para que a comunidade possa dar continuidade a estudos no desenvolvimento de novos jogos baseados nessa forma de interação.

O jogo é jogado em rede, com uma arquitetura cliente-servidor, e conta com diversas variações em relação aos jogos clássicos de batalha naval. Optamos pelo jogo de batalha naval por entendermos ser um jogo adequado a várias formas de interação, não requer comandos complexos - apenas seleção de posições - é tolerante a jogadas lentas - por ser baseado em turnos - e não ser um jogo de tempo real, pode ser jogado por mais de um jogador - permitindo uma interação entre usuários, é um jogo “neutro” quanto ao público - conhecido mundialmente e podendo ser jogado por todas as idades, cujas regras podem ser aprendidas em pouco tempo, e contando com diversas variações - estimulando design exploratório e adição de novos recursos.

Este Capítulo está organizado da seguinte maneira: a Seção 5.2 apresenta jogos de batalha naval relacionados; na Seção 5.3 relatamos o desenvolvimento do jogo, discursando sobre seu design e implementação; a Seção 5.4 descreve as lições aprendidas no desenvolvimento de jogos baseados em ICC; em seguida, apresentamos uma discussão sobre os resultados deste Capítulo; e na Seção 5.5 destacamos as considerações finais e trabalhos futuros.

## 5.2 Trabalhos e jogos relacionados

Alguns trabalhos acadêmicos já exploraram o jogo de batalha naval com intuítos variados. No entanto, nessa seção descrevemos alguns trabalhos com foco em entretenimento. Silva et al. [117] expandem a interação do jogo através de realidade aumentada, onde o feedback visual do jogo é misturado com o cenário real - apesar do jogo ser jogado no computador (Figura 20a). Já no trabalho de Nicola et al. [9], o objetivo do projeto é um jogo de batalha naval para celulares, conectados por bluetooth, onde o disparo é feito baseado na posição GPS do jogador, ou seja, ele precisa mover-se para posição que deseja atirar (Figura 20b).

Sjöström [118] desenvolveu uma versão háptica do jogo, voltada para usuários com dificuldades visuais. O usuário joga colocando um dedo na interface *PHANTOM*, e assim pode sentir cada uma das posições do campo: uma sensação de “onda” é sentida em posições onde ainda não se atirou, neutra em posições que já se atirou, vibrações caso tenha acertado, e sensação de “bolhas” quando um navio é afundado. Hill et al. [46] usam o jogo de batalha naval de forma educativa, ensinando conceitos de sistemas operacionais para alunos de ciência da computação.

Srisuphab e Silapachote [121] também usam o jogo de forma educativa, ensinando inteligência artificial baseada em regras para alunos de Ciência da Computação. Meuffels e Hertog [87] consideram o jogo de forma parecida (baseado em regras) e abordam-no como um quebra-cabeça, em que mostram como resolvê-lo através de programação linear inteira.

Já Bottino *et al.* [2014] desenvolveram um jogo sério de batalha naval, intitulado *Hexip*, com o intuito de treinar o raciocínio lógico de crianças, utilizando uma organização/tabuleiro em hexágonos diferente da clássica forma em grade (Figura 20g). E no Batalha Naval da *Conceptis Puzzles* (Figura 20c) [2013] o jogo é adaptado para um quebra-cabeça similar a campo-minado, onde é preciso marcar as posições dos navios utilizando um tabuleiro parcialmente preenchido.

Na vertente mercado, vimos que existe interesse nesse tipo de jogo, pois encontramos diversos jogos de batalha naval disponíveis gratuitamente na Internet como o *Battleship Fleet* [6] (Figura 20i), *Battleship General Quarters* - Figura 20d [20], *Pogo Battleship* (Figura 20e) [106], e *Cruiser Battleship 2* (Figura 20f) [45]. E algumas versões comerciais, como o jogo de tiro “*Battleship: the game*” (baseado no filme “battleship”) que utiliza alguns designs baseado no jogo de batalha naval.

Existem também jogos de batalha naval disponíveis que adicionam alguma variante diferencial, no jogo de Buagaga (Figura 20h) [*Warship Strafe* 2009] é adicionado uma temática onde o bombardeamento do campo do computador é feito por um helicóptero, enquanto que o computador bombardeia o campo do jogador com um avião. Essa diferenciação gráfica ajuda o jogador a se localizar no quesito de turnos. Enquanto que no jogo *Torpedo Attack* (Figura 20j) [2008] os campos são dispostos em ângulos diferentes de forma a parecer uma onda, além disso existe uma variante adicional onde após afundar completamente um navio é preciso participar de um *mini-game* onde é apresentado o navio inimigo movendo-se da esquerda para direita e o jogador deve apertar o mouse no momento certo para que um torpedo intercepte o mesmo.

Em nossas pesquisas, não encontramos nenhum jogo de batalha naval baseado em ICC. Até onde sabemos, AdmiralMind Battleship é o primeiro jogo de batalha naval nesta modalidade de interação. Os trabalhos de batalha naval, aqui apresentados, destacam a viabilidade do jogo como estudo de novas interações, e novas técnicas de educação. Foi importante também avaliar jogos de batalha naval, mesmo que os mesmos não sejam baseados em ICC, como ponto de partida para um design de jogo de mesmo gênero. Com os mesmos atuando tanto como fonte de inspiração, como de comparação. A Tabela 6 lista os trabalhos mencionados, sua forma de interação e jogadores.

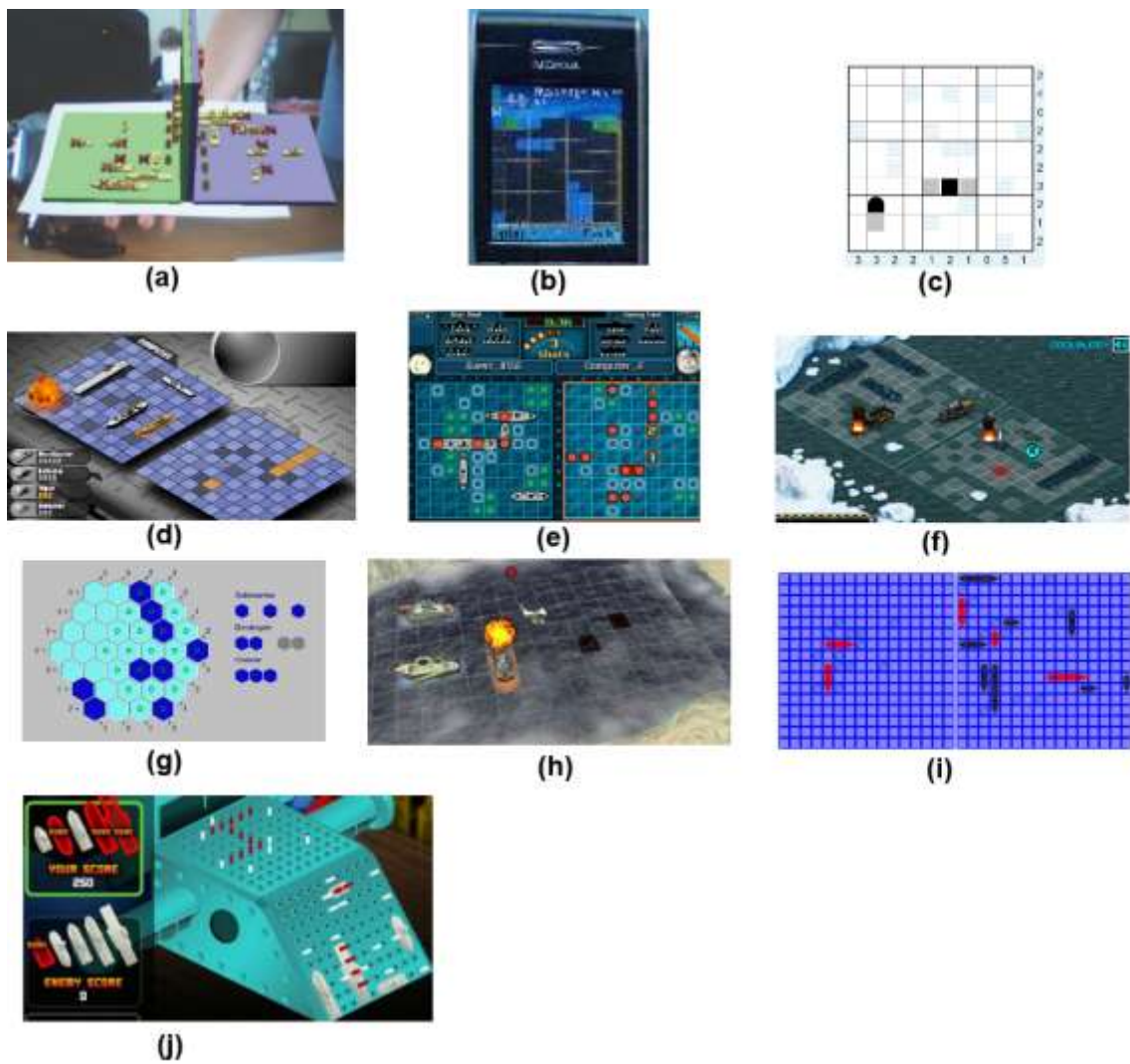


Figura 20. Jogos relacionados (a) Augmented Reality battleship game, (b) Cellphone GPS-based battleship game (d) Battleship General Quarters (e) Pogo Battleship 2 (f) Cruiser Battleship 2 (g) Hexip (h) Warship Strafe (i) Battleship Fleet (j) Torpedo Attack.

**Tabela 6. Trabalhos baseados no jogo de Batalha Naval**

<b>Trabalho</b>	<b>Interação</b>	<b>Nº. de jogadores</b>	<b>Plataforma</b>
[117]	Realidade Aumentada	Player vs. Player	Desktop
[9]	Imersão por GPS	Player vs. Player	Celular
[118]	Háptica e teclado	Player vs. Computer	Phantom
[46]	Papel e Caneta	Team vs. Team	Flash
[121]	Peças de quebra-cabeça	Team	Flash
[87]	Abstrata	Computer	Flash
[140]	Mouse	Player vs Computer	Desktop
[6]	Mouse	Player vs. Computer	Flash
[20]	Mouse	Solo (Puzzle)	Flash
[106]	Mouse	Player vs. Computer	Flash
[45]	Mouse	Player vs. Player	Flash
[60]	Mouse	Player vs. Computer	Flash
[144]	Mouse e Teclado	Player vs. Computer	Desktop
[141]	Mouse	Player vs. Computer	Flash
[142]	Mouse	Player vs. Computer	Flash
[143]	Mouse	Player vs. Computer	Flash
Our <sup>1</sup>	Interface Cérebro- Computador + Mouse/Teclado	Player vs. Player	Desktop

### 5.3 AdmiralMind Battleship BCI Game

AdmiralMind Battleship<sup>23</sup> utiliza uma BCI e é inspirado nos tabuleiros clássicos de batalha naval. O jogo é multi-plataforma – atualmente, está disponível para Windows (32-bit e 64-bit) e Linux – de código aberto, e contando com diversos recursos. Optamos pelo jogo de batalha naval por ser um jogo que: não requer comandos complexos - apenas seleção de posições, é tolerante a jogadas lentas - por ser baseado em turnos e não ser um jogo de tempo real, pode ser jogado por mais de um jogador - permitindo uma interação entre usuários, não depende de gráficos 3D - simplificando a implementação, é um jogo “neutro” quanto ao público - conhecido mundialmente e podendo ser jogado por todas as idades, cujas regras podem ser aprendidas em pouco tempo, e contando com diversas variações - estimulando design exploratório e adição de novos recursos.

<sup>23</sup> Disponível gratuitamente para download em <http://www.admiralmind.pairg.dimap.ufrn.br>.

### 5.3.1 Visão Geral de jogos de batalha naval clássicos

A origem do jogo batalha naval não é completamente conhecida, mas se tornou popular no período da primeira guerra mundial. As primeiras versões comerciais foram lançadas em 1930 no formato de papel e caneta. Enquanto que a primeira versão baseada em peças plásticas foi lançada por Milton Bradley em 1967 [48]. O jogo retrata uma batalha entre frotas de navios em alto mar, cujo objetivo é afundar os navios do oponente antes que os do próprio jogador sejam afundados. Cada um dos jogadores utiliza um par de quadros cartesianos, um representando o seu próprio território e o outro o território inimigo. As linhas de cada quadro são numeradas, ao passo que as colunas são representadas por letras. Os navios variam de tamanho dependendo do tipo, e o tamanho de cada um é representado por uma certa quantidade de posições sequenciais. Os jogadores primeiramente posicionam seus navios no seu território, e então “atiram” – escolhem uma posição no território inimigo – alternadamente. O oponente anuncia o acerto ou erro do tiro. A Figura 21 exibe um exemplo de batalha naval sendo jogado em “papel e caneta”.

