

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia de Software

Predição de cybersickness: comparação entre instrumentos de análise eletrodérmica

Autor: Murilo Loiola Dantas
Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Carla Denise Castanho

Brasília, DF
2024



Murilo Loiola Dantas

Predição de cybersickness: comparação entre instrumentos de análise eletrodérmica

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Software da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Software.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof^a. Dr^a. Carla Denise Castanho

Brasília, DF

2024

Murilo Loiola Dantas

Predição de cybersickness: comparação entre instrumentos de análise eletrodérmica

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Software da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Software.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 12 de março de 2024:

Prof^ª. Dr^ª. Carla Denise Castanho
Orientador

Prof. Dr. Tiago Barros Pontes e Silva
Convidado 1

Prof. Dr. Maurício Miranda Sarmet
Convidado 2

Brasília, DF
2024

Agradecimentos

Agradeço minha professora e orientadora, Carla Denise Castanho, pela possibilidade de desenvolver este trabalho e a orientação dada. Agradeço aos meus pais, Vanildo e Rosa Lúcia, por toda a confiança e apoio que me deram e ainda dão, apesar das minhas falhas. Agradeço ao meu irmão, Matheus, pelo cuidado e generosidade. Por fim, agradeço imensamente à minha namorada, Lara, por estar sempre ao meu lado e ter me ajudado com um nível de disposição e motivação que eu mesmo não tive em alguns momentos.

Resumo

A tecnologia de realidade virtual (RV) vem ganhando espaço no mercado mundial com a popularização dos *head-mounted displays* (HMD), dispositivos que possibilitam uma maior imersão em ambientes virtuais simulados. Apesar das aplicações que essa ferramenta possui nas áreas de entretenimento, saúde e educação, sua utilização ainda é limitada pelo fenômeno do *cybersickness* (CS), caracterizado como um mal-estar geral que afeta grande parte dos usuários dessa tecnologia. Como tal, métodos de predição e mitigação dos efeitos de *cybersickness* têm sido estudados extensivamente nos anos recentes. Um dos métodos de predição utilizados é a leitura de bio-sinais diversos, variando de eletroencefalogramas (EEG) à atividade eletrodérmica (EDA). Com o objetivo de comparar dois instrumentos de leitura de EDA quanto à acurácia na predição de *cybersickness* e determinar suas aplicabilidades, foram realizados experimentos práticos com voluntários inseridos em um ambiente de realidade virtual cuja atividade eletrodérmica foi capturada. Em termos absolutos, o BITalino (r)evolution apresentou resultados mais precisos quanto à predição de *cybersickness* utilizando EDA. No entanto, a Empatica E4 apresentou ser de mais fácil uso, inclusive sofrendo menos erros durante a realização das leituras.

Palavras-chave: cybersickness, realidade virtual, bio-sinais, atividade eletrodérmica, EDA

Abstract

Virtual reality (VR) technology has been gaining space on the global market through the popularization of head-mounted displays (HMD), devices that allow for increased immersion in simulated virtual environments. Despite the numerous applications that this tool has in the fields of entertainment, health care and education, its use is still limited by the phenomenon of cybersickness (CS), characterized as a general discomfort that affects most users of this technology. As such, methods of predicting and mitigating the effects of cybersickness have been studied extensively in recent years. One of those prediction methods involves the reading of several biosignals, ranging from electroencephalograms (EEG) to electrodermal activity (EDA). With the objective to carry out a comparative analysis between two instruments used to read EDA signals in regards to their accuracy in cybersickness prediction and determine their specific uses, practical experiments were conducted with the cooperation of volunteers whose EDA signal was captured whilst inside a virtual reality environment. In absolute terms, one of the instruments BITalino (r)evolution showed more precise results when it came to predicting *cybersickness* using EDA. However, the instrument Empatica E4 was considered to be of easier use, even presenting greater resistance to errors during signal collection.

Key-words: cybersickness, virtual reality, biosignals, electrodermal activity, EDA

Lista de ilustrações

Figura 1 – Em sentido horário: HTC Vive, Apple Vision PRO, Playstation VR2, Oculus Rift. Fonte: De autoria própria.	16
Figura 2 – Medição do EDA ao longo do tempo, apresentando os componentes tônico e fásico durante um período de repouso seguido de uma atividade. Fonte: Geršak (2020)	23
Figura 3 – Pulseira Empatica E4.	25
Figura 4 – Placa BITalino (r)evolution Board Kit BT.	27
Figura 5 – Posicionamento dos sensores na palma da mão. Fonte: Manual do BITalino	35
Figura 6 – HMD HTC Vive que foi utilizado no experimento.	37
Figura 7 – Experimento em execução utilizando os jogos desenvolvido por Porcino, Trevisan e Clua (2022)	38
Figura 8 – Exemplo dos dados obtidos com o preenchimento do VRSQ	39
Figura 9 – Exemplo de dados de perfil e desempenho do jogo	40
Figura 10 – Sinal lido pela Empatica E4 durante o período de repouso do participante 1.	41
Figura 11 – Sinal lido pelo BITalino durante o período de jogo do participante 5	42
Figura 12 – Sinal lido pelo BITalino durante o período de jogo do participante 12	42
Figura 13 – Nível de <i>cybersickness</i> medido e calculado do participante 10.	43
Figura 14 – Sinal EDA do participante 10 durante o período de experimento.	43

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela comparativa de resultados do BITalino.	44
Tabela 2 – Tabela comparativa de resultados da Empatica E4.	45
Tabela 3 – Exemplo do VRSQ adaptado para o português utilizado durante o experimento. Fonte: Kim et al. (2018)	54
Tabela 4 – Exemplo do CSPQ adaptado para o português utilizado durante o experimento. Fonte: Porcino, Trevisan e Clua (2022)	55

Lista de abreviaturas e siglas

CS	Cybersickness
CSPQ	Cybersickness Profile Questionare
EDA	Atividade Eletrodérmica
HMD	Head Mounted Display
RV	Realidade Virtual
SSQ	Simulator Sickness Questionare
VSRQ	Virtual Reality Sickness Questionare

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contextualização	11
1.2	Objetivo	12
1.3	Organização do Trabalho	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Realidade Virtual	14
2.1.1	Head-Mounted Displays	15
2.1.2	Imersão	16
2.2	Cybersickness	17
2.2.1	Causas de cybersickness	18
2.2.2	Medição de cybersickness	19
2.2.2.1	Dados subjetivos	19
2.2.2.2	Dados de perfil	20
2.2.2.3	Dados fisiológicos	20
2.3	Biossinais	21
2.3.1	Eletroencefalograma (EEG)	21
2.3.2	Eletrocardiograma (ECG)	21
2.3.3	Eletrogastrografia (EGG)	21
2.3.4	Atividade Eletrodérmica (EDA)	22
2.3.4.1	Análise do sinal EDA	22
2.3.4.2	Cuidados na Medição de EDA	24
2.3.4.3	Considerações sobre EDA	24
2.4	Instrumentos de captação	25
2.4.1	Empatica E4	25
2.4.2	BITalino	26
2.5	Aprendizado de Máquina	28
3	TRABALHOS CORRELATOS	30
3.1	<i>Cybersickness Analysis Using Symbolic Machine Learning Algorithms</i>	30
3.2	Identificando a cybersickness: combinação da atividade eletrodérmica e aprendizado de máquina simbólico	31
4	PROPOSTA E EXPERIMENTO	33
4.1	Visão Geral da Proposta	33
4.2	Metodologia Aplicada	34

4.2.1	Execução do experimento	36
4.3	Dados Obtidos	37
5	RESULTADOS	41
5.1	Processamento dos Dados	41
5.1.1	Dados descartados	41
5.2	Análise dos Resultados	42
5.3	Discussão dos Resultados	45
6	CONCLUSÃO	48
6.1	Trabalhos Futuros	48
	REFERÊNCIAS	50
	ANEXOS	53
	ANEXO A – VIRTUAL REALITY SICKNESS QUESTIONNAIRE	
	- VRSQ	54
	ANEXO B – CYBERSICKNESS PROFILE QUESTIONNAIRE - CSPQ	55

1 Introdução

1.1 Contextualização

A realidade virtual (RV) é uma tecnologia de simulação de ambientes virtuais utilizada para os mais diversos propósitos. Suas aplicações se estendem aos campos da educação, saúde e entretenimento, sendo um diferencial na qualidade da experiência obtida (WALSH; PAWLOWSKI, 2002).

Uma das formas mais comuns de interagir com ambientes de realidade virtual é com o uso de *head-mounted displays* (HMDs). Os HMDs são dispositivos que consistem de duas telas posicionadas próximas aos olhos do usuário. Cada tela apresenta a mesma imagem de um ângulo diferente, dando ao usuário percepção de profundidade. Os HMDs têm se tornado cada vez mais acessíveis ao público geral, tornando a tecnologia de realidade virtual mais difundida (WOHLGENANT; SIMONS; STIEGLITZ, 2020).

Contudo, a utilização de HMDs está relacionada ao fenômeno de *cybersickness* (CS), um desconforto caracterizado pela presença de náusea, cansaço visual, palidez, ataxia e vômito, entre outros sintomas. A maior parte dos usuários de HMDs estão sujeitos à manifestação desses sintomas. Por causa disso, o fenômeno de *cybersickness* é um obstáculo para a popularização de HMDs e da tecnologia de realidade virtual (LAVIOLA, 2000).

Dessa forma, a condução de pesquisas sobre métodos de predição, estudo das causas e propostas de mitigação de *cybersickness* é essencial para a redução desse fenômeno e, conseqüentemente, maior acessibilidade aos HMDs e a tecnologia de realidade virtual.

Dentre as variáveis utilizadas no estudo de *cybersickness*, estão as variáveis de perfil (características físicas da pessoa), variáveis subjetivas (relato pessoal) e variáveis objetivas ou fisiológicas (sinais biológicos naturais). As variáveis de perfil influenciam a ocorrência de *cybersickness*, ao passo que variáveis subjetivas e fisiológicas são conseqüências deste. Essas três variáveis são utilizadas separadamente ou em conjunto para medir o fenômeno de *cybersickness*, seja realizando predições ou mitigações.

Quanto às variáveis objetivas, vários bio-sinais diferentes podem ser utilizados para a pesquisa de *cybersickness*. Alguns instrumentos de leitura são capazes de ler frequência cardíaca, atividade cerebral, contração muscular ou condutância elétrica da pele, dentre outros. Esses vários sinais apresentam flutuações características quando o corpo é submetido ao estresse fisiológico causado pela *cybersickness*. Tais flutuações podem então ser usadas para tirar conclusões sobre o fenômeno de *cybersickness*.

É importante ressaltar também a utilização de algoritmos de aprendizado de máquina na análise dessas variáveis. O volume de dados obtidos durante essas pesquisas, principalmente quando há leitura de bioassinais, é consideravelmente extenso. Dessa forma, os algoritmos de aprendizado de máquina têm recebido destaque na área de *cybersickness* por facilitarem o processamento e posterior análise desses dados.

Por fim, é importante que, ao usar instrumentos de captação de bioassinais, os pesquisadores façam a escolha mais indicada para a pesquisa que querem realizar. Mesmo que dois instrumentos captem o mesmo bioassinal, ambos possuem especificações diferentes que são mais indicadas para um ou outro objetivo. Quanto mais informada for a decisão sobre o instrumento a ser utilizado, melhor será a condução da pesquisa, levando em consideração custo dos instrumentos, facilidade de uso e outras variáveis.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre dois instrumentos de leitura de dados fisiológicos, os dispositivos Empatica E4 e BITalino, no que diz respeito à coleta da atividade eletrodérmica da pele para predição de *cybersickness*. Mais especificamente, pretende-se avaliar os instrumentos de EDA quanto à qualidade da leitura dos dados, resistência à falhas e usabilidade no contexto da *cybersickness*.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho de conclusão de curso está organizado nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 1 - Introdução:** neste capítulo foram apresentados uma breve contextualização do trabalho e os objetivos que o trabalho pretende cumprir;
- **Capítulo 2 - Fundamentação Teórica:** descreve os conceitos que fundamentam este trabalho. O capítulo é subdividido nas seções Realidade Virtual, Cybersickness, Bioassinais, Instrumentos de captação e Aprendizado de Máquina. Cada seção é subdividida em tópicos relevantes e posicionados de uma maneira sequencial para melhor entendimento;
- **Capítulo 3 - Trabalhos Correlatos:** apresenta pesquisas fundamentais para a realização deste trabalho, tratando de tópicos em realidade virtual, *cybersickness* e bioassinais;
- **Capítulo 4 - Proposta e Experimento:** Apresenta a proposta deste trabalho, desde a abordagem até a proposta de solução, além de algumas questões relevantes para a execução do experimento.

- **Capítulo 5 - Resultados:** Apresenta os resultados obtidos a partir da realização do experimento proposto. São apresentados os procedimentos de análise de dados e uma discussão sobre as informações obtidas.
- **Capítulo 6 - Conclusão:** Por fim, encerra esta monografia apresentando algumas considerações finais e trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica necessária para a execução e o entendimento deste trabalho. Em primeiro lugar, uma seção sobre realidade virtual, tecnologia de simulação de ambientes virtuais. Na sequência, ocorre um detalhamento sobre *cybersickness*, suas causas e impacto na utilização da tecnologia supracitada. Por fim, uma explicação sobre o que são bioassinais e como são utilizados para analisar o fenômeno de *cybersickness*.

2.1 Realidade Virtual

Burdea e Coiffet (2003) definem realidade virtual como "uma interface usuário-computador avançada que envolve simulação em tempo real e interações por meio de múltiplos canais sensoriais".

A realidade virtual é uma tecnologia de simulação de ambientes virtuais a partir da utilização de gráficos computadorizados. O maior diferencial dessa tecnologia é a capacidade que o usuário tem de interagir e até mesmo modificar o ambiente virtual no qual está presente. As ações físicas do usuário são refletidas no ambiente virtual: ao movimentar a cabeça, a câmera virtual se movimenta de acordo, ao movimentar as mãos, é possível manipular objetos do ambiente virtual, o ambiente pode ser influenciado até mesmo por comandos verbais. Essas características possibilitam uma imersão profunda no ambiente virtual e, por consequência, na atividade que está sendo executada (BURDEA; COIFFET, 2003).

A aplicação dessa tecnologia se estende a setores variados da indústria global, com perspectiva de expansão conforme novos avanços tecnológicos são realizados. Algumas áreas de aplicação de acordo com Walsh e Pawlowski (2002) são:

- **Arquitetura e Urbanização:** a visualização e compreensão de espaços físicos é facilitada com o uso de realidade virtual, melhorando a comunicação entre profissionais da área e seus clientes. Também é possível realizar e visualizar simulações mais complexas, como mudanças climáticas e ambientais;
- **Educação:** a área de educação é consolidada como uma das que mais fazem uso de realidade virtual, principalmente devido aos simuladores. Ambientes virtuais para treinamento em pilotagem de aeronaves ou realização de cirurgias, por exemplo, são bastante utilizados. No ambiente acadêmico, a realidade virtual pode ser utilizada

para melhorar o aprendizado, permitindo aos estudantes visitar áreas de interesse com facilidade, sem o impedimento da época ou distância;

- **Medicina:** além do treinamento com simuladores mencionado acima, a tecnologia de realidade virtual permite que profissionais especializados possam fazer diagnósticos e procedimentos cirúrgicos sem que estejam presentes no mesmo local que o paciente. Também reduz o risco de procedimentos invasivos com a utilização de equipamentos em miniatura controlados remotamente;
- **Entretenimento:** na área de entretenimento, as aplicações são vastas. Filmes, shows ao vivo, jogos digitais, não há uma mídia de entretenimento que não seja potencializada pela utilização de realidade virtual.

Independente do objetivo para o qual é utilizado, a forma mais comum de interagir com ambientes virtuais é por meio de dispositivos denominados *head-mounted displays*.

2.1.1 Head-Mounted Displays

Head-mounted display é uma tecnologia cujo propósito é maximizar a imersão do usuário em ambientes de realidade virtual. O dispositivo trata-se de um capacete que bloqueia a entrada de luz e projeta uma imagem frente aos olhos do usuário. A imagem é renderizada em duas telas separadas, uma para cada olho, que apresentam o ambiente virtual de ângulos diferentes baseados na distância entre os olhos, com o objetivo de simular a percepção de profundidade com a qual o usuário está acostumado na realidade.

HMDs também contam com acelerômetros para identificar o movimento de cabeça do usuário e mover a câmera virtual de acordo, além de hardwares periféricos que permitem a interação com o ambiente virtual, como controles ou luvas hápticas (WOHLGENANT; SIMONS; STIEGLITZ, 2020).

A complexidade de projetar HMDs que satisfaçam os requisitos necessários para gerar um ambiente imersivo e que também sejam acessíveis para o público geral foram obstáculos para o desenvolvimento desse hardware por muito tempo. Nos anos recentes, no entanto, o interesse pela tecnologia de realidade virtual aumentou consideravelmente, em especial na área de entretenimento com foco em jogos, afetando positivamente a pesquisa e desenvolvimento de HMDs.

A popularização de dispositivos HMDs (apresentados na Figura 1) como o *Oculus Rift* e o *HTC Vive*, assim como lançamentos e anúncios recentes, como é o caso do *Playstation VR2* e do *Apple Vision PRO*, demonstram o interesse da indústria em desenvolver essa tecnologia. Tal interesse está relacionado em partes ao maior diferencial que a realidade virtual proporciona em comparação a métodos tradicionais de interação com ambientes virtuais: o nível de imersão alcançado.



Figura 1 – Em sentido horário: HTC Vive, Apple Vision PRO, Playstation VR2, Oculus Rift. Fonte: De autoria própria.

2.1.2 Imersão

Apesar de ser uma característica fundamental para o funcionamento da realidade virtual, o conceito de imersão é raramente definido ou explicado. [Brown e Cairns \(2004\)](#) explicam imersão em jogos digitais como uma escala de envolvimento dividida em etapas que devem ser sobrepostas para alcançar a imersão total, sendo esta definida como um estado de presença no ambiente virtual, onde a atenção e o foco do usuário estão totalmente vinculados a atividade do jogo. As etapas definidas por Brown e Cairns são:

- **Engajamento:** a primeira etapa na escala de imersão. É uma etapa necessária para se alcançar as próximas. Para se obter engajamento, é necessário que o usuário tenha um interesse inicial pelo jogo. O engajamento também depende do tempo investido na atividade, do esforço necessário para aprender os controles e do sentimento de recompensa alcançada.
- **Absorção:** a segunda etapa na escala de imersão depende principalmente da construção do jogo, ou em termos mais gerais, da construção do ambiente de realidade virtual. Nessa etapa, o ambiente real se torna menos relevante para o usuário e há o desenvolvimento de uma ligação emocional com o mundo virtual. [Brown e Cairns \(2004\)](#) destacam que alguns usuários ainda tentam facilitar a absorção, desligando as luzes do local onde estão ou aumentando o volume do ambiente virtual.

- **Imersão Total:** a última etapa na escala de imersão é definida como um estado onde o ambiente virtual detém a completa atenção do usuário. Nesta etapa, o usuário perde a noção de localização espacial e perspectiva temporal do mundo real. Também chamada de **Presença**, o usuário se sente transferido para o ambiente virtual, o que é importante não apenas para a experiência de jogos digitais, mas também para situações onde a atenção do usuário é essencial para a atividade, como ocorre em simuladores de treino.

A importância de se alcançar a imersão total está na potencialização da experiência obtida. [Brown e Cairns \(2004\)](#) apontam alguns fatores que podem atrapalhar esse processo, como o ambiente real onde o usuário se encontra e a responsividade dos controles utilizados. Nesse ponto, destacam que quaisquer distrações podem interromper o processo de imersão e dificultar a experiência no ambiente virtual.

Especificamente no caso da realidade virtual e *head-mounted displays*, uma distração que é um denominador comum em grande parte das iterações dessa ferramenta é o fenômeno de *cybersickness*, um desconforto geral causado pela utilização de HMDs e que se coloca como obstáculo para a popularização da realidade virtual.

2.2 Cybersickness

Cybersickness é o termo utilizado para se referir a um desconforto físico decorrente da utilização de tecnologias de simulação de ambientes de realidade virtual. Apesar de semelhante ao *motion sickness* quando se trata dos sintomas, *cybersickness* difere do primeiro pelo fato de que o mal estar é causado apenas pela sensação de estar em movimento, visto que durante uma experiência de realidade virtual, o corpo físico do usuário está estacionário ([LAVIOLA, 2000](#)).

Dentre os vários sintomas que caracterizam *cybersickness*, estão presentes: cansaço visual, dor de cabeça, palidez, sudorese, desorientação, vertigem, náusea, vômito e ataxia. Esses sintomas podem persistir até dias após o uso da realidade virtual, a depender da duração e intensidade da atividade realizada. Em casos de simuladores de voo, por exemplo, pilotos em treinamento recebem restrições de pilotagem de algumas horas até dias após o uso do simulador.

Dito isso, é fácil perceber como o fenômeno de *cybersickness* afeta negativamente a popularização não somente de HMDs, mas da tecnologia de realidade virtual como um todo. No geral, pessoas tendem a evitar atividades que as deixam doentes. Se a experiência de realidade virtual, mesmo que imersiva, resulta em *cybersickness*, os usuários deixarão a tecnologia de lado. Além disso, *cybersickness* pode afetar negativamente a qualidade

de treinamentos realizados em RV, caso os usuários sejam distraídos pelos sintomas ou adotem posturas para evitar a incidência de *cybersickness* (LAVIOLA, 2000).

2.2.1 Causas de cybersickness

Existem várias teorias que tentam explicar as causas de *cybersickness*, sendo as principais compiladas por Porcino, Trevisan e Clua (2021) e Mousavi, Jen e Musa (2013):

- **Teoria do Conflito Sensorial:** a teoria mais aceita e citada, é baseada no princípio de que os sintomas de *cybersickness* são causados por um conflito de informações entre os sistemas visual e vestibular, responsável pelo equilíbrio e orientação espacial do corpo. Por exemplo, um conflito ocorre quando o usuário recebe estímulo visual indicando estar em movimento, mas o sistema vestibular acusa o contrário. Tal incongruência gera os sintomas de CS.
- **Teoria da Instabilidade Postural:** essa teoria diz que todos os indivíduos possuem ferramentas próprias que utilizam de maneira inconsciente para manter uma postura robusta e estável. Em ambientes virtuais, algumas cenas podem apresentar ao usuário um ponto de vista em que sua postura e aceleração é incongruente com a realidade, fazendo com que o usuário inconscientemente tente corrigir sua postura para se adequar ao ambiente virtual. Tal esforço para manter uma postura incorreta e instável por longos períodos pode causar os sintomas de CS.
- **Teoria Evolutiva ou do Envenenamento:** essa teoria defende que as incongruências sensoriais geradas pelo ambiente virtual são semelhantes a reações físicas que o corpo evoluiu para utilizar em situações de envenenamento. Quando o corpo detecta uma substância tóxica, o cérebro força o sistema fisiológico a entrar em um estado de náusea como uma tentativa de expelir a substância. De modo análogo, quando surgem conflitos sensoriais advindos de ambientes virtuais, o corpo entende que está sendo atacado e gera a mesma reação, causando os sintomas de CS.