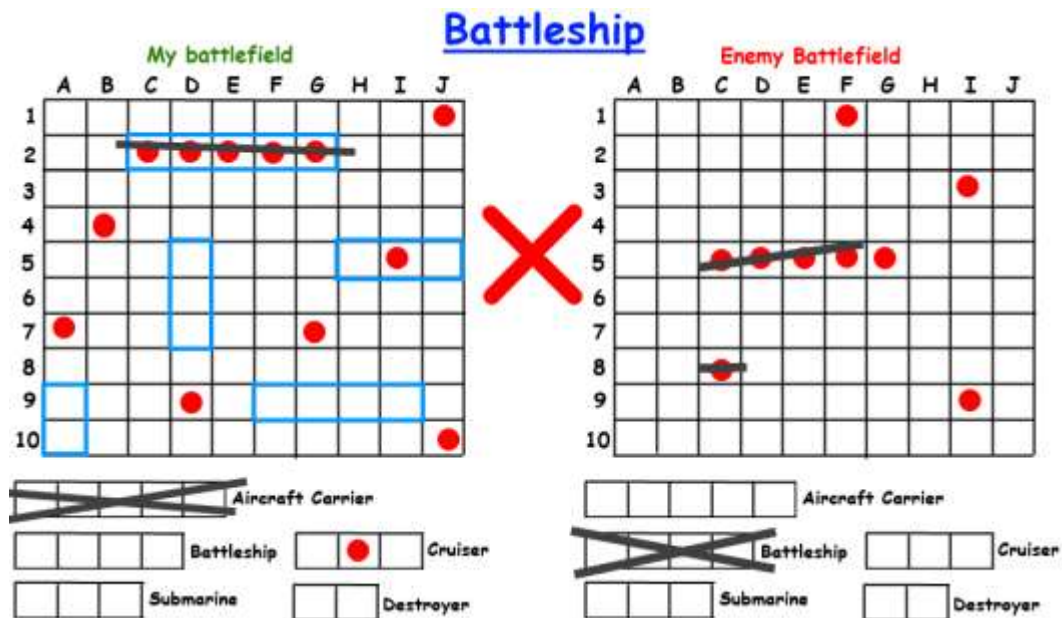


Figura 21. Um jogo em progresso de Batalha Naval em Papel e Caneta.

Na versão clássica do jogo [111] cada jogador possui cinco navios, i.e. porta-aviões (5 quadrados), encouraçado (4 quadrados), submarino e cruzador (ambos 3 quadrados) e destróier (2 quadrados). Os quadros cartesianos são uma grade 10x10 e, quando um navio é completamente afundado, é preciso anunciar qual o tipo do navio afundado. Existem diversas variações do jogo [57]. Por exemplo, em uma das primeiras versões (criada pela empresa Starex e chamada de Salvo) o número de tiros depende do número de navios restantes do jogador, em outras não se anuncia o tipo do navio, quando o mesmo é afundado. Na versão Indiana, cada jogador atira três vezes de cada vez, e é dito apenas quantos tiros foram acertados e quais navios

foram acertados. Na versão “*Ship Attack*”, os jogadores podem usar certos movimentos de reconhecimento. Já na versão Japonesa, cada navio é representado por um único quadrado e o tamanho de cada navio é a quantidade de tiros que o mesmo pode levar antes de afundar. Além disso, nessa versão os navios movem-se em um único campo 5x5, e só é possível atirar em posições cujo jogador tenha um navio próximo (os territórios são “misturados”). Por fim, existem variações em que o jogador pode jogar novamente caso acerte um tiro, e a possibilidade ou não de posicionar navios colocados no campo.

Tendo em conta a história do jogo Batalha Naval, o AdmiralMind Battleship reúne as variações mais interessantes e customizáveis, como o feedback quando um navio afunda, o número de tiros, e o ganho de novo disparo em caso de acerto. Além disso, AdmiralMind Battleship adiciona outras variações únicas como: ilhas no mapa - que reduzem efetivamente o campo; e minas - que atuam como armadilhas para o oponente. Dessa forma o AdmiralMind Battleship incorpora a história de décadas do jogo, e ao mesmo tempo que cria sua própria através dos seus diferenciais.

### 5.3.2 Design da Interface

O design da interface foi orientado pelo *Design Rationale* previamente elaborado [31], que atuou como base para as escolhas de decisões como ritmo suave para o jogo - tendo em vista que é um jogo de estratégia baseado em turnos, e integração multimodal com teclado/mouse - para aumentar a precisão e melhorar a experiência com o jogo.

Como a tela inicial do jogo é uma tela de login, e caso o usuário ainda não tenha uma conta ele pode registrar-se nessa mesma tela. Ao autentica-se o jogador segue para tela principal do jogo, que apresenta os usuários online e permitirá que o jogador desafie outros jogadores para uma partida de batalha naval (Figura 22). Cada jogador possui um avatar no formato de foto (a), e seu posto na hierarquia da marinha, juntamente com seu nickname (b). De forma simétrica, o lado direito da tela exibe os dados do oponente escolhido (c). O avatar aparece na posição (d), com uma interrogação, por enquanto o jogador não escolha um oponente. O jogo (Figura 4) AdmiralMind Battleship oferece diversas opções de customização pelos jogadores que afetam tanto o campo de batalha, quanto a forma de interação do jogo.





















Figura 22. Tela home do AdmiralMind Battleship, dois jogadores encontram-se online disponíveis para uma partida.

Em (c) define-se o número de tiros por turno, e obrigação (ou não) do uso de uma ICC como controle na batalha. O oponente escolhe as opções desejadas no mesmo processo, que então aparecem em (g). A lista de jogadores (h) exibe o nickname (j) dos jogadores online, e as opções de batalha desejadas por cada um (k). Após escolher um oponente o jogador pode desafiá-lo para uma partida clicando no botão “Start Battle!” (f) que fará com que um popup seja apresentado para o oponente, em que deve indicar se aceita (ou não) a partida proposta, e qual configuração de opções será utilizada (a do jogador, ou a do oponente). O Ranking (i) estão os nicknames dos melhores jogadores daquele servidor de AdmiralMind Battleship.

A Tabela 7 apresenta cada opção possível no jogo. Essas opções mostram diversas variações, quanto ao jogo batalha naval clássico, presentes no AdmiralMind Battleship. Como a quantidade de tiros disponíveis por turno, a possibilidade de diminuir o espaço efetivo do campo de batalha através de ilhas - que mantêm o design baseado no campo de 10 linhas e 10 colunas, a exibição de feedback (dia) ou não (noite), ou o uso de minas, que atuam como armadilhas para o oponente: caso o oponente atire em uma posição com mina, então ele recebe um tiro exatamente na mesma posição - mas em seu campo. Ainda também é possível escolher se haverá espaço entre os navios ou não da dada a flexibilidade do AdmiralMind.

Tabela 7. Opções de batalha disponíveis

Opção de batalha	Ícone	Valores
Número de tiros e bônus ao acertar um navio		1 tiro
		1 tiro com bônus
		3 tiros
		3 tiros com bônus
Permitido colocar navios colados um no outro		permitido
		proibido
Existência de ilha no mapa		1 ilha no mapa
		Sem ilhas
Nuvem no campo		nuvem
		sem nuvens
Minas disponíveis		1 mina
		2 minas
		sem minas
Feedback de acerto		dia - feedback disponível
		noite - sem feedback
Interface de entrada que cada jogador usará		os dois jogadores usarão teclado
		os dois jogadores usarão BCI
		um jogador usará teclado, e o oponente usará BCI
		um jogador usará BCI e o oponente usará teclado

Esta primeira etapa serve, para que os jogadores definam as opções de batalhas, e encontrem um oponente disponível para uma partida. Na segunda etapa os jogadores podem indicar uma posição, e rotação, para cada um dos navios constituintes da frota. A Figura 23 mostra esta segunda tela do jogo. Os jogadores possuem 45 segundos para escolherem uma disposição para sua frota de navios, em (a) o tempo já está em 30 segundos. Caso o jogador não termine a tempo, os navios restantes são colocados de forma aleatória no campo de batalha (b). É exibido uma lista (a frota) de navios a serem colocados (c), com a imagem e nome de cada navio. O navio sendo posicionado no momento é destacado na lista (e), e é possível reajustar a posição e a rotação de cada navio - mesmo após colocá-lo no campo de batalha dentro do tempo disponível. Um elemento da frota já disposto é representado pelo contorno de sua imagem (f). Neste caso, o cruzador, foi disposto no campo de batalha (d). O jogador pode ainda “sortear” seus navios através do botão shuffle (g), que oferece uma disposição aleatória da frota. Quando o jogador estiver satisfeito com a disposição, ele pode prosseguir clicando no botão ready (h). Em seguida os jogadores jogam em turnos escolhendo o(s) quadrado(s) cartesianos(s) do campo de seu oponente. Uma partida em si do jogo AdmiralMind Battleship - mostrado na Figura 24.





Figura 23. Os jogadores têm 45 segundos para posicionar seus navios no campo de batalha.



Figura 24. Dois usuários jogando o AdmiralMind battleship online.

Esta etapa do jogo é composta de dois campos de batalha, o do próprio jogador (b), e o do oponente (c). Como referência, as opções de batalha definidas são mostradas no topo da tela (a). O campo de batalha “alvo” é destacado com uma cor mais iluminada (c), enquanto que o campo não ativo utiliza uma cor mais esmaecida (b). Na Figura 24, é a vez do jogador Capt. Leo (b), que deve atirar no campo oponente - o campo alvo (c). O jogador pode ver a disposição do seu próprio campo de batalha, enquanto que a disposição do campo de batalha oponente é oculta. Um acerto é representado por fogo (vermelho), um erro por água (azul), e uma ilha por verde. O avatar de cada jogador é exibido (f)(g), junto com a situação de cada um de seus navios (afundado ou não) (e). Na partida da figura, o porta aviões do oponente Captain Alex foi afundado, como mostra a imagem do porta-aviões preenchida com vermelho (h). Cada jogador possui 30 segundos para realizar sua jogada (i), caso o tempo expire o jogador perde sua vez. Além do tempo do turno, o jogo exibe também o tempo total da partida (i).

O número de mísseis disponíveis no turno atual é exibido (g). Nessa partida cada jogador têm três tiros por turno - conforme a configuração da batalha (a). O número total de tiros já disparados também é apresentado embaixo dos mísseis (g). Outro recurso do jogo é o chat (d), que permite a comunicação constante entre os dois jogadores. O chat desaparece em um efeito de transparência progressiva, para não atrapalhar a partida com obstruções permanentes.

### 5.3.3 Design de medalhas

O AdmiralMind Battleship possui um sistema de ranking, onde o jogador vai subindo de posto a medida que vai ganhando partidas. Começando como sargento (sergeant), e avançando até o último posto: o posto de Almirante (*admiral*). Cada jogador possui dois postos de ranking, um considerando partidas com o uso do controle convencional - teclado e mouse, e outro onde apenas as batalhas feitas usando o controle de ICC são contadas. Os postos de ICC são comumente pós-fixados com a palavra mente (*Mind*), mas a palavra pode mesclar-se de outras formas. Assim o jogador começa no posto de ICC de *FirstSergeantMind*, e busca atingir o último posto da hierarquia: o posto de *AdmiralMind*. O nome do jogo vêm desse sistema de ranking, onde o mais poderoso e influente na batalha naval é o experiente almirante capaz de controlar e comandar a frota com o poder da mente: o *AdmiralMind*. A pontuação do jogo é baseada em três fatores: o total de tiros disparado pelo jogador, sua precisão, e o tempo total usado (contando apenas seus turnos) para vencer o oponente. A fórmula da pontuação é dada pela Equação 1. O tempo de jogo é dado em segundos, e a precisão em porcentagem.

Equação 1. Fórmula da pontuação.

$$\frac{1}{\text{total de tiros}} \times 23410 \oplus \text{precisao} \times 11 \oplus \text{máximo} (1800 - \text{tempo de jogo}, 0)$$

Segundo uma análise matemática [25], um jogador razoável precisa de uma média de 64 tiros para ganhar uma partida, enquanto que um jogador experiente consegue fechar cada partida com uma média de 42 tiros. Ainda, consideramos o tempo médio de um jogador razoável de 15 minutos totais, e 6 minutos para um jogador experiente, bem como 46% de precisão média de um jogador razoável vs. 68% de um jogador experiente. Aplicando isso na fórmula podemos observar que um jogador experiente ganha aproximadamente 2745 pontos por vitória vs. 1772 pontos de um jogador razoável. Utilizamos a pontuação de um jogador razoável como unidade de vitória - cada 1772 pontos são considerados uma vitória. Inicialmente, o pré-requisito de pontuação para subir de posto é de 2 vitórias. Cada posto acima, então, possui um acúmulo de mais duas vitórias, seguindo assim uma progressão aritmética. A Tabela 8 apresenta a pontuação, e o tempo mínimo, para que o jogador possa subir para o posto.