Além disso, Porcino, Trevisan e Clua (2021) detalham alguns fatores mais específicos para a ocorrência de *cybersickness*, dentre eles:

- **Locomoção:** uma movimentação errática e não natural no ambiente virtual aumenta o nível de *cybersickness* sentido pelo usuário mais rapidamente e com mais intensidade.
- **Campo de visão:** apesar de oferecer uma melhor imersão, quanto maior o campo de visão apresentado ao usuário, mais suscetível ele é à ocorrência de *cybersickness*.

- **Nível de controle:** movimentos e interações que não foram iniciadas ou controladas pelo usuário contribuem para a ocorrência de *cybersickness*.
- **Duração de uso:** quanto mais tempo o usuário passa dentro do ambiente virtual, mais provável se torna a incidência de *cybersickness*.
- **Profundidade de campo:** uma simulação inadequada de foco no ambiente virtual pode contribuir significativamente para a ocorrência de *cybersickness*, dado que os olhos são particularmente eficientes em estabelecer foco naturalmente.

Dado as possíveis causas para a ocorrência de *cybersickness*, torna-se essencial a realização de testes e análises para que esse fenômeno possa ser entendido adequadamente.

2.2.2 Medição de *cybersickness*

A medição ou quantificação de *cybersickness* é uma atividade complexa devido ao grande número de fatores já discutidos. Além disso, não há uma única variável que pode ser utilizada para determinar o nível de desconforto gerado pelo uso da RV. Usuários podem sentir múltiplos sintomas não relacionados e não catalogados na literatura. Também é necessário levar em consideração a susceptibilidade de cada indivíduo aos efeitos de *cybersickness*, que pode variar de acordo com gênero, idade, experiência com RV e condições de saúde prévias (PORCINO; TREVISAN; CLUA, 2021).

A literatura levanta várias formas de quantificar e analisar o fenômeno de CS, divididas em dados subjetivos, dados de perfil e dados fisiológicos.

2.2.2.1 Dados subjetivos

Os dados subjetivos são os mais difundidos e utilizados na literatura para pesquisa sobre CS. Esses dados são obtidos a partir do uso de questionários antes, durante ou após a experiência com realidade virtual.

A ferramenta mais utilizada para medir manifestações de *cybersickness* em ambientes de realidade virtual é o SSQ - *Simulator Sickness Questionare*, proposto por Kennedy Norman E. Lane e Lilienthal (1993). O SSQ é dividido em três partes agrupando dezesseis sintomas de desconforto tais como náusea, cansaço visual e dor de cabeça. Para cada sintoma, os participantes marcam o nível de desconforto experienciado em uma escala. O SSQ é utilizado como base para muitos dos questionários criados para pesquisa sobre *cybersickness*.

Por exemplo, O VRSQ - *Virtual Reality Sickness Questionare* proposto por Kim et al. (2018) é uma versão revisada e modificada do SSQ original. O VRSQ apresenta nove itens subdivididos em duas classes de sintomas, "oculomotores" e "desorientação".

Algumas pesquisas recentes, como Yan et al. (2019) e Porcino, Trevisan e Clua (2021) já utilizaram o VRSQ em suas análises. Além disso, Sevinc e Berkman (2019) descreditaram a viabilidade do SSQ original para pesquisas com realidade virtual, citando problemas de qualidade psicométrica. Dessa forma, o VRSQ demonstra ser a ferramenta mais viável para pesquisas atuais. Uma versão do VRSQ adaptada para português pode ser encontrada no Anexo A.

2.2.2.2 Dados de perfil

Dados de perfil se referem às características do indivíduo que está participando do estudo. Variáveis como gênero, idade, condições de saúde, experiência com RV ou cansaço visual afetam a ocorrência de *cybersickness*.

Ao se tratar de gênero, por exemplo, estudos mostram que mulheres são mais suscetíveis a manifestações de *cybersickness* do que homens. De acordo com Kolasinski (1995), isso pode ser explicado pelo fato que mulheres no geral possuem o campo de visão maior em comparação com homens. Como dito anteriormente, um maior campo de visão impacta na incidência de *cybersickness*.

Outros fatores menos considerados também influenciam na ocorrência de *cybersickness*, como olho dominante. O olho dominante refere-se à preferência do sistema visual humano em visualizar cenas com um olho específico. De acordo com Meng, Du e Varshney (2020), essa informação pode ser utilizada para priorizar a renderização na tela do olho dominante sem que o usuário perceba uma queda de qualidade na outra tela.

Devido ao grande número de dados de perfil e sua importância na análise de *cybersickness*, Porcino, Trevisan e Clua (2021) elaboraram o CSPQ - *Cybersickness Profile Questionnaire*. O CSPQ leva em consideração fatores tais como gênero, idade, experiências prévias com realidade virtual, sensibilidade a flashes, sintomas anteriores (dor de cabeça, estresse, cansaço visual, entre outros), problemas de visão, presença de óculos, postura e olho dominante. Uma versão do CSPQ adaptada para português pode ser encontrada no Anexo B.

2.2.2.3 Dados fisiológicos

Dados fisiológicos se referem às informações que podem ser extraídas a partir da atividade biológica involuntária do indivíduo durante a experiência em RV, como atividade cerebral ou batimentos cardíacos. Esse tipo de dado começou a ser utilizado mais recentemente em pesquisas sobre *cybersickness*, muitas vezes sendo aplicado em conjunto com dados subjetivos e de perfil (CHANG; KIM; YOO, 2020).

Os dados fisiológicos, também chamados de biossinais, vêm recebendo mais foco em pesquisas recentes pela sua objetividade maior em relação aos outros tipos de dados. Como

qualquer outra nova abordagem, no entanto, apresentam uma complexidade intrínseca que exige mais detalhamento. Os diferentes tipos de bio-sinais utilizados em pesquisas de *cybersickness* são discutidos abaixo.

2.3 Bio-sinais

2.3.1 Eletroencefalograma (EEG)

A atividade elétrica do cérebro é um bio-sinal muito utilizado para ajudar na detecção de doenças e sintomas físicos. A eletroencefalografia é um método não invasivo de leitura das ondas cerebrais com o uso de eletrodos colocados em locais específicos do couro cabeludo, a depender da atividade cerebral que se deseja analisar.

É importante notar que o eletroencefalograma (EEG) é particularmente suscetível a ruídos devido ao grande número de variáveis que podem influenciar a leitura, uma vez que as ondas cerebrais refletem todo tipo de atividade fisiológica. Mesmo assim, o EEG ainda é uma das ferramentas mais poderosas na detecção de sintomas de *motion sickness*. [Lin et al. \(2007\)](#) isolaram sinais da região parietal e motora do cérebro e identificaram aumentos significativos na frequência das ondas capturadas durante um episódio de *motion sickness*.

2.3.2 Eletrocardiograma (ECG)

A frequência dos batimentos cardíacos é indicativa de alterações fisiológicas que podem estar relacionadas a manifestação de *cybersickness*. [Garcia-Agundez et al. \(2019\)](#) analisaram a frequência cardíaca de indivíduos enquanto utilizavam HMDs. O estudo encontrou uma variação significativa na amplitude, frequência e variabilidade dos batimentos cardíacos de participantes que interromperam o experimento prematuramente devido aos sintomas de *cybersickness*. As leituras obtidas foram corroboradas pela aplicação do SSQ, no qual esses mesmos participantes obtiveram resultados indicativos de *cybersickness*.

Além disso, o estudo utilizou um instrumento ECG com somente dois eletrodos para a realização da leitura. O resultado obtido apresenta uma perspectiva positiva para o monitoramento de *cybersickness* em tempo real com a utilização de equipamentos simples.

2.3.3 Eletrogastrografia (EGG)

A atividade mioelétrica dos músculos gástricos é um forte indicativo da ocorrência de *cybersickness*. [Kim et al. \(2005\)](#) utilizaram uma série de bio-sinais para investigar as alterações físicas de um indivíduo durante um episódio de *cybersickness*. Um dos exames realizados foi a eletrogastrografia, utilizando eletrodos colocados na região abdominal do participante. Os pesquisadores notaram uma ativação mioelétrica da região semelhante

àquela vista durante episódios de náusea. Esses indivíduos também tiveram pontuações indicativas de *cybersickness* nos questionários aplicados.

Apesar da forte relação com *cybersickness*, a leitura da atividade mioelétrica gástrica deve ser realizada com especial cuidado, devido a interferência que pode ser causada pela respiração ou movimentação do indivíduo.

2.3.4 Atividade Eletrodérmica (EDA)

O EDA recebeu mais detalhamento nesta seção de biosinais, pois será o foco de pesquisa deste trabalho.

Atividade eletrodérmica é um termo geral utilizado para descrever mudanças involuntárias das propriedades elétricas da pele relacionadas principalmente as glândulas sudoríparas. A propriedade específica mais estudada dessa atividade é a condutância da pele, medida pela aplicação de um potencial elétrico entre dois pontos da pele e calculando a corrente resultante entre eles (BRAITHWAITE et al., 2013).

Existem dois componentes principais ao analisar a condutância da pele: o Nível de Condutância da Pele (*Skin Conductance Level* - SCL) e a Resposta de Condutância da Pele (*Skin Conductance Response* - SCR).

O primeiro, SCL, indica o nível tônico de condutividade elétrica da pele. É o componente que representa o nível de condutância geral, mudando lenta e gradualmente ao longo do dia e servindo como uma medida das características de fundo do sinal de EDA (aumentos e reduções lentas do sinal). O segundo, SCR, é o componente fásico do sinal de EDA, indicando mudanças rápidas em resposta a algum estímulo.

Além disso, duas outras variáveis relacionadas ao SCR são de importância para a análise do EDA. São elas: Resposta de Condutância da Pele Não-Específica (*Non-Specific Skin Conductance Response* - NS-SCR) e Resposta de Condutância da Pele Relacionada a Evento (*Event-Related Skin Conductance Response* - ER-SCR).

Durante um experimento de medição de EDA, é ideal reduzir ao máximo a ocorrência de NS-SCRs, uma vez que estes representam picos do sinal fásico que não podem ser relacionados a um estímulo identificável, sendo considerados ruídos na medição. Já o ER-SCR é indicativo de um pico fásico que ocorreu devido a um estímulo identificável durante o experimento, servindo como uma medida da reação fisiológica ao evento em questão.

2.3.4.1 Análise do sinal EDA

O sinal EDA é, portanto, formado por dois componentes principais: o SCL e o SCR, sendo este último dividido em dois tipos, NS-SCR e ER-SCR. A análise do sinal

deve levar em consideração a diferença entre estes componentes e, mais importante, como os componentes se relacionam entre si.