Os postos de hierarquia foram inspirados pela marinha Brasileira, tanto no nome quanto no brasão. Eles são apresentados, do menor posto ao maior, na Tabela 8. Para subir de posto é preciso que o jogador avance em três frentes: i) pontos acumulados no jogo segundo a equação 1, ii) tempo real desde que começou a utilizar o AdmiralMind e, iii) habilidade medida pelo jogo. A medição da habilidade é feita através do sistema ELO [29], proposto inicialmente para o uso em campeonatos de xadrez, mas adaptado atualmente para qualquer jogo competitivo. Neste sistema, o jogador deve vencer oponentes à altura de sua habilidade para subir na análise. É um sistema auto corrigível, sempre reavaliando e ajustando a habilidade de cada um dos jogadores. Existe uma dualidade no ranking, em que o jogador possui uma pontuação, e posto, para cada modalidade - uma para convencional e uma com ICC.

**Tabela 8. Postos da hierarquia do AdmiralMind Battleship.**

<b>Posto</b>	<b>Pontuação</b>	<b>Período</b>
Seaman	0	0
First Sergeant	3544	1 dia
Sub-officer	10632	3 dias
Midshipman	17720	1 sem.
Second Lieutenant	24808	1/2 mês
First Lieutenant	31896	3 sem.
Captain Lieutenant	38984	1 mês
Corvette Captain	46072	2 meses
Frigate Captain	53160	4 meses
Captain of Sea and War	60248	1/2 ano
Vice Admiral	67336	1 ano
Admiral	74424	2 anos
SeaMindman	0	0
FirstSergeantMind	3544	1 dia
Sub-officerMind	10632	3 dias
shipmanMind	17720	1 sem.
SecondLieutenantMind	24808	1/2 mês
FirstLieutenantMind	31896	3 sem.
Captain LieutenantMind	38984	1 mês
CorvetteCaptainMind	46072	2 meses
FrigateCaptainMind	53160	4 meses
Captain of Sea and WarMind	60248	1/2 ano
ViceAdmiralMind	67336	1 ano
AdmiralMind	74424	2 anos

## 5.4 Implementação

O jogo foi implementado em C++ utilizando a versão 2 da biblioteca Super Fast Media Library<sup>24</sup> (SFML 2), uma biblioteca multiplataforma. A Figura 25 apresenta a arquitetura utilizada pelo jogo AdmiralMind Battleship. O código servidor<sup>25</sup> executa em uma máquina Linux, enquanto que o código cliente<sup>26</sup> é compatível com Windows, Linux e iOS. O servidor pode ser configurado, e monitorado, também com um programa de gerenciamento - que pode estar tanto na mesma máquina que o servidor, quanto em outra máquina remota.

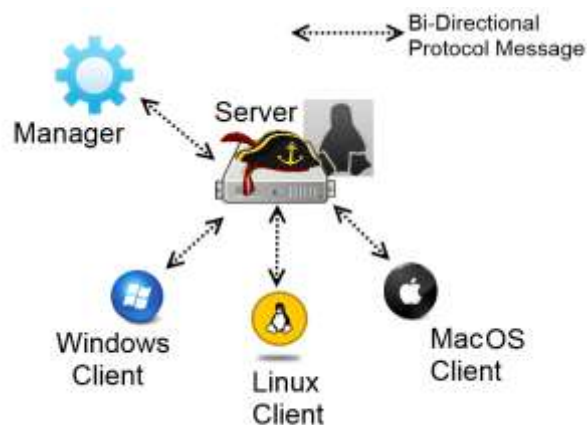


Figura 25. Arquitetura do AdmiralMind Battleship.

AdmiralMind foi planejado para ser jogado online, para que o maior número de usuários testassem o jogo. Assim, foi necessário desenvolver um servidor para o jogo<sup>27</sup>, bem como um protocolo simples. Os jogadores precisam-se conectar em um servidor responsável por rotear os pacotes entre os jogadores. Os clientes, o gerenciador, e o servidor utilizam o mesmo protocolo de rede, construído na camada de aplicação sobre os protocolos TCP/IP (As mensagens apresentadas na figura 7). O cabeçalho de cada pacote é composto com 1 byte representando o tipo da mensagem (como “login”, “tiro”...) e 4 bytes representando o ID do jogador destino (-1 indica que é destinado ao servidor no caso da comunicação jogador para servidor, e para todos os jogadores no caso servidor para jogador). O restante forma o campo de dados (que varia dependendo do tipo da mensagem).

<sup>24</sup> <http://www.sfml-dev.org>.

<sup>25</sup> <http://www.admiralmind.pairg.dimap.ufrn.br/serversourcecode/>.

<sup>26</sup> <http://www.admiralmind.pairg.dimap.ufrn.br/gamesourcecode/>.

<sup>27</sup> [server.admiralmind.pairg.dimap.ufrn.br](http://server.admiralmind.pairg.dimap.ufrn.br).

Como exemplo de código na aplicação servidora do AdmiralMind Battleship, o código da função responsável por enviar a lista jogadores é mostrado na Figura 26.

```
void sendPlayerlist () {
    Packet packet;
    packet << -1 //to all players
    << static_cast<int> (packetID::Playerlist) //msg type

    //payload:
    << static_cast<int> (playerlist.size());
    for (auto& pinfo : playerlist) {
        packet << pinfo.id << pinfo.name
        << static_cast<int> (pinfo.status);
        packet << static_cast<int> (pinfo.battleOpts.size());
        for (auto& element : pinfo.battleOpts)
            packet << element.first << element.second;
    }

    for (auto& player : players) {
        player->send(packet);
    }
    cout << "Sended player list!\n";
}
```

Figura 26. Trecho do código da aplicação servidora.

Existem 16 tipos de mensagem no protocolo do jogo, conforme mostra a Tabela 9. A troca de pacotes sempre tem o servidor como destino, seja ele o destino final (em pacotes com destino de -1) ou o destino intermediário (em pacotes destinados a outros jogadores). A Figura 27 apresenta o fluxo de pacotes em alguns cenários.

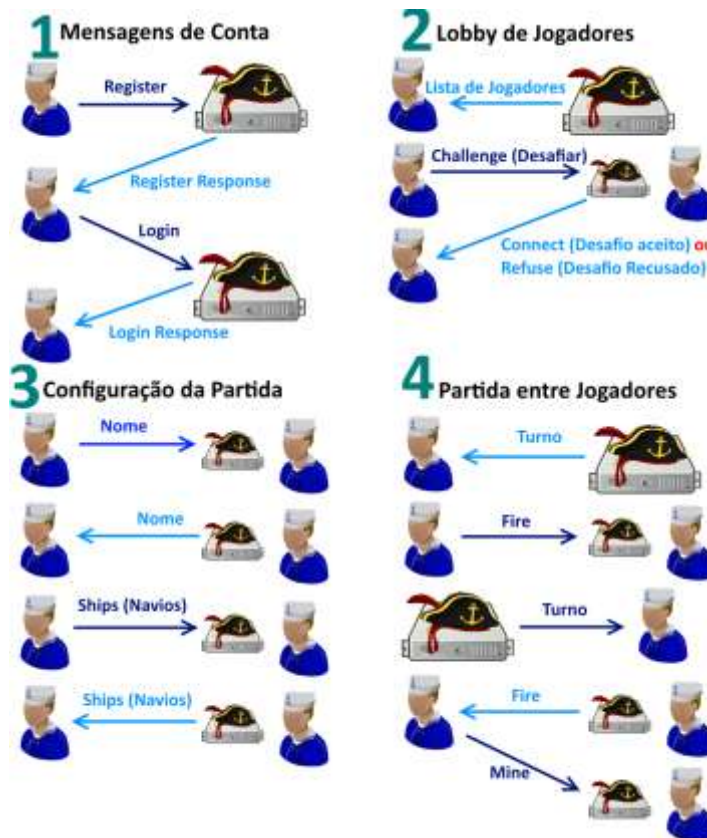


Figura 27. Fluxo de pacotes em alguns cenários.

Tabela 9. Os 16 tipos de mensagem do jogo.

<b>Tipo + Dados</b>	<b>Propósito</b>
Login [Usuário   Senha]	Logar-se no jogo
LoginResponse [Aceito ou Recusado]	Resposta do servidor a um pedido de login
Register [Nome   Usuário   Email   Senha]	Requisitar cadastro de novo usuário
RegisterResponse [Aceito ou Recusado]	Resposta do servidor a um pedido de registro
Options [Options...]	Envia as opções desejadas para o campo de batalha
PlayerList [PlayerInfo...]	Enviado aos jogadores, indicando o status de cada jogador (disponível para uma partida, jogando, ...)
Name [Nickname]	Envia o pseudonome a ser apresentado em batalha
Challenge [ ---- ]	Desafia o jogador indicado no campo destino do cabeçalho para uma partida.
Connect [ ---- ]	Aceita um desafio de partida. Conecta-se ao jogador indicado no campo destino do cabeçalho
Refuse [ ---- ]	Recusa um desafio de partida.
Ships [Ships...]	Envia um vetor de 'navios' indicando as posições/orientações da frota de navios
Turn [ ---- ]	Usado para sincronização dos relógios, indica passagem da vez
Fire [Linha, Coluna]	Envia um disparo na posição (Linha, Coluna)
Mine [Linha, Coluna]	Avisa ao oponente que a mina na posição (Linha, Coluna) foi ativada
Chat [Mensagem]	Envia uma mensagem de texto ao jogador indicado no campo destino do cabeçalho
GameEnd [ ---- ]	Indica ao jogador que a partida acabou, usado quando um dos jogadores sai da partida prematuramente
Disconnect [ ---- ]	Desconecta-se do servidor
KeepAlive [ ---- ]	O cliente envia a cada 6 segundos para que o servidor mantenha a conexão ativa

A implementação do jogo foi dividida em quatro módulos: i) uma GameEngine simples desenvolvida especificamente para o AdmiralMind, contendo, principalmente, a classe GameNetwork responsável por enviar e receber mensagens seguindo o protocolo de rede definido, e a classe StateStack - uma pilha de telas do jogo (estados de tela). ii) Uma pequena GUI simples, com uma implementação simples de elementos GUI clássicos - como botões e caixas de entrada de texto. iii) A implementação das screenStates, as telas do jogo. Cada uma dessas telas de jogo (tela de login, de registro, do lobby do servidor - home, da preparação da batalha, da batalha, e de Game Over) são implementadas como uma screenState, e iv) O core do jogo, um módulo implícito com as classes principais do jogo. A Figura 29 apresenta um diagrama de classes do jogo.

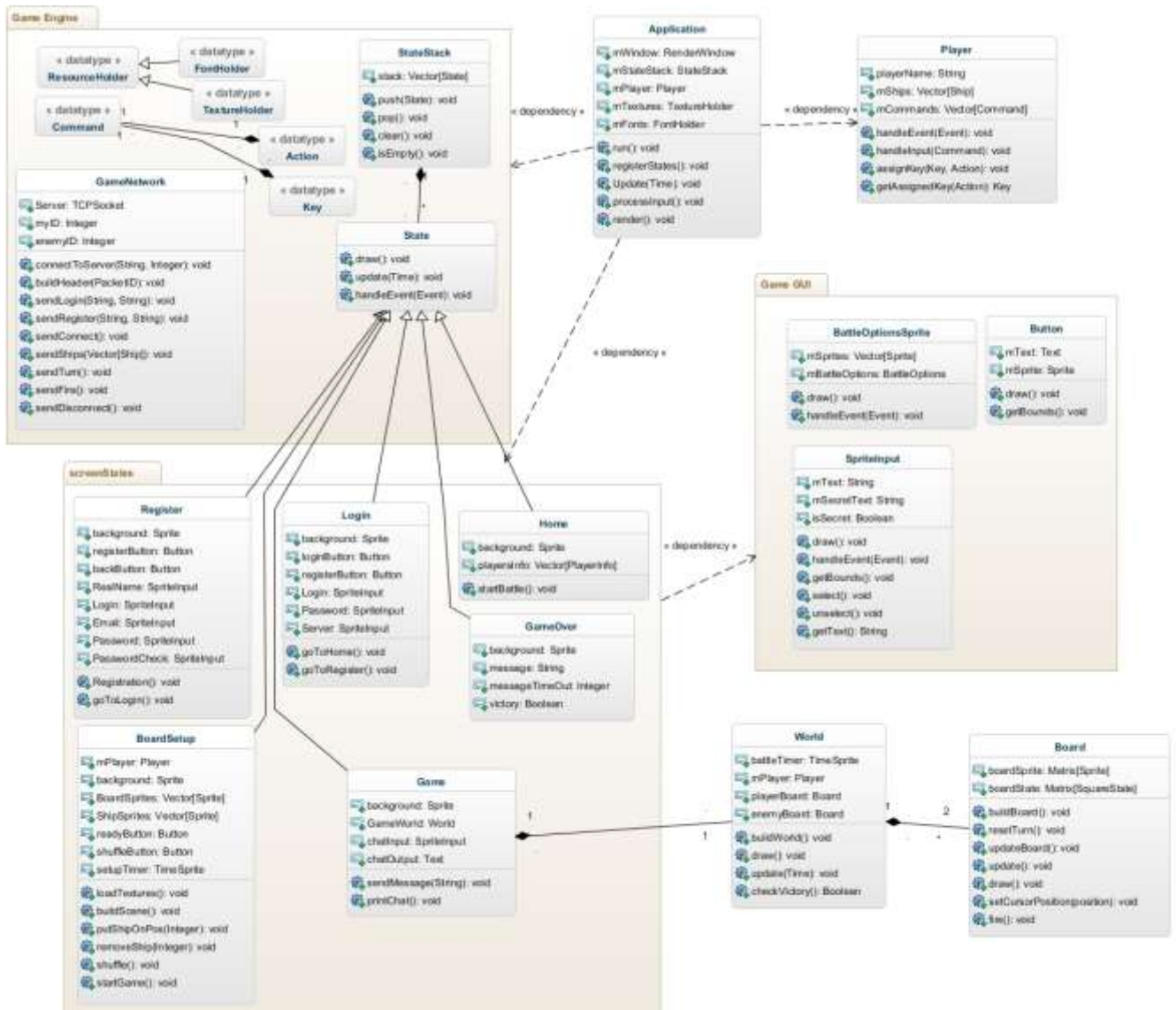


Figura 28. Diagrama de classes do jogo AdmiralMind Battleship.