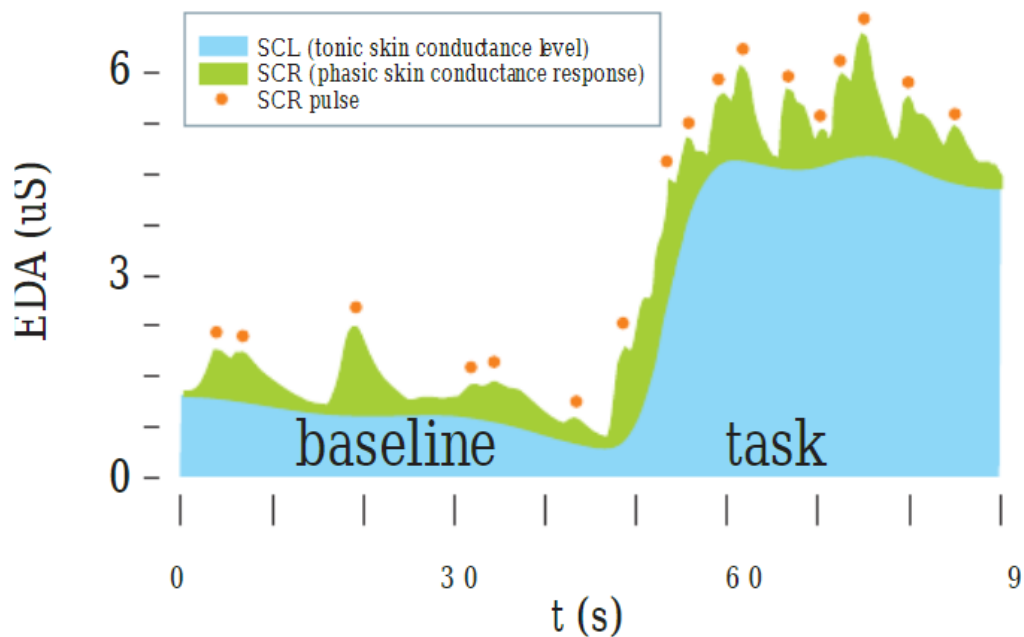


Figura 2 – Medição do EDA ao longo do tempo, apresentando os componentes tônico e fásico durante um período de repouso seguido de uma atividade. Fonte: Geršak (2020)

A Figura 2 apresenta o comportamento padrão de um sinal EDA. Braithwaite et al. (2013) recomendam um período de repouso antes do início do experimento para aferir a atividade eletrodérmica base (SCL tônico) do indivíduo. Na Figura 2, esse período pode ser observado na primeira metade do gráfico. É importante notar que mesmo durante esse período de repouso, há a ocorrência de pulsos SCR fásicos. Estes são os NS-SCR descritos anteriormente. Esse período de repouso pode ser utilizado para calcular a média de pulsos NS-SCR, possibilitando uma aferição mais precisa do sinal SCL tônico.

Durante a execução da atividade, há a ocorrência mais frequente de pulsos SCR fásicos, sendo estes os ER-SCR. A frequência dos pulsos SCR faz com que o SCL tônico seja afetado, uma vez que a condutância média da pele é aumentada durante esse período.

De acordo com Dennison, Wisti e D’Zmura (2016), Gavgani et al. (2017) e Yang et al. (2023), um aumento no SCL tônico do EDA é indicativo de incidência de *cybersickness*. Tal aumento, causado pela ocorrência aumentada de pulsos fásicos em um curto período, reflete sintomas característicos de *cybersickness*, como sudorese intensa, náusea e vertigem.

2.3.4.2 Cuidados na Medição de EDA

Existem vários cuidados que devem ser tomados tanto durante o experimento, quanto durante a análise do sinal coletado. Braithwaite et al. (2013) e Geršak (2020) levantam alguns desses cuidados, descritos a seguir:

- **Diferenças individuais:** algumas diferenças individuais podem afetar a leitura obtida. Algumas pessoas são menos responsivas a certos estímulos e podem apresentar picos fásicos de menor amplitude. A espessura da pele também pode afetar a leitura. Alguns métodos de padronização para lidar com essas variáveis são apresentados por Braithwaite et al. (2013).
- **Ambiente:** variáveis do ambiente devem ser monitoradas para assegurar que a leitura não sofra interferência. Geršak (2020) recomenda que a temperatura seja mantida na faixa de 22 °C à 24 °C e a umidade relativa do ar esteja entre 50% e 65%, de forma a evitar hiperativação das glândulas sudoríparas.
- **Período de repouso:** um período de repouso de 2 a 5 minutos anterior ao início da atividade que se deseja medir é ideal para calcular uma linha de base da atividade eletrodérmica do indivíduo. Além de servir como um cálculo do sinal SCL tônico base e da frequência e amplitude média de sinais NS-SCR fásicos, esse período de repouso pode ser usado para aferir se o indivíduo é hiper ou hiporresponsivo, independente da presença de estímulos.
- **Aplicação dos eletrodos:** imediatamente após a aplicação dos eletrodos responsáveis pela leitura da corrente elétrica, a atividade eletrodérmica aumenta temporariamente, parcialmente devido ao gel utilizado entrando em contato com os canais sudoríparas. Geršak (2020) recomenda que os eletrodos sejam aplicados de três à cinco minutos antes do início do experimento para permitir que a atividade eletrodérmica estabilize. Dessa forma, a aplicação pode ser feita antes que o participante responda aos questionários iniciais. A atividade eletrodérmica estabilizará durante o preenchimento dos questionários e nos momentos iniciais do período de repouso.

2.3.4.3 Considerações sobre EDA

Assim como os outros biossinais apresentados, o EDA já foi utilizado em outras pesquisas e sua correlação com os sintomas de *cybersickness* é verificável (KIM et al., 2008). Dessa forma, também é pertinente discutir os instrumentos de captação do sinal EDA que serão utilizados neste trabalho.

2.4 Instrumentos de captação

Os instrumentos de captação são dispositivos eletrônicos que possibilitam a leitura dos biossinais e posterior análise dos dados obtidos. Para este trabalho, serão utilizados dois dispositivos de captação de EDA, descritos a seguir.

2.4.1 Empatica E4



Figura 3 – Pulseira Empatica E4.

A Empatica E4, apresentado na Figura 3, é uma pulseira adaptável vestível desenvolvida para a aquisição de dados em tempo real e de forma contínua¹. A Empatica E4 possui quatro sensores listados a seguir:

- **Fotoplestimografia (PPG):** esse sensor permite a leitura de pulsos do volume sanguíneo, informação da qual é possível derivar outras variáveis, como frequência cardíaca, variabilidade da frequência cardíaca e outras características cardiovasculares.
- **Atividade Eletrodérmica (EDA):** um sensor que permite medir a atividade eletrodérmica da pele, permitindo derivar valores sobre a excitação do sistema simpático. Os eletrodos de medição de EDA podem ser visualizados na Figura 3, localizados na parte interna da banda da pulseira. São identificados por dois discos de metal que entram em contato com a parte interna do pulso.
- **Acelerômetro de 3 eixos:** permite a captura de atividades de movimento.
- **Termopilha infravermelha:** possibilita a captura da temperatura da pele.

Além disso, a Empatica E4 possui um relógio interno de alta precisão para marcação de tempo e um botão para marcação de eventos manualmente. As especificações técnicas do sensor de EDA da Empatica E4 são descritos a seguir²:

¹ <https://www.empatica.com/en-int/research/e4/>

² <https://shorturl.at/pqI34>

- **Frequência de amostragem:** 4Hz (não ajustável).
- **Resolução:** 900 pSiemens.
- **Faixa de amplitude:** 0,01 μ Siemens à 100 μ Siemens.

O principal atrativo da Empatica E4 para a obtenção de dados fisiológicos é a praticidade de uso. Especialmente em situações onde o usuário realiza movimentos com as mãos e braços, como é o caso dos jogos de realidade virtual, a pulseira oferece pouca resistência e incômodo. Alguns estudos, como [Ollander et al. \(2016\)](#) e [Ragot et al. \(2017\)](#), obtiveram resultados satisfatórios quanto à medição de estresse utilizando a Empatica E4.

Contudo, alguns outros pontos levantam questionamentos quanto à qualidade do sinal lido pela pulseira. Com uma resolução de 900 pS e uma faixa de amplitude entre 0,01 e 100 μ S, a Empatica E4 mais do que satisfaz as recomendações da literatura, que estão entre 1 e 40 μ S ([BRAITHWAITE et al., 2013](#)), garantindo cobertura completa na questão de diferenças individuais quanto aos níveis de SCL e SCR.

No entanto, a pulseira deixa a desejar na frequência de amostragem, sendo a frequência mínima recomendada pela literatura na ordem de 10Hz, preferindo valores maiores, se possível ([GERŠAK, 2020](#)). A frequência reduzida da pulseira pode limitar o detalhamento do dado obtido. Pulsos de SCR mais curtos, por exemplo, podem passar despercebidos, por consequência afetando a leitura do SCL.

Além disso, o posicionamento da pulseira, apesar de mais prático e menos incômodo para o usuário, pode oferecer um sinal de menor qualidade. O manual da Empatica E4 instrui o posicionamento da pulseira de forma que os eletrodos fiquem em contato com a parte interna do pulso. Embora esse posicionamento ainda forneça uma densidade satisfatória de glândulas sudoríparas, é importante ressaltar que a atividade eletrodérmica nessa região está mais associada a fenômenos termorregulatórios, ao invés de psicofisiológicos ([BOUCSEIN et al., 2012](#)).

2.4.2 BITalino

A placa BITalino (r)evolution é uma plataforma de licença aberta para captura e gravação de biosinais distribuída pela empresa *Plux Biosignals*³. A versão específica apresentada na Figura 4 é chamada de *Board Kit BT* e possui vários sensores e atuadores anexados diretamente na placa. Há também uma versão chamada *Plugged BT*, na qual os sensores podem ser plugados e removidos, permitindo personalização, mas também exigindo mais conhecimento técnico.

A versão *Board Kit BT*, que foi utilizada neste estudo, possui os seguintes sensores:

³ <https://www.pluxbiosignals.com/collections/bitalino>

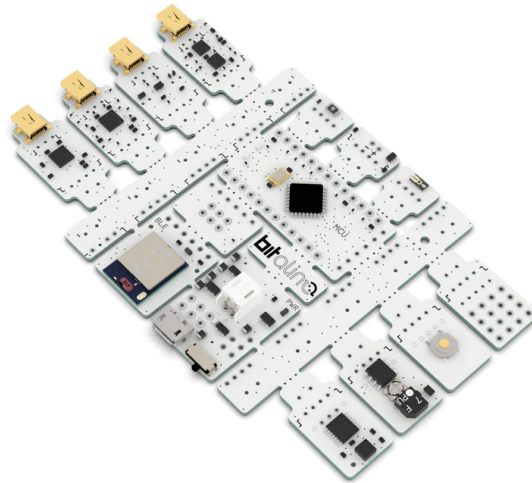


Figura 4 – Placa BITalino (r)evolution Board Kit BT.

- **Eletroencefalograma (EGG);**
- **Atividade Eletrodérmica (EDA);**
- **Eletrogastrografia (ECG);**
- **Acelerômetro de 1 eixo;**
- **Eletromiografia (EMG):** permite capturar atividade elétrica relacionada a ativação muscular.
- **Placa de prototipação:** interface para a utilização de acessórios customizados.

Além disso, o BITalino possui um relógio interno de alta precisão para marcação de tempo e um botão para marcação de eventos manualmente. É importante destacar que os cabos com os eletrodos devem ser adquiridos separadamente, sendo distribuídos pela própria empresa. As especificações técnicas da placa, assim como do sensor EDA, são descritas a seguir^{4,5}:

- **Frequência de amostragem:** 1Hz, 10Hz, 100Hz ou 1000Hz (ajustável).
- **Resolução:** o canal A2, no qual é conectado o sensor de EDA, possui 10 bits de resolução. Outros canais possuem resoluções diferentes.

⁴ <https://shorturl.at/dfK08>

⁵ <https://shorturl.at/quQZ8>

- **Faixa de amplitude:** 0 μ Siemens à 25 μ Siemens.

O BITalino traz uma variedade de sensores de bioSSinais, possibilitando modularidade e maior abrangência em experimentos que o utilizam. Além disso, seu custo é relativamente baixo quando comparado com outros leitores de bioSSinais. [Batista et al. \(2019\)](#) compararam a performance do BITalino com outro dispositivo de bioSSinais cuja eficácia é comprovada, o BioPac MP35. As diferenças encontradas foram significativamente baixas e, especialmente no caso do EDA, houve pouquíssimas diferenças na leitura, mesmo sem tratamento de dados.

Quanto às suas especificações técnicas, o BITalino cumpre as recomendações da literatura. No caso da faixa de amplitude, apesar de não alcançar o limite máximo de 40 μ S, [Braithwaite et al. \(2013\)](#) destacam que esse valor foi somente observado em situações de estimulação extrema. A média observada se encontra na faixa de 2 μ S à 16 μ S, para a qual a amplitude do BITalino é suficiente.

Sua frequência de amostragem é ajustável e oferece valores de até 1000Hz, alcançando a recomendação de [Geršak \(2020\)](#) para realizar a leitura do componente SCR fásico com detalhamento satisfatório.

Sobre o posicionamento dos eletrodos, o manual do sensor EDA exemplifica a aplicação na falange proximal dos dedos indicador e médio. Tal posicionamento é condizente com a literatura, uma vez que é a área com maior densidade de glândulas sudoríparas, facilitando a leitura da atividade eletrodérmica. O posicionamento deve ser feito, de preferência, na mão não dominante, para reduzir o desconforto do usuário. Caso o posicionamento nos dedos seja inviável, também é possível aplicá-los na região metacarpal e carpal do polegar ([BOUCSEIN et al., 2012](#)).

2.5 Aprendizado de Máquina

Sendo um campo da computação que evoluiu dos estudos de reconhecimento de padrões e aprendizado computacional, o aprendizado de máquina é um termo guarda-chuva para algoritmos que realizam análise de padrões com maior flexibilidade. Os algoritmos de aprendizado de máquina são treinados em um grande volume de informações e geram um modelo de análise baseado nas informações lidas anteriormente. Com isso, são capazes de realizar análises precisas sobre dados ainda não vistos.

Muitos estudos têm utilizado o aprendizado de máquina para análise do fenômeno de *cybersickness*. [Kim et al. \(2019\)](#) propôs um modelo de *deep learning* para realizar uma análise da atividade cerebral e sua relação com sintomas de *cybersickness*.

[Islam, Ang e Quarles \(2021\)](#) apresentou um framework automatizado para detectar níveis de *cybersickness* durante uma experiência de realidade virtual. Sua análise foi

realizada com a coleta de dados fisiológicos dos participantes durante a experiência e aplicação de métodos de mitigação. O modelo de deep learning apresentado realiza a predição de *cybersickness* e aplica métodos de mitigação em tempo real.

A maioria das análises realizadas na literatura tem se baseado em modelos de deep learning. Modelos de deep learning, embora capazes de análises complexas, deixam pouco espaço para análise do processo, sendo difícil observar a árvore de tomada de decisão. Dessa forma, trabalhos recentes têm optado por modelos de aprendizado de máquina simbólico. Estes modelos são mais explicáveis e apresentam um processo claro para a tomada de decisões, permitindo uma análise mais direta das causas de *cybersickness*.

Porcino, Trevisan e Clua (2022), por exemplo, utilizaram um modelo de aprendizado de máquina simbólico para calcular as principais causas de *cybersickness*, além de proporem métodos de mitigação direcionados para cada causa. O modelo a ser utilizado neste trabalho será este de Porcino, Trevisan e Clua (2022).

O modelo em questão utiliza os dados de perfil e da sessão do jogo para realizar uma predição do nível de *cybersickness* do participante em qualquer dado momento. O nível predito, que vai de 0 (sem sintomas) até 3 (sintomas severos), é então comparado com o nível medido (relatado pelo participante durante o experimento). Caso o modelo consiga prever o nível de *cybersickness* sem erros, será considerado um caso válido.

O sinal EDA lido por cada instrumento durante a sessão do jogo será então comparado com as alterações no nível de *cybersickness*, sendo o objetivo encontrar uma alteração significativa se comparado com a linha basal do participante. Por exemplo, caso seja detectado um alto nível de *cybersickness*, espera-se por conseguinte um aumento na atividade eletrodérmica do participante, que é indicativo de alterações fisiológicas como tontura, enjoo ou vertigem.

Portanto, caso as alterações no sinal EDA sejam condizentes com o nível de *cybersickness* do participante, este será considerado como um resultado positivo para o estudo.

3 Trabalhos Correlatos

Neste capítulo serão apresentados e discutidos dois estudos já realizados que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. A base teórica fornecida por estes estudos é essencial para a elaboração da proposta apresentada no Capítulo 4. Dito isso, é importante destacar que a literatura na área de *cybersickness* é extensa e abrangente. A seção de Referências apresenta vários outros estudos na área.

3.1 *Cybersickness Analysis Using Symbolic Machine Learning Algorithms*

O estudo de [Porcino, Trevisan e Clua \(2022\)](#) trata-se de uma análise experimental sobre a predição de *cybersickness* utilizando aprendizado de máquina simbólico. O principal objetivo do trabalho era determinar se o aprendizado de máquina simbólico poderia ser treinado para realizar a predição de *cybersickness*, ranqueando as causas quanto à influência na manifestação dos sintomas. O aprendizado de máquina simbólico fornece um resultado compreensível para humanos, possibilitando uma melhor análise.

Para a realização do estudo, Porcino utilizou dados subjetivos e de perfil, além dos dados internos da sessão de jogo, como aceleração e rotação. Além disso, desenvolveu dois jogos/simuladores de realidade virtual diferentes, um de voo e um de corrida, cada um específico para testar diferentes causas de *cybersickness*.

No jogo de voo, o jogador deve controlar um pássaro e passar por aros distribuídos em intervalos fixos em um percurso infinito. Cada aro subsequente pelo qual o jogador passar com sucesso causará um aumento de velocidade. Ao errar um aro, a velocidade é redefinida para o padrão. O pássaro pode ser controlado em qualquer direção (horizontal e/ou vertical), mas o jogador não tem controle direto sobre a aceleração.

No jogo de corrida, o jogador deve completar um percurso fechado quantas vezes for possível. Neste jogo, o jogador possui controle direto sobre a aceleração do carro, podendo inclusive usar a marcha ré. Em ambos os jogos, o jogador pode olhar ao redor movimentando a cabeça. Além disso, os jogos possuem reconhecimento de voz para que o participante relate o nível de desconforto no decorrer do experimento, em uma escala de 0 a 3.

Os participantes do experimento, em sua última versão, começavam respondendo ao VRSQ e ao CSPQ, para a coleta de dados subjetivos e de perfil. A seguir, passavam por uma experiência de realidade virtual utilizando um HMD. Por último, respondiam nova-

mente ao VRSQ, possibilitando a verificação da diferença após a experiência de realidade virtual. Porcino realizou múltiplas baterias de experimentos, introduzindo modificações baseadas nas descobertas das anteriores. Na última versão, a experiência em realidade virtual durou por 20 minutos.

Os participantes tinham a opção de interromper o experimento a qualquer instante, devido aos sintomas de *cybersickness*. Os dados desses participantes foram considerados inválidos, uma vez que a computação do aprendizado de máquina seria afetada pelos dados incompletos. Além disso, participantes que relataram verbalmente não terem sentido sintomas de *cybersickness*, mas cujo preenchimento do VRSQ indicou haver manifestação de *cybersickness*, também tiveram seus dados desconsiderados para utilização no aprendizado de máquina pela incongruência observada.

No final, o experimento contou com 37 casos válidos. Os dados subjetivos, de perfil e da sessão de jogo foram convertidos para um formato interpretável pelo algoritmo de aprendizado de máquina. Porcino reportou uma acurácia na predição de *cybersickness* de até 99,0% no melhor dos casos, além de contar com a análise das principais causas e possíveis métodos de mitigação de *cybersickness*. Tanto o código dos jogos, quanto do aprendizado de máquina estão disponíveis na plataforma GitHub ^{1,2}.

O experimento pode ser resumido nos seguintes passos: cada participante responde ao VRSQ e CSPQ, registrando seus dados de perfil e de sintomas antes da sessão de jogo. Os participantes então passam por uma experiência de realidade virtual, após a qual respondem novamente o VRSQ com a intenção de registrar a mudança no bem estar de cada participante resultante do jogo.

Os dados obtidos são então utilizados como entrada para o aprendizado de máquina, que por sua vez determina o nível de *cybersickness* do participante em qualquer dado momento. Caso a predição do aprendizado de máquina seja condizente com o nível de *cybersickness* medido (relatado pelo participante durante o experimento), considera-se a predição como acertada.

3.2 Identificando a *cybersickness*: combinação da atividade eletro- dérmica e aprendizado de máquina simbólico

O trabalho realizado por Sobral (2023) teve como base teórica o estudo de Porcino, Trevisan e Clua (2022) descrito acima. O principal objetivo foi inserir a análise de biossinais na metodologia elaborada por Porcino, de forma a reduzir a dependência em relatos subjetivos dos participantes.

¹ <https://github.com/tmp1986/UFFCSDData>

² https://github.com/tmp1986/ML_CS_PREDICTOR_PYTHON

Sobral utilizou a pulseira Empatica E4 descrita no Capítulo 2 para a coleta de biossinais. A proposta inicial era utilizar o sensor de EDA para medir a atividade eletrodérmica e o sensor PPG para calcular a frequência de batimentos cardíacos. No entanto, Sobral verificou que os valores lidos pelo sensor PPG eram inconsistentes e, portanto, não seriam adequados para utilização no modelo de aprendizado de máquina simbólico.

O experimento realizado nesse estudo foi bem semelhante ao de Porcino, com a adição da leitura de biossinais. Inicialmente, os participantes tiveram sua atividade eletrodérmica e frequência cardíaca medidas por um período de 3 minutos em repouso. Após, realizaram o preenchimento do VRSQ e CSPQ, seguindo então o roteiro padrão utilizado por Porcino, com uma sessão de realidade virtual de até 5 minutos.

É importante destacar que, diferente de Porcino, Sobral optou por não descartar os participantes que apresentaram incongruências subjetivas, relatando algo diferente do que era apontado pelos questionários, por exemplo. Essa escolha foi feita principalmente pelo propósito do trabalho ser aumentar a objetividade da leitura utilizando os biossinais, de forma que os relatos subjetivos foram menos priorizados.

Sobral realizou as modificações necessárias no modelo de aprendizado de máquina simbólico para incluir os dados fisiológicos na análise, disponibilizando-o no GitHub³. Após a análise, o resultado final foi de 63% de acerto em relação a predição de *cybersickness* usando os biossinais, considerado satisfatório. Também é importante ressaltar que Sobral identificou múltiplas instâncias de incongruências no sinal lido pela Empatica E4, alguns apresentando valores nulos ou falhas de leitura.

³ https://github.com/Fernando-S/ML_CS_PREDICTOR_PYTHON-GOOGLE-COLAB

4 Proposta e Experimento

Neste capítulo é apresentado um detalhamento da proposta deste trabalho, com uma descrição das técnicas e tecnologias que foram utilizadas, além da metodologia aplicada e os experimentos realizados.

4.1 Visão Geral da Proposta

A proposta deste trabalho é realizar uma análise comparativa sobre a eficácia dos dispositivos Empatica E4 e BITalino quanto à qualidade dos dados, resistência à falhas e usabilidade na leitura da atividade eletrodérmica para predição de *cybersickness*.

Para isso, foram realizados experimentos baseados na metodologia original de [Porcino, Trevisan e Clua \(2022\)](#) e com a adição das alterações feitas por [Sobral \(2023\)](#) para inclusão de bio-sinais. Um passo a passo dos experimentos realizados por ambas as pesquisas nas quais este trabalho se baseia é descrito no Capítulo 3.

Os dados a serem utilizados para a condução da pesquisa são:

- **μSiemens:** unidade para medição da atividade eletrodérmica da pele. É um determinante da condutância entre dois pontos;
- **Tempo:** a variação da EDA durante o período do experimento é fundamental para a verificação da ocorrência de *cybersickness*;
- **Dados subjetivos:** dados relatados pelo participante quanto ao bem estar antes, durante e após o experimento. Os dados subjetivos vão de 0 (nenhum sintoma) até 3 (sintomas severos). Os participantes são lembrados a relatar o nível a cada minuto decorrido do experimento;
- **Dados de desempenho:** dados de desempenho no jogo, como velocidade, movimentação da câmera e tempo. São utilizados pelo algoritmo de aprendizado de máquina como influenciadores de *cybersickness*;
- **Dados de perfil:** informações físicas do participante, como idade ou problemas de visão.