## 5.5 Decisões quanto a ICC

O jogo foi planejado e desenvolvido como um estudo do uso de ICCs em jogos sem a inserção de elementos artificiais/forçados. Isso é difícil em ICCs baseadas em resposta a estímulo visual, pois para a mesma é necessário “pisar” elementos na tela continuamente. Por isso, optou-se pela abordagem baseada em movimento imaginado, onde a interface gráfica do jogo não é restringida pelas limitações da ICC. No caso de ICCs baseadas em movimento imaginado, o que é restrito é o número de comandos possíveis. Tendo em vista que cada movimento imaginado adicional torna mais difícil a identificação/classificação dos mesmos, bem como aumenta a carga cognitiva e o treinamento necessário - com um número maior de comandos o usuário precisa de um treinamento mais extenso para atingir o controle mental necessário.

Nossas decisões de ICC foram baseadas no Design Rationale previamente construído [31], onde foi estudado cada uma das modalidades de BCI usadas em jogos (concentração, neurofeedback, resposta a estímulo visual e movimento imaginado), assim como as vantagens e desvantagens de cada uma.

Tendo a abordagem a ser adotada, o passo seguinte foi a escolha do headset. Diversos headsets de baixo custo foram avaliados, em busca daquele que fosse mais acessível - mas com poder suficiente para ser usado em um jogo de Batalha Naval. O Neurosky MindWave<sup>28</sup> é um headset de baixo custo, apenas um único eletrodo montado em um par de fones de ouvido. O MindWave faz leitura das ondas Alpha e Beta e utiliza-as para medição da concentração do usuário. O baixo custo e a simplicidade são fortes fatores do headset, mas seu escopo limitado de detecção é um desafio para usos complexos. Já o OpenBCI<sup>29</sup> e o OpenEEG<sup>30</sup> são soluções de hardware aberta, oferecendo instruções de como montar seu próprio headset ICC (O OpenBCI é baseado em Arduino<sup>31</sup>). Eles também vendem – sob encomenda – um headset já montado, sendo uma solução flexível e poderosa. Porém, o headset é voltado para aqueles que já possuem certa experiência com eletrônica, sendo necessário que o usuário trabalhe no headset para que o mesmo supra suas necessidades. A precisão destes dispositivos é boa, porém apenas usuários com conhecimento no domínio podem utilizá-lo, é necessário inclusive arranjar os eletrodos e – caso desejado – é preciso que o próprio usuário expanda o amplificador para um headset. Assim estes headsets tem como grande desafio a necessidade de alto conhecimento de domínio. Por outro lado, o Emotiv EPOC<sup>32</sup> é um headset comercial voltado para Gamers, possui 14 eletrodos

---

<sup>28</sup><http://neurosky.com/products-markets/eeg-biosensors/hardware/>

<sup>29</sup> <http://www.openbci.com/technology-update/>

<sup>30</sup> <http://openeeg.sourceforge.net/doc/>

<sup>31</sup> <http://www.arduino.cc/>.

<sup>32</sup> <http://www.emotiv.com>.



e um giroscópio embutido. A Emotiv separa as capacidades do EPOC em três módulos (quatro contando com a detecção do giroscópio), dependendo do tipo de detecção desejada: Expressiv - para detecção de expressões faciais por EMG, Affectiv - para “sentimentos” (na realidade baseado em estados de concentração), e Cognitiv - para “pensamentos e intenções” (na realidade Movimento Imaginado). O EPOC apresenta uma precisão razoável, mas inferior a dispositivos de captura EEG profissionais. O módulo Cognitiv é o maior desafio pois exige um alto tempo de treinamento, além de ser o módulo com a menor precisão. O EPOC também requer maior conhecimento de domínio, pois é preciso verificar se os eletrodos estão bem posicionados.. É uma plataforma fechada, usada diretamente pelo usuário. Escolhemos este *headset* por ser, dentro dos avaliados, o mais acessível ao usuário, mas que ao mesmo tempo possui suporte a várias abordagens de detecção.

O jogo foi desenvolvido com suporte ao EPOC, cuja primeira versão foi lançada no fim de 2009 pela empresa Emotiv. O EPOC possui 14 eletrodos, assim como um giroscópio embutido. A Emotiv separa as capacidades do EPOC em três módulos (quatro contando com a detecção do giroscópio), dependendo do tipo de detecção desejada: Expressiv - para detecção de expressões faciais por Eletromiografia (baseado na medição da atividade elétrica do músculo, e não do cérebro), Affectiv - para “sentimentos” (na realidade baseado na medição da concentração, estresse e relaxamento), e Cognitiv - para “pensamentos e intenções” (na realidade Movimento Imaginado). O EPOC apresenta uma precisão razoável, mas inferior a dispositivos de captura EEG profissionais. O módulo Cognitiv é o que oferece o maior desafio de uso pois exige um alto tempo de treinamento, além de ser o módulo com a menor precisão.

O EPOC vêm com diversas aplicações, uma delas é o painel de controle que auxilia o usuário em diversas tarefas, como o treinamento cognitivo (movimento imaginado). Uma das funções principais é o auxílio em colocar os sensores na posição correta. A Figura 29 apresenta esta tela, onde os posicionamentos seguem o padrão 10/20<sup>33</sup> de dispositivos de EEG. O EPOC é programado através da biblioteca EmoEngine. A API da biblioteca está dividida em duas categorias, uma para consultar medições, leituras, e eventos do headset, e outra para controlar o dispositivo, como ligar ou desligar o mesmo, ou mudar a forma que uma detecção está sendo feita. Uma estrutura de dados especial, e atualizada em tempo real, armazena o estado atual das diversas leituras feitas pelo headset, guardando também os últimos eventos detectados. Esta estrutura é chamada de EmoState, e é alvo da parte de consultas da API. Os eventos do EPOC (chamados de EmoStates) são disparados baseados nessa estrutura. Assim a API é a interface entre o programador e a biblioteca, enquanto que a estrutura EmoState é a interface entre a captura de bio-sinais e a EmoEngine.

---

<sup>33</sup> O sistema 10-20 define e padroniza as possíveis posições dos eletrodos para captura de sinais via EEG [Erro! Fonte de referência não encontrada.].

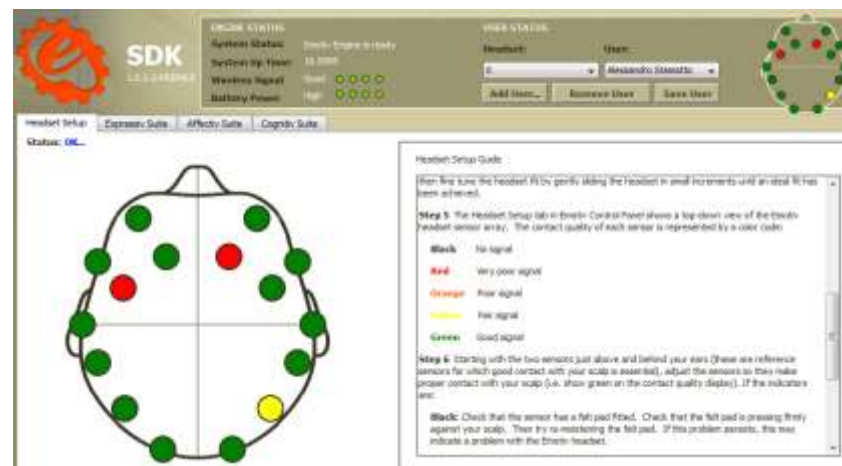


Figura 29. Posicionamento dos sensores EPOC seguindo o padrão 10/20.

No jogo, a ICC é utilizada no campo de batalha, controlando os tiros através de três comandos: a imaginação de movimento do braço/mão esquerda move o cursor para baixo, a imaginação de movimento do braço/mão direita move o cursor para direita e a imaginação de movimento dos pés atira na posição selecionada. O jogo utiliza uma mecânica de wrap-around: mover o cursor para baixo além do tamanho do campo (na última linha) leva o cursor para a primeira linha, e mover o cursor para direita na última coluna leva o cursor para a primeira linha - isso reduz o número de comandos necessários para controlar o movimento do cursor de 4 (baixo, cima, direita, esquerda) para 2 (baixo e direita) facilitando o treinamento e aumentando a precisão da ICC.

No desenvolvimento do jogo, optamos por utilizar a ICC apenas no campo de batalha. Essa decisão foi tomada levando em consideração dois fatores: i) Em testes iniciais, configurar e encontrar uma partida com a ICC é um processo lento e frustrante, considerando a velocidade e precisão do headset e; ii) Focar o uso da ICC no campo da batalha simplifica a interação do jogo, levando os usuários a entrarem no jogo em si – uma partida de batalha naval – mais diretamente.

Uma outra decisão de ICC foi a escolha da abordagem de detecção, analisamos as quatro formas apresentadas no design rationale [31]: Uma ICC baseada em *concentração* não seria adequada pois o AdmiralMind Battleship usa a ICC como controle da posição onde o disparo deve ser feito - e a forma de concentração exigiria que o usuário alternasse muito rapidamente entre relaxado e concentrado, ou calmo e estressado. O que seria uma interação estranha. Outra abordagem, baseada em *neurofeedback*, captura o estado mental a um nível muito alto - como o nível de concorrência das tarefas sendo executadas. Assim não permite uma captura que possa ser associada a comandos específicos (como mover o cursor para direita).

Já uma abordagem baseada na *resposta a estímulo visual (SSVEP ou P300)* é viável para o jogo AdmiralMind Battleship: em cada turno os quadrados do campo piscariam, e aquele focado pelo usuário seria o escolhido. A desvantagem seria deixar a interface gráfica fortemente dependente da ICC, com o campo piscando freneticamente durante quase toda a partida. Esta carga visual pode ser cansativa e irritante para o usuário, especialmente em partidas mais longas. Por último,

consideramos a abordagem baseada em *movimento imaginado*. Esta requer um longo período de treinamento, podendo levar vários dias para que o usuário consiga atingir um controle de pensamentos que sejam precisamente mapeados aos controles do jogo. Essa abordagem oferece três grandes vantagens: i) associações a comandos específicos de forma mais direta (imaginar o movimento do braço direito move o cursor para direita); ii) não requer alteração ao design do jogo, dispensando elementos forçados na interface gráfica do jogo. iii) É mais acessível, pois pode ser usada por usuários sensíveis a mudanças visuais drásticas (como as que ocorrem na abordagem SSVEP).

### 5.5.1 Testes preliminares com usuários.

O jogo foi testado com um usuário com 1 mês de treino, usando o headset Emotiv EPOC. Estes testes foram feitos entre um jogador usando a ICC (o usuário treinado) contra usuários usando controle convencional, mouse e teclado. A Figura 30a exibe este usuário usando a ICC no jogo, já a Figura 30b mostra o headset vestido no usuário (em perfil).

Durante as partidas notou-se que a ICC atuou como desvantagem versus controle convencional, um resultado esperado tendo em vista que ICCs ainda não possuem uma precisão ideal. Por outro lado, o uso da ICC adicionou entretenimento como um controle desafiador, oferecendo a sensação do controle de uma batalha naval através da mente. Uma das dificuldades foi conseguir fazer a jogada desejada antes do término do tempo, que levou a frustração de perder o turno diversas vezes. Isso indica que um redesign é necessário, aumentando o tempo no caso do uso de ICCs.