Esta pesquisa tem como objetivo verificar e comparar a viabilidade dos dois instrumentos supracitados na coleta de EDA para predição de *cybersickness*. Os dispositivos serão avaliados quanto à:

- **Qualidade do sinal:** diz respeito à resolução do sinal obtido e precisão das leituras. Neste quesito, um sinal que apresenta mudanças fásicas mais detalhadas e claras é preferível;
- **Resistência à falhas:** quantas falhas cada instrumento apresentou durante as leituras. As falhas podem ser caracterizadas como de software, quando a aplicação que registra as leituras apresenta algum tipo de erro, ou de hardware, quando o dispositivo apresenta uma leitura incongruente com a onda de sinal esperada;
- **Usabilidade:** uma análise qualitativa sobre a facilidade de uso dos instrumentos, tanto por parte dos usuários, quanto por parte do pesquisador. No quesito usabilidade serão considerados pontos como complexidade de uso, confortabilidade para o usuário e facilidade na obtenção das leituras;
- **Congruência com a predição:** o quesito de análise mais direto, diz respeito à porcentagem de leituras consideradas condizentes com a predição realizada pelo aprendizado de máquina. Quando a predição determinar que não houve *cybersickness*, o sinal lido deve apresentar pouca alteração da linha basal, indicando baixo estresse fisiológico. Da mesma forma, um alto nível de *cybersickness* deve ser acompanhado por um sinal que apresente alteração significativa.

Com isso, espera-se fornecer um detalhamento maior acerca do funcionamento de ambos os instrumentos para que futuros estudos sobre *cybersickness* e EDA tenham maior assertividade na escolha de qual instrumento usarão para suas análises.

4.2 Metodologia Aplicada

Inicialmente, foi feita uma revisão completa do modelo de aprendizado de máquina, já com as alterações realizadas por Sobral, descritas em detalhes no Capítulo 3. O objetivo dessa revisão é garantir o funcionamento adequado do modelo, assim como realizar possíveis atualizações nas bibliotecas usadas.

Durante a revisão, foi encontrado somente uma função que havia sido depreciada, sendo ela a função "plot_confusion_matrix", bastando ser alterada pela nova função "ConfusionMatrixDisplay".

A realização do experimento seguiu, em sua maior parte, o roteiro utilizado proposto por Porcino, Trevisan e Clua (2022) e modificado por Sobral (2023). Algumas decisões feitas após o primeiro experimento são descritas a seguir:

- **Momento da aplicação dos sensores:** como recomendado por Geršak (2020) e explicado no Capítulo 2, o momento ideal para aplicação dos sensores de leitura é

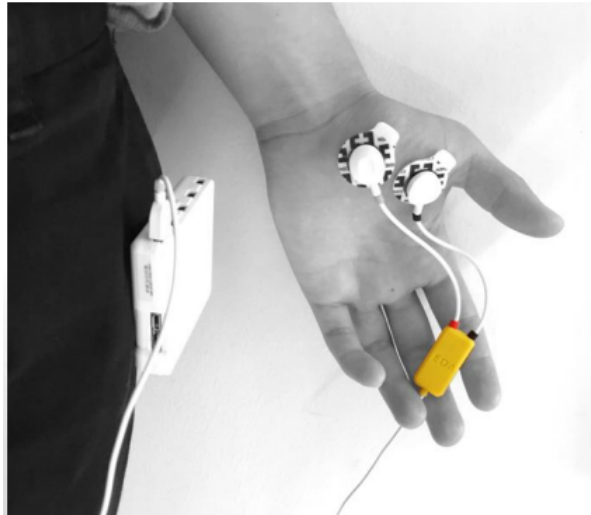


Figura 5 – Posicionamento dos sensores na palma da mão. Fonte: Manual do BITalino

cerca de três a cinco minutos de antecedência à realização das medições. Os eletrólitos presentes no gel utilizado para a aplicação dos eletrodos geram uma interrupção temporária na atividade eletrodérmica da região, sendo recomendado um período de espera para estabilização. No entanto, esse curso de ação se demonstrou inviável, uma vez que os sensores sofreram interferência considerável causada pela movimentação durante o preenchimento dos questionários. Dessa forma, os sensores foram aplicados imediatamente após o preenchimento dos questionários, pouco antes da medição do EDA durante o período de repouso.

- **BITalino:** a maior diferença em relação ao experimento realizado por Sobral foi a utilização de um segundo sensor de EDA, o BITalino. Os eletrodos do BITalino foram aplicados na região metacarpal do polegar e do dedo mínimo, localizados na palma da mão, conforme apresenta a Figura 5 ¹. Tal posicionamento dos sensores foi escolhido devido a dificuldade de aplicação em outras posições mais indicadas, como nas pontas dos dedos.

Dessa forma, o experimento seguiu o seguinte roteiro geral:

- Explicação para o participante sobre o experimento e os procedimentos;
- Preenchimento dos questionários VRSQ e CSPQ;
- Aplicação dos eletrodos do BITalino e da pulseira Empatica E4;
- Período de repouso com duração de 3 minutos, durante o qual a Empatica E4 e o BITalino realizaram a leitura do EDA para verificar a linha de base do participante;

¹ <https://www.bitalino.com/storage/uploads/media/electrodermal-activity-eda-user-manual-810121207-810121208-810121252.pdf>

- Sessão de jogo, à escolha do usuário entre corrida e voo, com duração de cinco minutos, durante o qual a leitura do EDA também foi realizada. O experimento pode ser interrompido pelo participante em caso de *cybersickness* severo. A escolha do jogo é realizada pelo participante para que ele tenha a opção de escolher o jogo pelo qual tem mais preferência ou facilidade, evitando ruídos no sinal EDA gerados por baixa performance;
- Preenchimento do questionário VRSQ novamente, para verificar se houve e quais foram as alterações.

Os equipamentos necessários para a realização do experimento foram:

- A pulseira Empatica E4 apresentada na Figura 3.
- A plataforma BITalino apresentada na Figura 4 e um conector de dois eletrodos.
- O HMD HTC Vive apresentado na Figura 6.
- Um computador capaz de rodar as aplicações de realidade virtual.

As especificações técnicas do computador utilizado para o experimento são:

- Processador: Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU @ 2.80Ghz 4 núcleos 8 processadores lógicos.
- Memória: 16 GB.
- Placa de Vídeo: NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti.
- Armazenamento: SSD 255 GB (Crucial_CT275MX300SSD4).
- Sistema operacional: Windows 10 Pro Versão 22H2.
- Arquitetura: Sistema operacional de 64 bits, processador baseado em x64.
- Monitor: 1920 x 1080, 60,020 Hz.

4.2.1 Execução do experimento

A Figura 7 apresenta instâncias de execução do experimento. Nos quadros identificados com os número 1 e 2 é possível ver o simulador de voo e o simulador de corrida, respectivamente. O medidor destacado com um círculo branco em ambos os quadros apresenta o nível de *cybersickness* relatado pelo participante. O software possui reconhecimento de voz, de forma que o medidor é atualizado conforme o participante verbaliza os números



Figura 6 – HMD HTC Vive que foi utilizado no experimento.

de 0 à 3, de acordo com a severidade dos sintomas. Os participantes foram instruídos a enunciar o nível de *cybersickness* conforme determinassem que houve uma mudança, mas também foram lembrados a enunciar a cada minuto decorrido do experimento, certificando que quaisquer mudanças fossem gravadas corretamente.

No primeiro quadro é possível ver o simulador de voo descrito no Capítulo 3. O participante controla um pássaro que deve passar por aros distribuídos pelo cenário. A cada aro que o participante passa, a velocidade do pássaro aumenta.

No segundo quadro é possível ver o simulador de corrida. Diferente do simulador de voo, este jogo possui uma visão de primeira pessoa (o participante vê o ponto de vista do personagem) de dentro do carro. O jogador deve dar o maior número de voltas possível dentro do limite de tempo.

Os quadros 3 e 4 são exemplos do experimento em condução. No quadro 4 é possível ver o HMD com mais clareza. O jogo é espelhado na tela externa para que o pesquisador possa averiguar com mais facilidade em caso de erro.

4.3 Dados Obtidos

Após a execução dos experimentos descritos, foram obtidos vários dados para cada participante. Os dados obtidos são compostos por:

Os dados subjetivos, gerados pelo preenchimento do VRSQ acoplado aos jogos desenvolvidos. Um exemplo da saída obtida pelo preenchimento de um questionário VRSQ por um participante pode ser visto na Figura 8. O resultado é dividido em duas sessões A e B. A sessão A representa o estado do participante anterior à sessão de jogo, enquanto a sessão B representa o estado posterior. No exemplo em questão, o participante relatou maior desconforto geral, dor ocular, tontura e vertigem após a sessão de jogo.



Figura 7 – Experimento em execução utilizando os jogos desenvolvido por Porcino, Trevisan e Clua (2022)

Os dados de perfil e desempenho do jogo são gerados em um mesmo arquivo. Esse arquivo é formado por aproximadamente 300 instâncias do conjunto de dados apresentado na Figura 9, sendo uma instância gravada a cada segundo decorrido do experimento. Cada instância é composta pelos dados de perfil do participante, que permanecem iguais em todas as instâncias, e os dados de desempenho do jogo, que alteram de acordo com as ações do jogador durante a sessão. Além disso, o nível de desconforto relatado pelo jogador durante o jogo também é salvo neste arquivo.

Os dados objetivos ou fisiológicos foram gerados duas vezes, uma para cada um dos sensores. A Empatica E4 gera um arquivo .csv, enquanto o BITalino gera um arquivo .json. Ambos os arquivos são formados por centenas de instâncias da combinação Tempo- μ Siemens salvos durante o decorrer do experimento. Os instrumentos não salvam cada instância a cada segundo, como é o caso dos dados de desempenho do jogo, sendo a quantidade de instâncias salvas dependente da frequência do instrumento.

Todos os dados obtidos podem ser encontrados na plataforma GitHub ². Uma breve descrição sobre o tratamento dos dados para inserção no algoritmo de aprendizado de máquina será dada no Capítulo 5.

² https://github.com/murilo-dan/ML_CS_PREDICTOR_PYTHON-GOOGLE-COLAB/tree/main/COLETAS_RAW

```
1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <USERDATA>
3   <Session A="">
4     <GeneralDiscomfort>0</GeneralDiscomfort>
5     <Fatigue>0</Fatigue>
6     <EyeStraing>0</EyeStraing>
7     <DifficultyFocusing>0</DifficultyFocusing>
8     <Headache>0</Headache>
9     <FulnessOfHead>0</FulnessOfHead>
10    <BlurredVision>0</BlurredVision>
11    <DizzyEyesClosed>0</DizzyEyesClosed>
12    <Vertigo>0</Vertigo>
13  </Session>
14  <Session B="">
15    <GeneralDiscomfort>1</GeneralDiscomfort>
16    <Fatigue>0</Fatigue>
17    <EyeStraing>1</EyeStraing>
18    <DifficultyFocusing>1</DifficultyFocusing>
19    <Headache>0</Headache>
20    <FulnessOfHead>0</FulnessOfHead>
21    <BlurredVision>0</BlurredVision>
22    <DizzyEyesClosed>2</DizzyEyesClosed>
23    <Vertigo>2</Vertigo>
24  </Session>
25 </USERDATA>
```

Figura 8 – Exemplo dos dados obtidos com o preenchimento do VRSQ


```
1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <USERDATA>
3   <Data TimeStamp="0">
4     <UserGenre>feminino</UserGenre>
5     <UserAge>37 A 50</UserAge>
6     <UserExperience>ALGUMA</UserExperience>
7     <UserSymptoms>NENHUM</UserSymptoms>
8     <UserFlicker>NENHUM</UserFlicker>
9     <UserGlassesUse>SIM</UserGlassesUse>
10    <UserVisionProblems>MIOPIA</UserVisionProblems>
11    <UserPosture>SENTADO</UserPosture>
12    <UserEyeDominance>DIREITO</UserEyeDominance>
13    <StaticFrame>True</StaticFrame>
14    <HapticFeedback>False</HapticFeedback>
15    <DegreeOfControl>TOTAL</DegreeOfControl>
16    <DofSimulation>False</DofSimulation>
17    <Locomotion>False</Locomotion>
18    <CameraAutoMovement>False</CameraAutoMovement>
19    <RegionOfInterest>background</RegionOfInterest>
20    <TimeStamp>0</TimeStamp>
21    <CameraFieldOfView>111.8739</CameraFieldOfView>
22    <PlayerSpeed>0</PlayerSpeed>
23    <PlayerAcceleration>0</PlayerAcceleration>
24    <CameraRotationX>-0.0616913</CameraRotationX>
25    <CameraRotationY>0.9764859</CameraRotationY>
26    <CameraRotationZ>0.1802947</CameraRotationZ>
27    <PlayerPositionX>-59.98978</PlayerPositionX>
28    <PlayerPositionY>8.563305</PlayerPositionY>
29    <PlayerPositionZ>-66.94212</PlayerPositionZ>
30    <GameFps>68</GameFps>
31    <DiscomfortLevel>0</DiscomfortLevel>
32  </Data>
```

Figura 9 – Exemplo de dados de perfil e desempenho do jogo

5 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir da realização dos experimentos descritos no Capítulo 4. Aqui serão apresentados o procedimento de análise de dados, dificuldades encontradas durante o experimento e uma discussão sobre os resultados obtidos.