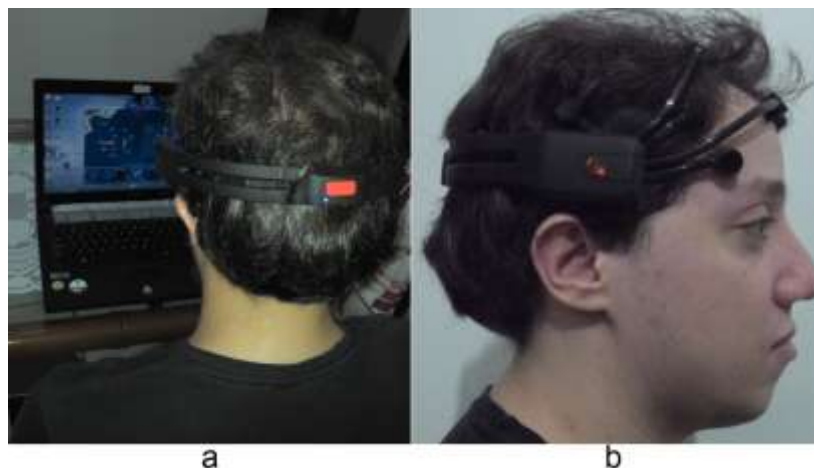


Figura 30. A ICC em uso controlando o jogo AdmiralMind Battleship (a), e uma imagem em perfil do usuário usando o headset (b).

Outro desafio é o tempo necessário para exercer controle satisfatório em uma partida de AdmiralMind Battleship, podendo levar várias semanas no caso de sessões de treino de 30

minutos por dia (para melhor aproveitamento do treinamento as sessões devem ser ao redor de 30 minutos, onde o usuário está mais concentrado e descansado). O que é fatigante, e pode ser desanimador já que tanto tempo é necessário antes que o usuário possa jogar o jogo em si. A criação de uma aplicação de treinamento para o jogo AdmiralMind Battleship ajudaria na motivação do treinamento, e poderia trazer mais entretenimento ao jogador.

## 5.6 Lições aprendidas

Observamos que usar a ICC no jogo inteiro, incluindo configurações e menus, não é - atualmente - prático e desvia o usuário da parte principal da aplicação: a batalha em si. Assim, a aplicação de ICCs em jogos deve focar seu uso na jogabilidade em si, para que o usuário não fique preso navegando nas interfaces de menu e configuração.

Outro ponto é oferecer uma interface multimodal, que permita ao usuário jogar por meios convencionais - especialmente se o jogo possuir o recurso de partidas online com outro jogadores. Isto flexibiliza e democratiza o acesso ao jogo de acordo com as necessidades do usuário. Apesar disto, para estimular o uso de ICC é importante oferecer - por exemplo - um ranking diferente para estes usuários. É preciso levar em consideração a menor precisão de ICCs, quando comparadas a meios de interação convencionais, e adicionar pequenas ajudas (como um tempo de turno maior) para compensar esta limitação, e nivelar os dois meios de interação.

Novas formas de interação podem permitir maior imersão em jogos, e é interessante que jogos ofereçam suporte a novas formas de interação, como interação via cérebro (ICC) ou gestos. Nesse aspecto, o jogo AdmiralMind possui uma arquitetura modular para que novas formas de interação possam controlar o mesmo jogo controlado de forma convencional. Apesar disso, é difícil adaptar um jogo para novas formas de interação quando este requer mudanças na interface gráfica. Idealmente, a entrada de um jogo (controles) não deve depender da saída do mesmo (como elementos da interface gráfica). Um exemplo que vai contra esse princípio são ICCs baseadas na resposta de um estímulo visual no jogo - como setas piscantes que o jogador deve concentrar-se para 'ativar' um comando.

## 5.7 Discussão

Devido a imaturidade da área no contexto de aplicações para o usuário final, ainda existem poucos jogos baseados em ICC. Muitos dos jogos existentes não atendem a todos os requerimentos que definem uma aplicação interativa como jogo - van Veen [126] defende como critério principal a presença do paradoxo do controle, em que o jogador deve sentir no controle,

mas ao mesmo tempo a possibilidade de falha deve existir para estimular desafios no jogo. Usando um jogo clássico, como o da batalha naval, é possível estudar a viabilidade de ICCs em um cenário já consagrado, com seu uso como jogo já comprovado.

Os testes foram limitados a um único usuário pois a detecção baseada em movimento imaginado requer treinamento significativo para que a ICC consiga atuar como um controle efetivo. O estudo foi conduzido dessa maneira, para que a viabilidade de ICCs em jogos convencionais fosse avaliada no caso ótimo: moldada a um usuário específico, em um jogo que não exija controles complexos. Nisso obteve-se sucesso no controle, mas ainda com certas dificuldades. Optamos também pela implementação de um jogo de nossa autoria de forma a garantir o melhor acoplamento com a biblioteca de desenvolvimento ofertada pela Emotiv. A utilização de um jogo já existente também minaria o processo de design do jogo, pois o design estaria pronto e nossos esforços seriam modificações ad-hoc. O design e desenvolvimento de um jogo próprio foi mais interessante para o processo exploratório, o que alinhou-se com nossos objetivos - i.e: o design e implementação do primeiro jogo de batalha naval com interação cérebro-computador.

Mesmo em um jogo baseado em turnos, como acontece em batalha naval, encontram-se desafios no uso de ICC. A baixa precisão, e lentidão da interação, podem trazer uma desvantagem muito grande ao jogador. Sendo necessário repensar o design quanto ao uso de ICCs, com favorecimentos ao usuário da ICC (como um aumento no tempo disponível por turno, para que o mesmo tenha uma boa experiência ao usar a ICC. Outro possível redesign seria uma aplicação semelhante a um jogo, onde o usuário treinaria para o jogo AdmiralMind Battleship de forma mais temática, uma “academia de controle de batalha naval através da mente” - remanescente do “treinamento jedi” onde o personagem principal (Luke) recebe orientação do mestre (Yoda) em diversas sessões de treinamento do uso da força para levitação de objetos pesados. O AdmiralMind atua como um jogo de Batalha naval multi-interface, e com suporte a diversas variações do jogo clássico - sendo um dos mais completos no quesito de opções.

## 5.8 Conclusão

Este trabalho apresentou o jogo AdmiralMind Battleship, um jogo onde a batalha pode ser controlada pelo *headset* EPOC através do movimento imaginado das mãos/braços direito e esquerdo, e dos pés. Foi necessário também desenvolver um servidor para o jogo, bem como um protocolo simples, e o mesmo conta com um servidor oficial (hospedado atualmente na UFRN).

Como trabalho futuro iremos aprimorar a ICC do jogo, e avaliar o suporte a outros *headsets* além do EPOC. Planejamos, ainda, realizar uma análise comparativa entre o AdmiralMind Battleship e outros jogos de ICC, de forma a definir métodos de avaliação e experimento em jogos dessa modalidade.

## 5.9 Tomada de Decisão

Tendo nós atingido o objetivo final dessa pesquisa - O estudo, design, e desenvolvimento de um jogo baseado em Interface Cérebro-Computador. Atestamos pela completude da nossa pesquisa.

O jogo AdmiralMind Battleship foi construído com sucesso, e serve como uma prova de conceito de um jogo baseado em ICC. O controle por ICC ainda é um protótipo, sendo necessário aprimorar a mesma. O processo envolveu diversas pesquisas, cada uma contribuindo para a comunidade, e levou ao êxito final da pesquisa principal. Sendo assim, finalizamos a pesquisa com considerações finais acerca de todo trabalho.

# Capítulo 6

## Considerações Finais

Cada capítulo desta dissertação apresenta um importante passo realizado para alcançarmos o objetivo principal desta pesquisa. Neste último capítulo, descrevemos uma síntese do que foi realizado, destacando sua importância e resultados.

### 6.1 Trabalho Realizado

Primeiramente, levantamos o estado da arte quanto a o uso de ICCs em aplicações voltadas ao usuário final. Com base nesse levantamento analisamos os desafios inerentes a essa “nova” forma de interação humano-computador. Observamos a importância em descobrir os interesses do público quanto a ICCs, assim como os responsáveis pelo avanço e implantação de ICCs. Nesse aspecto, comprovamos a viabilidade de se adotar o referencial teórico-metodológico da Semiótica Organizacional também no contexto de ICC que permitiu nos levar a reflexões acerca dos diversos *stakeholders* e oportunidades de ICC sob diferentes pontos de vista.

Decidimos então avaliar a viabilidade de ICCs no âmbito de jogos. Decorrente dessa decisão, analisamos trabalhos da literatura de jogos baseados em ICC. Através disso desenvolvemos um design rationale, que oferece uma documentação, e reflexão, acerca do processo de *design* de jogos baseados nessa modalidade de interação. Por fim, concebemos o design e implementamos (em C++) um jogo – AdmiralMind Battleship – de batalha naval baseado em ICC. Este jogo demonstrou a viabilidade, e o potencial, do uso de ICCs com esse tipo de sistema interativo.

## 6.2 Contribuições

- **Capítulo 2:** Um dos papéis do Capítulo 2 foi um embasamento teórico da área de ICCs, com métodos e termos apresentados. Também foi realizado um levantamento do estado da arte, assim como a identificação dos desafios enfrentados por essas aplicações. Este Capítulo identificou sistemas interativos de ICC desenvolvidos, permitindo delimitar o que seria viável com a tecnologia atual. Ao mesmo tempo, foram traçados desafios a serem pensados no design da ICC planejada para nossa pesquisa.

### Publicações:

FERREIRA, A.L.S.; MIRANDA, L.C.; MIRANDA, E.E.C. Interfaces Cérebro-Computador de Sistemas Interativos: Estado da Arte e Desafios de IHC. Anais do XI Simpósio Brasileiro sobre Fatores Humanos em Sistemas Computacionais (IHC'12), SBC, 2012, pp. 239–248.

FERREIRA, A.L.S.; MIRANDA, L.C., MIRANDA, E.E.C., SAKAMOTO, S.G. A Survey of Interactive Systems based on Brain-Computer Interfaces. SBC Journal on 3Interactive Systems, vol. 4, no. 1, SBC, 2013, pp. 3–13.

- **Capítulo 3:** Neste capítulo foi feita uma análise dos envolvidos com base na semiótica organizacional (SO). Os artefatos da SO (partes interessadas, escada semiótica, e quadro de avaliação) permitiram a identificação dos stakeholders na área de ICCs - incluindo envolvidos em várias esferas da sociedade, como universidades que trabalham com a tecnologia, e empresas investidoras.
- **Capítulos 4:** No Capítulo 4 categorizamos os jogos baseados em ICC da literatura, descobrindo como ICCs são usadas nos jogos atualmente. Com isso foi possível a concepção de um Design Rationale genérico, capaz de auxiliar no design de jogos baseados em ICC. Apoiado pelo Design Rationale, apresentamos a proposta de um jogo baseado em ICC de Batalha Naval.

### Publicações:

FERREIRA, A.L.S.; MARCIANO, J.N.; MIRANDA, L.C.; MIRANDA, E.E.C. Understanding and Proposing a Design Rationale of Digital Games based on Brain-Computer Interface: Results of the AdmiralMind Battleship Study. SBC Journal on Interactive Systems, v. 5, p. 3-15, 2014.

- **Capítulos 5:** Neste Capítulo descrevemos o design e implementação do nosso jogo de batalha naval, AdmiralMind Battleship, com controle ICC. Através dele é possível avaliar empiricamente as implicações de um sistema interativo baseado em ICC. O jogo é de código aberto, e encontra-se disponível gratuitamente. Podendo atuar como uma plataforma de testes de ICC.



## 6.3 Perspectivas e Trabalhos Futuros

O processo, resultados, e contribuições deste trabalho aprofundam-se no tema do uso de ICCs em jogos. Cada uma das pesquisas constituintes desse trabalho levantam novas questões a serem respondidas, e novos caminhos a serem trilhados. Essas questões são dignas de serem estudadas a fundo, levando a novas pesquisas no tema.

Como trabalho futuro, vamos dar continuidade ao desenvolvimento do jogo AdmiralMind Battleship - contando inclusive com um redesign levando em consideração os problemas encontrados na aplicação atual. Também planejamos realizar uma comparação do EPOC Emotiv com outros *headsets* de ICC. Desejamos também, realizar e analisar um experimento com diversos usuários, onde cada um deles deverá participar de inúmeras sessões de treinamento para que possa jogar o jogo com sucesso. Indicamos um estudo comparativo do jogo AdmiralMind Battleship com outros jogos de ICC, bem como a criação de novas técnicas e métodos de análise, design, e implantação do uso de ICCs em jogos.

São necessários novos testes e experimentos para avaliação de sistemas interativos baseados em ICC, o jogo AdmiralMind Battleship serve como uma plataforma de experimentação onde formas de ICC podem ser aplicadas e estudadas. O jogo desenvolvido focou na detecção baseada em movimento imaginado, sendo interessante expandir o jogo para suportar outras formas de detecção como via de comparação de técnicas de ICC.