5.1 Processamento dos Dados

No total, foram coletados dados de 17 voluntários anônimos no decorrer do experimento, dos quais apenas 1 encerrou a experiência antes dos 5 minutos completos. Apesar de Sobral (2023) ter descartado os dados de participantes que encerraram o experimento prematuramente, para esta pesquisa foi decidido que eles serão mantidos, com o objetivo de analisar um caso onde houve *cybersickness* severo.

5.1.1 Dados descartados

Dentre os resultados obtidos, os dados dos participantes 1, 5, 11 e 12 foram descartados por erros de leitura em um ou ambos instrumentos de medição de EDA. No caso do participante 1, por exemplo, os valores lidos pela Empatica E4 apresentaram picos e quedas súbitas, não características de um sinal EDA padrão, como visto na Figura 10.

No caso dos participantes 1, 5, 11 e 12, a leitura do BITalino apresentou períodos de valor fixo por mais de 50% da duração da leitura, sem qualquer tipo de ruído ou flutuação. Isso ocorre quando o eletrodo perde contato com a superfície em que está

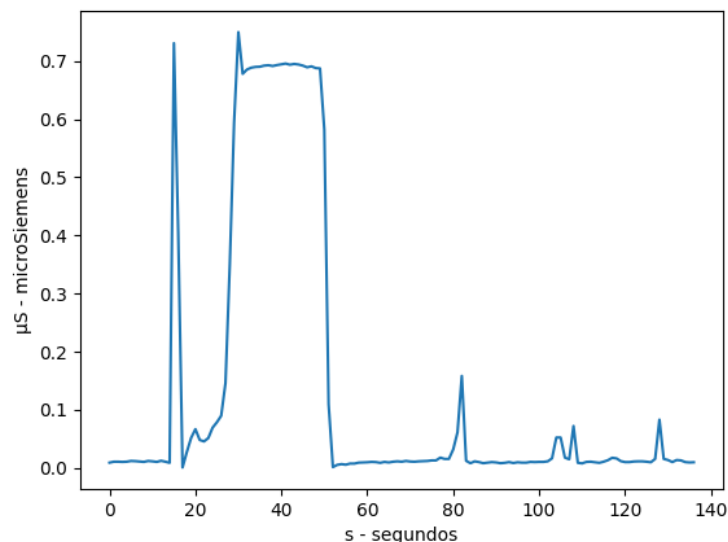


Figura 10 – Sinal lido pela Empatica E4 durante o período de repouso do participante 1.

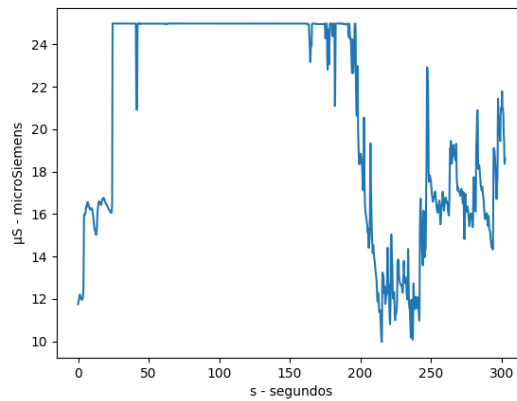


Figura 11 – Sinal lido pelo BITalino durante o período de jogo do participante 5

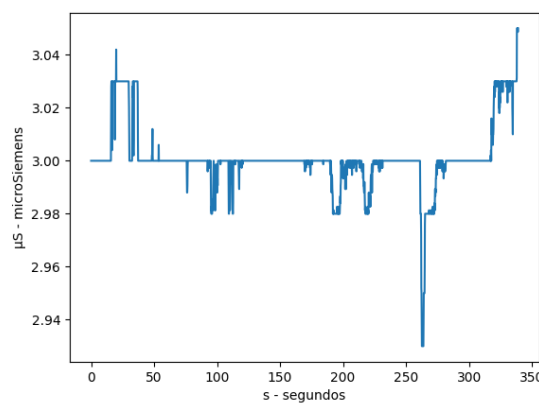


Figura 12 – Sinal lido pelo BITalino durante o período de jogo do participante 12

aplicado, ocorrendo o registro de um valor padrão. Exemplos das leituras em questão podem ser visualizadas nas Figuras 11 e 12.

Com isso, restaram 13 resultados considerados válidos para análise.

5.2 Análise dos Resultados

As tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos com o BITalino e a Empatica E4. Na tabela, a coluna variação de EDA foi calculada como a diferença entre a média do primeiro e último minuto da medição realizada durante o experimento. Aumentos menores que 1 μ Siemens foram considerados "Sem variação", dado que tais alterações menores podem ocorrer devido a picos fásicos não relacionados ao experimento, sendo considerados ruídos na medição.

A utilização da média serve como uma aproximação do sinal SCL tônico, que representa uma alteração lenta ao longo do tempo. Conforme explicado no Capítulo 2, um aumento no SCL tônico do EDA é indicativo de *cybersickness*.

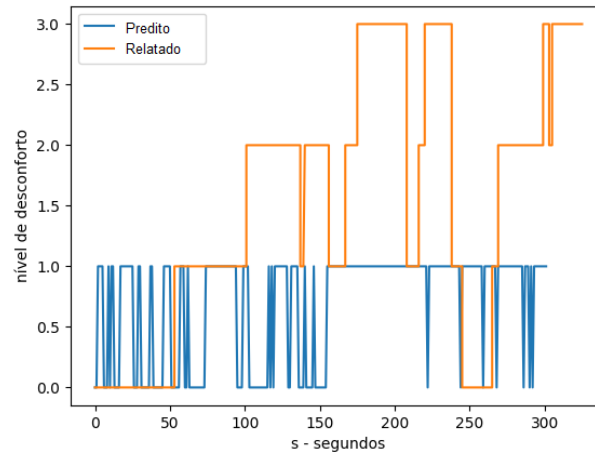


Figura 13 – Nível de *cybersickness* medido e calculado do participante 10.

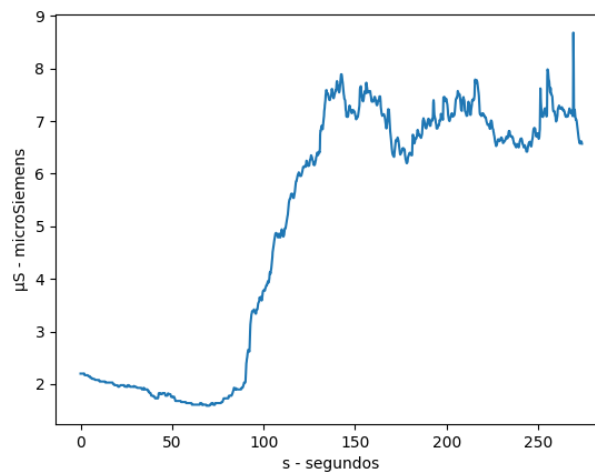


Figura 14 – Sinal EDA do participante 10 durante o período de experimento.

As colunas desconforto medido e desconforto calculado são dependentes da variação de EDA. A leitura será considerada coerente quando o desconforto medido ou calculado acusam aumento no nível de *cybersickness* por mais de 50% do tempo do experimento, ao mesmo tempo que a variação de EDA indica um aumento. Caso contrário, será marcado como incoerente.

Por exemplo, o participante 10 apresentou nível de *cybersickness* maior que 1 durante mais de 50% do tempo do experimento, conforme mostra a Figura 13, tanto no desconforto relatado durante o experimento, quanto no desconforto predito pelo aprendizado de máquina. Já na Figura 14, é possível verificar uma média de 2 μ Siemens durante o primeiro minuto e uma média de 7,5 μ Siemens no último minuto, resultando em um aumento de 5,5 μ Siemens com o uso do BITalino. Dessa forma, o nível de *cybersickness* medido e calculado é coerente com o sinal EDA obtido.

Analisando os resultados do BITalino, pode-se obter: 76,92% (10 casos) de coerência do EDA com o desconforto medido/relatado pelo participante; 69,23% (9 casos) de coerência do EDA com o desconforto calculado pelo aprendizado de máquina; 53,84% (7

Usuário	Variação EDA	Desconforto medido	Desconforto calculado
1	Descartado	Descartado	Descartado
2	Sem variação	Incoerente	Incoerente
3	+8 μ S	Coerente	Coerente
4	+6,5 μ S	Coerente	Coerente
5	Descartado	Descartado	Descartado
6	Sem variação	Coerente	Incoerente
7	+2 μ S	Coerente	Coerente
8	Sem variação	Coerente	Incoerente
9	Sem variação	Coerente	Incoerente
10	+5,5 μ S	Coerente	Coerente
11	Descartado	Descartado	Descartado
12	Descartado	Descartado	Descartado
13	+8 μ S	Coerente	Coerente
14	Sem variação	Incoerente	Coerente
15	Sem variação	Coerente	Coerente
16	+4 μ S	Incoerente	Coerente
17	+8 μ S	Coerente	Coerente

Tabela 1 – Tabela comparativa de resultados do BITalino.

casos) de coerência do EDA tanto com o desconforto medido quanto com o desconforto calculado.

Analisando os resultados da Empatica E4, pode-se obter: 69,23% (9 casos) de coerência do EDA com o desconforto medido/relatado pelo participante; 61,53% (8 casos) de coerência do EDA com o desconforto calculado pelo aprendizado de máquina; 46,15%

Usuário	Variação EDA	Desconforto medido	Desconforto calculado
1	Descartado	Descartado	Descartado
2	+5 μ S	Coerente	Coerente
3	+1 μ S	Coerente	Coerente
4	Sem variação	Incoerente	Incoerente
5	Descartado	Descartado	Descartado
6	+4 μ S	Incoerente	Coerente
7	+1 μ S	Coerente	Coerente
8	+8 μ S	Incoerente	Coerente
9	Sem variação	Coerente	Incoerente
10	+18 μ S	Coerente	Coerente
11	Descartado	Descartado	Descartado
12	Descartado	Descartado	Descartado
13	+3 μ S	Coerente	Coerente
14	+7,5 μ S	Coerente	Incoerente
15	+6 μ S	Incoerente	Incoerente
16	Sem variação	Coerente	Incoerente
17	+5 μ S	Coerente	Coerente

Tabela 2 – Tabela comparativa de resultados da Empatica E4.

(6 casos) de coerência do EDA tanto com o desconforto medido quanto com o desconforto calculado.