Também acreditamos que ICCs possuem potencial em outros aspectos de jogos, como em um cenário multiplayer em que dois jogadores jogam juntos em um mesmo local, e existe a preocupação com o oponente trapacear e olhar para a sua tela - obtendo informação privilegiada. Nesse cenário ICCs poderiam ser usadas para detectar o foco visual do jogador em outra tela que não seja a dele mesmo. Sendo assim, pesquisas de ICCs na área de jogos são bastante diversas e várias aplicações podem ser estudadas nessa esfera.

# Referências Bibliográficas

1. H.S. Al-Zubi, N.S. Al-Zubi, and W. Al-Nuaimy, "Toward inexpensive and practical brain computer interface," in *Proceedings of the Developments in E-systems Engineering (DeSE'11)*, IEEE, 2011, pp. 98–101, doi: 10.1109/DeSE.2011.116.
2. C. Angeloni, D. Salter, V. Corbit, T. Lorence, Y.-C. Yu, and L.A. Gabel, "P300-based brain-computer interface memory game to improve motivation and performance," in *Proceedings of the 38<sup>th</sup> Annual Northeast Bioengineering Conference (NEBEC'12)*, IEEE, 2012, pp. 35–36, doi: 10.1109/NEBC.2012.6206949.
3. Barbosa, A.O., Achanccaray, D.R., Meggiolaro, M.A.: Activation of a Mobile Robot through a Brain Computer Interface. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, p. 4815-4821 (2010)
4. B. Badia, A. García Morgade, H. Samaha, and P.F.M.J. Verschure, "Using a hybrid brain computer interface and virtual reality system to monitor and promote cortical reorganization through motor activity and motor imagery training," in *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 21, no. 2, IEEE, 2013, pp. 174–181, doi: 10.1109/TNSRE.2012.2229295.
5. A.H. Basori, "Emotion walking for humanoid avatars using brain signals," in *International Journal of Advanced Robotic Systems*, InTech, 2013, pp. 1–11, doi: 10.5772/54764.
6. F. Winters, Battleship General Quarters II: <http://www.battleshiponline.org>, 2003.
7. Benevides, A.B., Bastos, T.F.: Proposal of Brain-Computer Interface Architecture to Command a Robotic Wheelchair. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics, p. 2249-2254 (2011)
8. R. Bernays, J. Mone, P. Yau, M. Murcia, J. Gonzalez-Sanchez, M.E. Chavez-Echeagaray, R.M. Christopherson, and R. Atkinson, "Lost in the dark: emotion adaption," in *Adjunct Proceedings of the 25<sup>th</sup> ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST Adjunct'12)*, ACM, 2012, pp. 79-80, doi: 10.1145/2380296.2380331.
9. Bidwell, Nicola J., and Jason Holdsworth. "Battleship by foot: learning by designing a mixed reality game." In Proceedings of the 3rd Australasian conference on Interactive entertainment, pp. 67-74. Murdoch University, 2006.
10. Bonacin, R., Baranauskas, M.C.C. An Organizational Semiotics Approach Towards Tailorable Interfaces. In: 11th International Conference on Human-Computer Interaction, p. 1-12 (2005).

11. L. Bonnet, F. Lotte, and A. Lecuyer, “Two brains, one game: design and evaluation of a multiuser BCI video game based on motor imagery,” in *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, vol. 5, no. 2, IEEE, 2013, pp. 185–198, doi: 10.1109/TCIAIG.2012.2237173.
12. S. Bordoloi, U. Sharmah, and S.M. Hazarika, “Motor imagery based BCI for a maze game,” in *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Human Computer Interaction (IHCI’12)*, IEEE, 2012, pp. 1–6, doi: 10.1109/IHCI.2012.6481848.
13. Bos, Danny Plass-Oude, Boris Reuderink, Bram van de Laar, Hayrettin Gürkök, Christian Mühl, Mannes Poel, Anton Nijholt, Dirk Heylen. Brain-computer interfacing and games. In *Brain-Computer Interfaces*, pp. 149-178. Springer London (2010)
14. D. Bos, B. Reuderink, B. Laar, H. Gürkök, C. Muhl, M. Poel, D. Heylen, and A. Nijholt, “A human-computer interaction for BCI games: usability and user experience,” in *Proceedings of the International Conference on Cyberworlds (CW’10)*, IEEE, 2010, pp. 277–281, doi: 10.1109/CW.2010.22.
15. A. Campbell, T. Choudhury, S. Hu, H. Lu, M.K. Mukerjee, M. Rabbi, and R.D.S. Raizada, “NeuroPhone: brain-mobile phone interface using a wireless EEG headset,” in *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> ACM SIGCOMM Workshop on Networking, Systems, and Applications on Mobile Handhelds (MobiHeld’10)*, ACM, 2010, pp. 3–8, doi: 10.1145/1851322.1851326.
16. J.M. Carmena, M.A. Lebedev, R.E. Crist, J.E. O’Doherty, D.M. Santucci, D.F. Dimitrov, P.G. Patil, C.S. Henriquez, and M.A.L. Nicolelis, “Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates,” in *PLoS Biology*, vol. 1, n. 2, 2003, pp. 193–208, doi: 10.1371/journal.pbio.0000042.
17. H. Cecotti, “A self-paced and calibration-less SSVEP-based brain-computer interface speller,” in *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 18, n. 2, IEEE, 2010, pp. 127–133, doi: 10.1109/TNSRE.2009.2039594.
18. Chi, Yu Mike, Yu-Te Wang, Yijun Wang, Christoph Maier, Tzyy-Ping Jung, Gert Cauwenberghs. Dry and noncontact EEG sensors for mobile brain–computer interfaces. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, IEEE Transactions on 20, no. 2: 228-235 (2012).
19. N. Chumerin, N.V. Manyakov, A. Combaz, A. Robben, M. van Vliet, and M.M. Van Hulle, “Steady state visual evoked potential based computer gaming - the Maze,” in *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International ICST Conference on Intelligent Technologies for Interactive Entertainment (INTETAIN’11)*, Springer, 2012, pp. 28–37, doi: 10.1007/978-3-642-30214-5\_4.
20. ConceptisPuzzles Battleship:  
<http://www.conceptispuzzles.com/index.aspx?uri=puzzle/battleships> .
21. M. Congedo, M. Goyat, N. Tarrin, G. Ionescu, L. Varnet, B. Rivet, R. Phlypo, N. Jrad, M. Acquadro, and C. Jutten, “Brain Invaders’: a prototype of an open-source P300-based

- video game working with the OpenViBE platform,” in *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Brain-Computer Interface Conference (BCI'11)*, HAL, 2011, pp. 280–283.
22. Costa, E.J., Cabral Jr., E.F.: EEG-based Discrimination between Imagination of Left and Right Hand Movements Using Adaptive Gaussian Representation. In: *Medical Engineering & Physics*, v. 22, n. 5, 345 (2000).
  23. P. Coulton, C.G. Wylie, and W. Bamford, “Brain interaction for mobile games,” in *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Academic MindTrek Conference (MindTrek'11)*, ACM, 2011, pp. 37–44, doi: 10.1145/2181037.2181045.
  24. D. Coyle, J. Garcia, A.R. Satti, and T.M. McGinnity, “EEG-based continuous control of a game using a 3 channel motor imagery BCI: BCI game,” in *Proceedings of the IEEE Symposium on Computational Intelligence, Cognitive Algorithms, Mind, and Brain (CCMB'11)*, IEEE, 2011, pp. 1–7, doi: 10.1109/CCMB.2011.5952128.
  25. Datagenetics Battleship Analysis: <http://www.datagenetics.com/blog/december32011/> .
  26. Dirix, M., Muller, A., & Aranega, V. GenMyModel: An Online UML Case Tool. Joint Proceedings of Tools, Demos & Posters, 14, 2013.
  27. G. Edlinger and C. Guger, “A hybrid brain-computer interface for improving the usability of a smart home control,” in *Proceedings of the ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME'12)*, IEEE, 2012, pp. 182–185, doi: 10.1109/ICCME.2012.6275714.
  28. G. Edlinger, C. Holzner, and C. Guger, “A hybrid brain-computer interface for smart home control,” in *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Human-Computer Interaction (HCI'11)*, Springer, 2011, pp. 417–425, doi: 10.1007/978-3-642-21605-3\_46.
  29. Elo, Arpad E. *The rating of chessplayers, past and present*. Vol. 3. London: Batsford, 1978.
  30. C. Escolano, J.M. Antelis, and J. Minguez, “A telepresence mobile robot controlled with a noninvasive brain-computer interface,” in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 42, n. 3, IEEE, 2012, pp. 793–804, doi: 10.1109/TSMCB.2011.2177968.
  31. Ferreira, A.L.S., Marciano, J.N., Miranda, L.C., Miranda, E.E.C. “Understanding and Proposing a Design Rationale of Digital Games based on Brain-Computer Interface: Results of the AdmiralMind Battleship Study”. in *SBC Journal on Interactive Systems*, v. 5, p. 3-15, 2014.
  32. Ferreira, A.S., Miranda, L.C., Miranda, E.E.C.: Interfaces Cérebro-Computador de Sistemas Interativos: Estado da Arte e Desafios de IHC. In: *XI Simpósio Brasileiro sobre Fatores Humanos em Sistemas Computacionais*, p. 239-248 (2012).
  33. Ferreira, A.S., Miranda, L.C., Miranda, E.E.C.: Non-Invasive Brain-Computer Interfaces: Opportunities and Challenges under the Socio-Technical Perspective of Organizational Semiotics. (DRAFT) In: not yet published.

34. Ferreira, A.L.S., Miranda, L.C., Miranda, E.E.C., and Sakamoto, S.G., “A survey of interactive systems based on brain-computer interfaces,” in *SBC Journal on Interactive Systems*, vol. 4, no. 1, SBC, 2013, pp. 3–13.
35. A. Finke, A. Lenhardt, and H. Ritter, “The MindGame: a P300-based brain-computer interface game,” in *Neural Networks*, vol. 22, no. 9, Elsevier, 2009, pp. 1329–1333, doi: 10.1016/j.neunet.2009.07.003.
36. D. Friedman, R. Leeb, G. Pfurtscheller, and M. Slater, “Human-computer interface issues in controlling virtual reality with brain-computer interface,” in *Human-Computer Interaction*, vol. 25, n. 1, Taylor & Francis, 2010, pp. 67–94, doi: 10.1080/07370020903586688.
37. P. Gergondet, S. Druon, A. Kheddar, C. Hintermuller, C. Guger, and M. Slater, “Using brain-computer interface to steer a humanoid robot,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO’11)*, IEEE, 2011, pp. 192–197, doi: 10.1109/ROBIO.2011.6181284.
38. M. Grierson and C. Kiefer, “Better brain interfacing for the masses: progress in event-related potential detection using commercial brain computer interfaces,” in *Proceedings of the Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA’11)*, ACM, 2011, pp. 1681–1686, doi: 10.1145/1979742.1979828.
39. S.M. Grigorescu, T. Lüth, C. Fragkopoulos, M. Cyriacks, and A. Gräser, “A BCI-controlled robotic assistant for quadriplegic people in domestic and professional life,” in *Robotica*, vol. 30, n. 3, 2012, pp. 419–431, doi: 10.1017/S0263574711000737.
40. C. Guger, G. Krausz, B.Z. Allison, and G. Edlinger, “Comparison of dry and gel based electrodes for P300 brain-computer interfaces,” in *Frontiers in Neuroprosthetics*, vol. 6, Frontiers, 2012, pp. 1–7, doi: 10.3389/fnins.2012.00060.
41. H. Gürkök, A. Nijholt, and M. Poel, “Brain-computer interface games: towards a framework,” in *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Entertainment Computing (ICEC’12)*, Springer, 2012, pp. 373–380, doi: 10.1007/978-3-642-33542-6\_33.
42. G. Hakvoort, H. Gürkök, D.P.-O. Bos, M. Obbink, and M. Poel, “Measuring immersion and affect in a brain-computer interface game,” in *Proceedings of the 13<sup>th</sup> IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT’11)*, Springer, 2011, pp. 115–128, doi: 10.1007/978-3-642-23774-4\_12.
43. C. Harrison, D. Tan, and D. Morris, “Skinput: appropriating the body as an input surface,” in *Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI’10)*, ACM, 2010, pp. 453–462, doi: 10.1145/1753326.1753394.
44. B.A.S. Hasan and J.Q. Gan, “Hangman BCI: an unsupervised adaptive self-paced brain-computer interface for playing games,” in *Computers in Biology and Medicine*, vol. 42, n. 5, Elsevier, 2012, pp. 598–606, doi: 10.1016/j.compbiomed.2012.02.004.
45. HeavyGames Battleship: <http://www.heavygames.com/cruiserbattleship2/playgame.asp> .

46. Hill, John, Clark K. Ray, Jean RS Blair, and Curtis A. Carver Jr. Puzzles and games: addressing different learning styles in teaching operating systems concepts. In *ACM SIGCSE Bulletin*, vol. 35, no. 1, pp. 182-186. ACM, 2003.
47. N.J. Hill and B. Schölkopf, "An online brain-computer interface based on shifting attention to concurrent streams of auditory stimuli," in *Journal of Neural Engineering*, vol. 9, n. 2, pp. 1–13, 2012, doi: 10.1088/1741-2560/9/2/026011.
48. Hinebaugh, Jeffrey P. *A board game education*. R&L Education, 2009.
49. Hoffmann, Ulrich, Gary Garcia, J. Vesin, Karin Diserens, Touradj Ebrahimi. A boosting approach to P300 detection with application to brain-computer interfaces. In *Neural Engineering, 2005. Conference Proceedings. 2nd International IEEE EMBS Conference on*, pp. 97-100. IEEE (2005).
50. D. Hood, D. Joseph, A. Rakotonirainy, S. Sridharan, and C. Fookes, "Use of brain computer interface to drive: preliminary results," in *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI'12)*, ACM, 2012, pp. 103–106, doi: 10.1145/2390256.2390272.
51. H-J. Hwang, J-H. Lim, Y-J. Jung, H. Choi, S.W. Lee, and C-H. Im, "Development of an SSVEP-based BCI spelling system adopting a QWERTY-style LED keyboard," in *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 208, n. 1, Elsevier, 2012, pp. 59–65, doi: 10.1016/j.jneumeth.2012.04.011.
52. L. Jiang, C. Guan, H. Zhang, C. Wang, and B. Jiang, "Brain computer interface based 3D game for attention training and rehabilitation," in *Proceedings of the 6<sup>th</sup> IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA'11)*, IEEE, 2011, pp. 124–127, doi: 10.1109/ICIEA.2011.5975562.
53. T.R. Kang, I. Perez, and G.L.E. Matias, "Design and development of an affect-sensitive horror game," in *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Philippine Computing Science Congress*, 2012.
54. C. Kapeller, C. Hintermüller, and C. Guger, "Usability of video-overlaying SSVEP based BCIs," in *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Augmented Human International Conference (AH'12)*, ACM, 2012, doi: 10.1145/2160125.2160151.
55. A. Kaplan, S. Shishkin, I. Ganin, I. Basyul, and A. Zhigalov, "Adapting the P300-based brain-computer interface for gaming: a review," in *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, vol. 5, no. 2, IEEE, 2013, pp. 141–149, doi: 10.1109/TCIAIG.2012.2237517.
56. T. Kaufmann, S. Völker, L. Gunesch, and A. Kübler, "Spelling is just a click away - a user-centered brain-computer interface including auto-calibration and predictive text entry," in *Frontiers in Neuroprosthetics*, vol. 6, Frontiers, 2012, pp. 1–10, doi: 10.3389/fnins.2012.00072.
57. Kelly, Patrick. *War Plan'K': Master-Level Rules and Play Options for the Classic Games BATTLESHIP*. Xlibris Corp, 2004.

58. D-W Kim, J-H Cho, H-J Hwang, J-H Lim, and C-H Im, "A vision-free brain-computer interface (BCI) paradigm based on auditory selective attention," in *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'11)*, IEEE, 2011, pp. 3684–3687, doi: 10.1109/IEMBS.2011.6090623.
59. Klem, George H., H. O. Lüders, H. H. Jasper, and C. Elger. The ten-twenty electrode system of the International Federation. The International Federation of Clinical Neurophysiology. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*. Supplement 52: 3. 1999.
60. KnowledgeAdventure Battleship:  
<http://www.knowledgeadventure.com/games/battleship.aspx> .
61. M. Ko, K. Bae, G. Oh, and T. Ryu, "A study on new gameplay based on brain-computer interface," in *Proceedings of the Digital Games Research Association (DiGRA'09)*, Brunel University, 2009, pp. 1–7.
62. K. LaFleur, K. Cassidy, A. Doud, K. Shades, E. Rogin, and B. He, "Quadcopter control in three-dimensional space using a noninvasive motor imagery-based brain-computer interface," in *Journal of Neural Engineering*, vol. 10, no. 4, IOP, 2013, doi: 10.1088/1741-2560/10/4/046003.
63. E. Lalor, S.P. Kelly, C. Finucane, R. Burke, R.B. Reilly, and G. McDarby, "Brain computer interface based on the steady-state VEP for immersive gaming control," in *Biomedizinische Technik*, vol. 49, no. 1, 2004, pp. 63–64.
64. Lance, B.J., Kerick, S.E., Ries, A.J., Oie, K.S., McDowell, K. Brain-Computer Interface Technologies in the Coming Decades. In: *Proceedings of the IEEE*, v. 100, p. 1585-1599 (2012).
65. J. Lee and K.Y. Lai, "What's in design rationale?," in *Human-Computer Interaction*, vol. 6, no. 3-4, Taylor & Francis, 1991, pp. 251–280, doi: 10.1080/07370024.1991.9667169.
66. R. Leeb, D. Friedman, G.R. Müller-Putz, R. Scherer, M. Slater, and G. Pfurtscheller, "Self-paced (asynchronous) BCI control of a wheelchair in virtual environments: a case study with a tetraplegic," in *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2007, 2007, pp. 1–8, doi: 10.1155/2007/79642.
67. R. Leeb, M. Lancelle, V. Kaiser, D. Fellner, and G. Pfurtscheller, "Thinking Penguin: multimodal brain-computer interface control of a VR game," in *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, vol. 5, n. 2, IEEE, 2013, pp. 117–128, doi: 10.1109/TCIAIG.2013.2242072.
68. L.-D. Liao, C.-Y. Chen, I.J. Wang, S.-F. Chen, S.-Y. Li, B.-W. Chen, J.-Y. Chang, and C.-T. Lin, "Gaming control using a wearable and wireless EEG-based brain-computer interface device with novel dry foam-based sensors," in *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, vol. 9, no. 5, BioMed Central, 2012, pp. 1 –12, doi: 10.1186/1743-0003-9-5.

69. S.S. Liu, A. Rawicz, S. Rezaei, T. Ma, C. Zhang, K. Lin, and E. Wu, "An eye-gaze tracking and human computer interface system for people with ALS and other locked-in diseases," in *Journal of Medical and Biological Engineering*, vol. 32, n. 2, pp. 37–42, 2012.
70. T. Liu, L. Goldberg, S. Gao, and B. Hong, "An online brain-computer interface using non-flashing visual evoked potentials," in *Journal of Neural Engineering*, vol. 7, n. 3, 2010, pp. 1–9, doi: 10.1088/1741-2560/7/3/036003.
71. Liu, K. *Semiotics in Information Systems Engineering*. Cambridge University Press (2000).
72. Long, Jinyi, Yuanqing Li, Hongtao Wang, Tianyou Yu, Jiahui Pan, Feng Li. A hybrid brain computer interface to control the direction and speed of a simulated or real wheelchair. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, IEEE Transactions on 20, no. 5: 720-729 (2012).
73. E. Lopetegui, B. Garcia Zapirain, and A. Mendez, "Tennis computer game with brain control using EEG signals," in *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Computer Games (CGAMES'11)*, IEEE, 2011, pp. 228–234, doi: 10.1109/CGAMES.2011.6000344.
74. F. Lotte, "Brain-computer interfaces for 3D games: hype or hope?," in *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Foundations of Digital Games (FDG'11)*, ACM, 2011, pp. 325–327, doi: 10.1145/2159365.2159427.
75. Lotte, Fabien, Josef Faller, Christoph Guger, Yann Renard, Gert Pfurtscheller, Anatole Lécuyer, and Robert Leeb. "Combining BCI with virtual reality: towards new applications and improved BCI," *Towards Practical Brain-Computer Interfaces*, pp. 197–220. Springer, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-29746-5\_10.
76. F. Lotte, J. Fujisawa, H. Touyama, R. Ito, M. Hirose, and A. Lécuyer, "Towards ambulatory brain-computer interfaces: a pilot study with P300 signals," in *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE'09)*, ACM, 2009, pp. 336–339, doi: 10.1145/1690388.1690452.
77. E. Maby, M. Perrin, O. Bertrand, G. Sanchez, and J. Mattout, "BCI could make old two-player games even more fun: a proof of concept with 'Connect Four'," in *Advances in Human-Computer Interaction*, vol. 2012, 2012, pp. 1–8, doi: 10.1155/2012/124728.
78. J. Mankoff, A. Dey, U. Batra, and M. Moore, "Web accessibility for low bandwidth input," in *Proceedings of the 5<sup>th</sup> ACM International Conference on Assistive Technologies (ASSETS'02)*, ACM, 2002, pp. 17–24, doi: 10.1145/638249.638255.
79. M. Marchesi, "From mobile to Neu: 3D animated contents controlled by a brain-computer interface," in *Proceedings of the Virtual Reality International Conference (VRIC'12)*, ACM, 2012, pp. 1–3, doi: 10.1145/2331714.2331747.
80. D. Marshall, D. Coyle, S. Wilson, and M. Callaghan, "Games, gameplay, and BCI: the state of the art," in *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, vol. 5, no. 2, IEEE, 2013, pp. 82–99, doi: 10.1109/TCIAIG.2013.2263555.



81. P. Martinez, H. Bakardjian, and A. Cichocki, “Fully online multicommand brain-computer interface with visual neurofeedback using SSVEP paradigm,” in *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2007, pp. 13–13, doi: 10.1155/2007/94561.
82. Martinovic, I., Davies, D., Frank, M., Perito, D., Ros, T., Song, D.: On the Feasibility of Side-Channel Attacks with Brain-Computer Interfaces. In: 21st USENIX Security Symposium (2012).
83. N. Maruthappan, N. Iyengar, and P.S. Patel, “Brain chess - playing chess using brain computer interface,” in *Proceedings of the International Conference on Advancement in Information Technology (ICAIT’11)*, IPCSIT, 2011, pp. 183–191.
84. Mason, Steven G., Regula Bohringer, Jaimie F. Borisoff, Gary E. Birch. Real-time control of a video game with a direct brain-computer interface. *Journal of Clinical Neurophysiology* 21, no. 6: 404-408 (2004).
85. M. Mauro, P. Francesco, S. Stefano, G. Luciano, and P. Konstantinos, “Spatial attention orienting to improve the efficacy of a brain-computer interface for communication,” in *Proceedings of the 9<sup>th</sup> ACM SIGCHI Italian Chapter International Conference on Computer-Human Interaction (CHIItaly’11)*, ACM, 2011, pp. 114–117, doi: 10.1145/2037296.2037325.
86. K. McCreadie, D.H. Coyle, and G. Prasad, “Sensorimotor-rhythm modulation feedback with 3D vector-base amplitude panning – a brain-computer interface pilot study,” in *Proceedings of the Irish Signals and Systems Conference*, IET, 2012, pp. 1–6.
87. Meuffels, W.J.M., and D. den Hertog. Puzzle-Solving the Battleship Puzzle as an Integer Programming Problem. *informatics Transactions on Education* 10, no. 3: 156-162. 2010.
88. J.D.R. Millán, R. Rupp, G.R. Müller-Putz, R. Murray-Smith, C. Giugliemma, M. Tangermann, C. Vidaurre, F. Cincotti, A. Kübler, R. Leeb, C. Neuper, K.R. Müller, and D. Mattia, “Combining brain-computer interfaces and assistive technologies: state-of-the-art and challenges,” in *Frontiers in Neuroprosthetics*, vol. 4, Frontiers, 2010, pp. 1–33, doi: 10.3389/fnins.2010.00161.
89. L.C. Miranda, H.H. Hornung, and M.C.C. Baranauskas, “Adjustable interactive rings for iDTV,” in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 56, no. 3, IEEE, 2010, pp. 1988–1996, doi: 10.1109/TCE.2010.5606356.
90. L.C. Miranda, H.H. Hornung, R. Pereira, and M.C.C. Baranauskas, “Exploring adjustable interactive rings in game playing: preliminary results,” in *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Design, User Experience and Usability (DUXU/HCI’13)*, Springer, 2013, pp. 518–527, doi: 10.1007/978-3-642-39241-2\_57.
91. Miranda, L.C., Piccolo, L.S.G., Baranauskas, M.C.C.: Artefatos Físicos de Interação com a TVDI: Desafios e Diretrizes para o Cenário Brasileiro. In: VIII Simpósio Brasileiro de Fatores Humanos em Sistemas Computacionais, p. 60-69 (2008).
92. E.M. Mugler, C.A. Ruf, S. Halder, M. Bensch, and A. Kubler, “Design and implementation of a P300-based brain-computer interface for controlling an internet browser,” in *IEEE*

- Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 18, n. 6, IEEE, 2010, pp. 599–609, doi: 10.1109/TNSRE.2010.2068059.
93. Santana, V.F., Solarte, D.S.M., Neris, V.P.A., Miranda, L.C., Baranauskas, M.C.C.: Redes Sociais Online: Desafios e Possibilidades para o Contexto Brasileiro. In: XXIX Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, p. 339-353 (2009).
  94. C. Mühl, H. Gürkök, D. Bos, M. Thurlings, L. Scherffig, M. Duvinage, A. Elbakyan, S. Kang, M. Poel, and D. Heylen, “Bacteria hunt,” in *Journal on Multimodal User Interfaces*, vol. 4, no. 1, Springer, 2010, pp. 11–25, doi: 10.1007/s12193-010-0046-0.
  95. Müller, S.M.T., Bastos, T.F., Sarcinelli Filho, M.: Proposal of a SSVEP-BCI to Command a Robotic Wheelchair. In: *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 24, n. 1-2, p. 97-105 (2012).
  96. Y. Nam, Q. Zhao, A. Cichocki, and S. Choi, “Tongue-Rudder: a glossokinetic-potential-based tongue-machine interface,” in *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 59, n. 1, IEEE, 2012, pp. 290–299, doi: 10.1109/TBME.2011.2174058.
  97. Nicolelis, Miguel AL, Mikhail A. Lebedev. "Principles of neural ensemble physiology underlying the operation of brain–machine interfaces." *Nature Reviews Neuroscience* 10.7: 530-540 (2009).
  98. Nicolelis, Miguel AL, John K. Chapin. Controlling robots with the mind. *Scientific American Edition* 287, no. 4: 46-55 (2002).
  99. Nijboer, Femke, Adrian Furdea, Ingo Gunst, Jürgen Mellinger, Dennis J. McFarland, Niels Birbaumer, Andrea Kübler. An auditory brain–computer interface (BCI). *Journal of neuroscience methods* 167, no. 1: 43-50 (2008).
  100. A. Nijholt, D. Tan, B. Allison, J.R. Milan, and B. Graitmann, “Brain-computer interfaces for HCI and games,” in *Proceedings of the Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA’08)*, ACM, 2008, pp. 3925–3928, doi: 10.1145/1358628.1358958.
  101. M. Obbink, H. Gürkök, D.P.O. Bos, G. Hakvoort, M. Poel, and A. Nijholt, “Social interaction in a cooperative brain-computer interface game,” in *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International ICST Conference on Intelligent Technologies for Interactive Entertainment (INTETAIN’11)*, Springer, 2012, pp. 183–192, doi: 10.1007/978-3-642-30214-5\_20.
  102. G. Pfurtscheller, R. Leeb, C. Keinrath, D. Friedman, C. Neuper, C. Guger, and M. Slater, “Walking from thought,” in *Brain Research*, vol. 1071, 2006, pp. 145–152.
  103. J.A. Pineda, D.S. Silverman, A. Vankov, and J. Hestenes, “Learning to control brain rhythms: making a brain-computer interface possible,” in *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 11, no. 2, IEEE, 2003, pp. 181–184, doi: 10.1109/TNSRE.2003.814445.
  104. G. Pires, U. Nunesa, and M. Castelo-Branco, “Statistical spatial filtering for a P300-based BCI: tests in able-bodied, and patients with cerebral palsy and amyotrophic lateral

- sclerosis,” in *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 195, n. 2, Elsevier, 2011, pp. 270–281, doi: 10.1016/j.jneumeth.2010.11.016.
105. G. Pires, M. Torres, N. Casaleiro, U. Nunes, and M. Castelo-Branco, “Playing tetris with non-invasive BCI,” in *Proceedings of the 1<sup>st</sup> IEEE International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH’11)*, IEEE, 2011, pp. 1–6, doi: 10.1109/SeGAH.2011.6165454.
  106. Pogo Battleship: <http://www.pogo.com/games/battleship> .
  107. R. Poli, C. Cinel, A. Matran-Fernandez, F. Sepulveda, and A. Stoica, “Towards cooperative brain-computer interfaces for space navigation,” in *Proceedings of the International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI’13)*, ACM, 2013, pp. 149–160, doi: 10.1145/2449396.2449417.
  108. G.M. Poor, L.M. Leventhal, S. Kelley, J. Ringenberg, and S.D. Jaffee, “Thought cubes: exploring the use of an inexpensive brain-computer interface on a mental rotation task,” in *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS’11)*, ACM, 2011, pp. 291–292, doi: 10.1145/2049536.2049612.
  109. Ramos Jr., S.G., Celino, D.R., Rodor, F.F., Ribeiro, M.R., Muller, S.M.: Experimental Evidences for Visual Evoked Potentials with Stimuli beyond the Conscious Perception Threshold. In: Biosignals and Biorobotics Conference, p. 1-5 (2011)
  110. A.B. Randolph, ”Not all created equal: individual-technology fit of brain-computer interfaces,” in *Proceedings of the 45<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Science (HICSS’12)*, IEEE, 2012, pp. 572–578, doi: 10.1109/HICSS.2012.451.
  111. Rodin, E. Y., J. Cowley, K. Huck, S. Payne, and D. Politte. "Developing a strategy for “battleship”." *Mathematical and Computer Modelling* 10, no. 2: 145-153, 1988.
  112. R. Scherer, E. Friedrich, B. Allison, M. Pröll, M. Chung, W. Cheung, R. Rao, and C. Neuper, “Non-invasive brain-computer interfaces: enhanced gaming and robotic control,” in *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Work-Conference on Artificial Neural Networks (IWANN’11)*, Springer, 2011, pp. 362–369, doi: 10.1007/978-3-642-21501-8\_45.
  113. R. Scherer, M. Pröll, B. Allison, and G.R. Muller-Putz, “New input modalities for modern game design and virtual embodiment,” in *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Short Papers and Posters (VRW’12)*, IEEE, 2012, pp. 163–164, doi: 10.1109/VR.2012.6180932.
  114. Schmidt, A.: Implicit Computer-Human Interaction through Context. In: *Personal and Ubiquitous Computing*, v. 4, n. 2-3, p. 191-199 (2000).
  115. Schuler, D., Namioka, A.: *Participatory Design: Principles and Practices* (1993).
  116. Seigneur, J.M.: *The Emotional Economy for the Augmented Human*. In: *2nd Augmented Human International Conference*, 24. Lawrence Erlbaum Associates (2011).
  117. Silva, D.C., & Vinhas, V."An Interactive Augmented Reality Battleship Game Implementation". In *Proceedings of Learning with Games*, 213-219, 2007. doi: 10.1.1.63.5015.

118. Sjöstrom, Calle, and Kirsten Rasmus-Gröhn. "The sense of touch provides new computer interaction techniques for disabled people." *Technology and Disability* 10, no. 1: 45-52. 1999.
119. E.T. Solovey, A. Girouard, K. Chauncey, L.M. Hirshfield, A. Sassaroli, F. Zheng, S. Fantini, and R.J.K. Jacob, "Using fNIRS brain sensing in realistic HCI settings: experiments and guidelines," in *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (UIST'09), ACM, 2009, pp. 157–166, doi: 10.1145/1622176.1622207.
120. E. Solovey, P. Schermerhorn, M. Scheutz, A. Sassaroli, S. Fantini, and R. Jacob, "Brainput: enhancing interactive systems with streaming fNIRS brain input," in *Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (CHI'12), ACM, 2012, pp. 2193–2202, doi: 10.1145/2207676.2208372.
121. Srisuphab, Ananta, and Piyanuch Silapachote. "Rule-based systems made easy with battleship games: A well-received classroom experience". In *Teaching, Assessment and Learning for Engineering* (TALE), 2013 IEEE International Conference on, pp. 560-564. IEEE, 2013.
122. L. Su, M. Wenyan, and H. Qiqian, "The Mind Garden: a brain computer interface game," Internet:  
<https://wiki.cc.gatech.edu/designcomp/images/2/24/MindGardenFinalReport.pdf> [Aug. 31, 2013].
123. Y. Sung, K. Cho, and K. Um, "A development architecture for serious games using BCI (brain computer interface) sensors," in *Sensors*, vol. 12, no. 11, MDPI, 2012, pp. 15671–15688, doi: 10.3390/s121115671.
124. M. Tangermann, M. Krauledat, K. Grzeska, M. Sagebaum, B. Blankertz, C. Vidaurre, and K.-R. Müller, "Playing pinball with non-invasive BCI," in *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Annual Conference on Neural Information Processing Systems* (NIPS'08), 2008, pp. 1641–1648.
125. B. van de Laar, R. Boris, D.P.-O. Bos, and D. Heylen, "Evaluating user experience of actual and imagined movement in BCI gaming," in *International Journal of Gaming and Computer-Mediated Simulations*, vol. 2, no. 4, IGI Global, 2010, pp. 33–47, doi: 10.4018/jgcms.2010100103.
126. G.F.P. van Veen, "Thought games: advancements in gaming with a brain-computer interface from a game design perspective," Internet:  
<http://hmi.ewi.utwente.nl/verslagen/capita-selecta/RT-Veen-Gijs-van.pdf> [Aug. 31, 2013].
127. S. Vernon and S.S. Joshi, "Brain-muscle-computer interface: mobile-phone prototype development and testing," in *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 15, n. 4, IEEE, 2011, pp. 531–538, doi: 10.1109/TTTB.2011.2153208.
128. C. Vi and S. Subramanian, "Detecting error-related negativity for interaction design," in *Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (CHI'12), ACM, 2012, pp. 493–502, doi: 10.1145/2207676.2207744.

129. V.M. Vliet, A. Robben, N. Chumerin, N.V. Manyakov, A. Combaz, and M.M. Van Hulle, "Designing a brain-computer interface controlled video-game using consumer grade EEG hardware," in *Proceedings of the ISSNIP Biosignals and Biorobotics Conference (BRC'12)*, IEEE, 2012, pp. 1–6, doi: 10.1109/BRC.2012.6222186.
130. Y-T. Wang, Y. Wang, and T-P. Jung, "A cell-phone-based brain-computer interface for communication in daily life," in *Journal of Neural Engineering*, vol. 8, n. 2, 2011, doi: 10.1088/1741-2560/8/2/025018.
131. P. Wei, "An virtual vehicle control game for online brain computer interface feedback training," in *Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA'10)*, IEEE, 2010, pp. 1942–1944, doi: 10.1109/ICMA.2010.5589104.
132. Weiser, M.: "The Computer for the Twenty-First Century". *Scientific American*, p. 94-110 (1991)
133. J.R. Wolpaw, N. Birbaumer, D.J. McFarland, G. Pfurtscheller, and T.M. Vaughan, "Brain-computer interfaces for communication and control," in *Clinical Neurophysiology*, vol. 113, n. 6, Elsevier, 2002, pp. 767–791, doi: 10.1016/S1388-2457(02)00057-3.
134. H. Xu, T. Qian, B. Hong, X. Gao, and S. Gao, "Brain-actuated human computer interface for google search," in *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI'09)*, IEEE, 2009, pp. 1–4, doi: 10.1109/BMEI.2009.5305708.
135. A. Yazdani, J-S. Lee, J-M. Vesin, and T. Ebrahimi, "Affect recognition based on physiological changes during the watching of music videos," in *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, vol. 2, n. 1, ACM, 2012, pp. 1–26, doi: 10.1145/2133366.2133373.
136. M.S. Yoh, J. Kwon, and S. Kim, "NeuroWander: a BCI game in the form of interactive fairy tale," in *Proceedings of the 12<sup>th</sup> ACM International Conference Adjunct Papers on Ubiquitous Computing – Adjunct (UbiComp'10 Adjunct)*, ACM, 2010, pp. 389–390, doi: 10.1145/1864431.1864450.
137. B.F. Yuksel, M. Donnerer, J. Tompkin, and A. Steed, "A novel brain-computer interface using a multi-touch surface," in *Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'10)*, ACM, 2010, pp. 855–858, doi: 10.1145/1753326.1753452.
138. S. J. B. Shum, A. M. Selvin, M. Sierhuis, J. Conklin, C. B. Haley, and B. Nuseibeh, "Hypermedia support for argumentation-based rationale," in *Rationale management in software engineering*, Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 111-132, doi: 10.1007/978-3-540-30998-7\_5.
139. A. Brasher, G. Conole, S. Cross, M. Weller, P. Clark and J.White, "CompendiumLD – a tool for effective, efficient and creative learning design," in *Proceedings of the 2008 European LAMS Conference: Practical Benefits of Learning Design*, 2008.

140. Bottino, Rosa Maria, Michela Ott, and Mauro Tavella. "Serious Gaming at School: Reflections on Students' Performance, Engagement and Motivation." *International Journal of Game-Based Learning (IJGBL)* 4.1 (2014): 21-36.
141. Buagaga, Warship Strafe: <http://www.bgames.com/board-games/warship-strafe/>, 2009.
142. Nichehosts, Battleship Fleet 1, <http://www.freenew.net/windows/battleship-fleet-1/37208.htm> , 2014.
143. Torpedo Attack <http://www.wordgames.com/battleship-torpedo-attack.html>.
144. ActiVision Battleship The Videogame <http://www.battleshipthevideogame.com/>, 2012.