5.3 Discussão dos Resultados

Comparando em termos absolutos, os valores lidos pelo BITalino apresentaram coerência com o nível de *cybersickness* em uma maior porcentagem das vezes. No entanto,

é importante notar que dentre os 4 conjuntos de dados descartados, o BITalino apresentou problemas de leitura em todos eles, enquanto a Empatica E4 apresentou problemas de leitura em somente um.

Mais detalhadamente, levando em consideração os pontos de análise levantados no Capítulo 4.1, é possível apontar as seguintes observações:

- **Qualidade do sinal:** para a análise do sinal EDA, a resolução do sinal é importante para melhor distinção dos pulsos SCR fásicos, caracterizados por um pico rápido e pequeno causado por algum estímulo momentâneo. Por outro lado, para a análise de EDA em conjunto com *cybersickness* no contexto desta pesquisa, o sinal SCL tônico, de mudança lenta e gradual, apresenta mais relevância. Desta forma, a maior resolução oferecida pelo BITalino, apesar de útil quando se deseja analisar os pulsos SCR fásicos, não é ponto determinante para a análise dos resultados obtidos nesta pesquisa;
- **Resistência à falhas:** a Empatica E4 apresentou mais resistência à falhas, gerando erros de leitura impeditivos em somente 1 caso. O BITalino, por sua vez, apresentou erros de leitura impeditivos em 4 casos. Tal diferença pode ser explicada pelo nível de usabilidade e complexidade entre os dois instrumentos, características discutidas com mais detalhes na sequência;
- **Usabilidade:** por parte dos participantes, o BITalino foi o instrumento preferido, quando considerado somente a leitura de EDA, que é não intrusiva. Três dos participantes relataram desconforto ao usar a pulseira, uma vez que ela deve ser apertada o máximo possível para garantir contato dos eletrodos com a pele. Por outro lado, os sensores de EDA do BITalino são de fácil aplicação e remoção. No entanto, a maior incidência de erros na leitura do BITalino se deve justamente à isso. Com os eletrodos posicionados na palma da mão, eles estão sujeitos à se soltarem devido ao suor intenso ou movimentações bruscas ao usar o controle;
- **Congruência com a predição:** neste ponto, realizando uma análise em termos absolutos, o BITalino apresentou mais coerência entre o sinal EDA lido e o nível de *cybersickness* medido e calculado. É possível que a maior precisão do BITalino esteja relacionada com o posicionamento dos eletrodos. Conforme descrito no Capítulo 2.4.2, a palma da mão é mais indicada para pesquisas sobre *cybersickness* do que o pulso, devido à maior presença de glândulas sudoríparas.

Dessa forma, o BITalino apresenta vantagens únicas e que podem ser diferenciais para oferecer uma análise mais precisa. No entanto, ele exige mais atenção e cuidado no planejamento e condução do experimento para mitigar a incidência de erros. Um

alternativa seria a utilização de um controle de mão única, possibilitando a aplicação dos eletrodos na mão não dominante e reduzindo os ruídos causados por movimentação.

Quanto aos resultados gerais obtidos por ambos os sensores, os resultados alcançados são semelhantes aos de [Sobral \(2023\)](#), reforçando a validade da utilização de dados fisiológicos, como o EDA, em pesquisas sobre *cybersickness*.

6 Conclusão

Esta pesquisa realizou uma análise comparatória entre dois instrumentos de medição da Atividade Eletrodérmica em um cenário de incidência de *cybersickness*. Os instrumentos comparados foram o BITalino (r)evolution e a Empatica E4. Para a obtenção dos dados utilizados para a análise, foi realizado um experimento com duração de cinco minutos no qual os participantes passaram por uma sessão de jogo de Realidade Virtual utilizando um *Head Mounted Display*.

Os dados foram utilizados no algoritmo de aprendizado de máquina desenvolvido por [Porcino, Trevisan e Clua \(2022\)](#) com o objetivo de validar a utilização de bio-sinais na pesquisa de *cybersickness* ao realizar a comparação entre os sinais lidos e o *output* do algoritmo supracitado.

No total, participaram do experimento 17 voluntários, dos quais 4 foram descartados para análise por erros de leitura. Para o BITalino, foi encontrada uma coerência de 76,92% com o nível de *cybersickness* medido, 69,23% com o nível de *cybersickness* calculado e 53,84% de coerência com ambos simultaneamente. Para a Empatica E4, os valores de coerência encontrados foram de 69,23%, 61,53% e 46,15%, respectivamente.

Em uma análise por termos absolutos, o BITalino parece oferecer uma análise mais precisa. No entanto, foram notadas algumas dificuldades na usabilidade do BITalino que podem impactar negativamente as leituras. A recomendação é que estudos futuros utilizando o BITalino tenham cuidado extra no planejamento e condução dos experimentos quanto à aplicação dos eletrodos e manutenção do equipamento.

6.1 Trabalhos Futuros

- Uma das limitações deste estudo foi o tempo de duração do experimento. O sinal SCL tônico, fundamental para a análise de *cybersickness*, é caracterizado por uma mudança lenta e gradual ao longo do tempo. Períodos de exposição mais longos, portanto, podem oferecer dados mais precisos sobre a relação entre alterações no EDA tônico e *cybersickness*. Recomenda-se a utilização de um período igual ou superior à 10 minutos.
- Para estudos que utilizarem o BITalino, deve-se considerar com cuidado o local de aplicação dos sensores. Para este estudo, a aplicação dos sensores na palma da mão causou uma série de erros de leitura no decorrer das medições, principalmente devido à movimentações bruscas durante a sessão de jogo. Idealmente, os sensores devem ser aplicados na mão não dominante e o jogo deve ser jogável com um controle

de mão única, de forma a reduzir o máximo possível quaisquer perturbações nos sensores.

- Para este estudo, as leituras foram sincronizadas manualmente e tiveram que passar por tratamento posterior, aumentando a complexidade e reduzindo a precisão dos resultados. O desenvolvimento de um software que possibilite a sincronização automática entre os diferentes instrumentos utilizados é de grande interesse.
- Utilizar outros biossinais para realizar a comparação. Tanto a pulseira Empatica E4, quanto o BITalino, além do EDA, também capturam a taxa de variação cardíaca. Uma segunda variável de comparação seria benéfica para a análise geral.
- Utilizar de instrumentos mais atualizados. A Empatica E4, por exemplo, já possui uma versão atualizada e com mais funcionalidades chamada EmbracePlus. É possível que esta nova versão já corrija alguns dos problemas encontrados na Empatica E4 durante a realização desta pesquisa.

Referências

- BATISTA, D. et al. Benchmarking of the bitalino biomedical toolkit against an established gold standard. *Healthcare Technology Letters*, v. 6, n. 2, p. 32–36, 2019. Disponível em: <<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/htl.2018.5037>>. Citado na página 28.
- BOUCSEIN, W. et al. Publication recommendations for electrodermal measurements. *Psychophysiology*, v. 49, p. 1017–34, 08 2012. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 28.
- BRAITHWAITE, J. J. et al. Guide for analysing electrodermal activity & skin conductance responses for psychological experiments. *CTIT technical reports series*, 2013. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:112717780>>. Citado 5 vezes nas páginas 22, 23, 24, 26 e 28.
- BROWN, E.; CAIRNS, P. A grounded investigation of game immersion. In: *CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2004. (CHI EA '04), p. 1297–1300. ISBN 1581137036. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/985921.986048>>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- BURDEA, G.; COIFFET, P. *Virtual Reality Technology*. John Wiley & Sons, 2003. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=0xWgPZbcz4AC>>. Citado na página 14.
- CHANG, E.; KIM, H.-T.; YOO, B. Virtual reality sickness: A review of causes and measurements. *International Journal of Human-Computer Interaction*, v. 36, p. 1–25, 07 2020. Citado na página 20.
- DENNISON, M. S.; WISTI, A. Z.; D'ZMURA, M. Use of physiological signals to predict cybersickness. *Displays*, v. 44, p. 42–52, 2016. ISSN 0141-9382. Contains Special Issue Articles – Proceedings of the 4th Symposium on Liquid Crystal Photonics (SLCP 2015). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141938216301081>>. Citado na página 23.
- GARCIA-AGUNDEZ, A. et al. Identifying cybersickness through heart rate variability alterations. *International Journal of Virtual Reality*, v. 19, n. 1, p. 1–10, Jan. 2019. Disponível em: <<https://ijvr.eu/article/view/2907>>. Citado na página 21.
- GAVGANI, A. M. et al. Profiling subjective symptoms and autonomic changes associated with cybersickness. *Autonomic Neuroscience*, v. 203, p. 41–50, 2017. ISSN 1566-0702. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566070216301096>>. Citado na página 23.
- GERŠAK, G. Electrodermal activity - a beginner's guide. *Elektrotehnikski Vestnik/Electrotechnical Review*, v. 87, p. 175–182, 01 2020. Citado 6 vezes nas páginas 6, 23, 24, 26, 28 e 34.

- ISLAM, R.; ANG, S.; QUARLES, J. Cybersense: A closed-loop framework to detect cybersickness severity and adaptively apply reduction techniques. p. 148–155, 2021. Citado na página 28.
- KENNEDY NORMAN E. LANE, K. S. B. R. S.; LILIENTHAL, M. G. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, Taylor Francis, v. 3, n. 3, p. 203–220, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3>. Citado na página 19.
- KIM, H. K. et al. Virtual reality sickness questionnaire (vrsq): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied Ergonomics*, v. 69, p. 66–73, 2018. ISSN 0003-6870. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000368701730282X>>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 19 e 54.
- KIM, J. et al. A deep cybersickness predictor based on brain signal analysis for virtual reality contents. p. 10579–10588, 2019. Citado na página 28.
- KIM, Y. et al. The application of biosignal feedback for reducing cybersickness from exposure to a virtual environment. *Presence Teleoperators amp Virtual Environments*, v. 17, p. 1–16, 02 2008. Citado na página 24.
- KIM, Y. et al. Characteristic changes in the physiological components of cybersickness. *Psychophysiology*, v. 42, p. 616–25, 10 2005. Citado na página 21.
- KOLASINSKI, E. M. Simulator sickness in virtual environments. *Technical Report, DTIC Document*, 1995. Citado na página 20.
- LAVIOLA, J. J. A discussion of cybersickness in virtual environments. *SIGCHI Bull.*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 32, n. 1, p. 47–56, jan 2000. ISSN 0736-6906. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/333329.333344>>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 17 e 18.
- LIN, C.-T. et al. Eeg effects of motion sickness induced in a dynamic virtual reality environment. *Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference*, v. 2007, p. 3872–5, 02 2007. Citado na página 21.
- MENG, X.; DU, R.; VARSHNEY, A. Eye-dominance-guided foveated rendering. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, PP, p. 1–1, 02 2020. Citado na página 20.
- MOUSAVI, M.; JEN, Y. H.; MUSA, S. N. B. A review on cybersickness and usability in virtual environments. In: *Current Trends in Ergonomics*. [S.l.]: Trans Tech Publications Ltd, 2013. (Advanced Engineering Forum, v. 10), p. 34–39. Citado na página 18.
- OLLANDER, S. et al. A comparison of wearable and stationary sensors for stress detection. p. 004362–004366, Oct 2016. Citado na página 26.
- PORCINO, T.; TREVISAN, D.; CLUA, E. A cybersickness review: causes, strategies, and classification methods. *Journal on Interactive Systems*, v. 12, n. 1, p. 269–282, Nov. 2021. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/journals/index.php/jis/article/view/2058>>. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.

- PORCINO, T.; TREVISAN, D.; CLUA, E. Cybersickness analysis using symbolic machine learning algorithms. SBC, Porto Alegre, RS, Brasil, p. 51–60, 2022. ISSN 2763-8820. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/ctd/article/view/20781>>. Citado 10 vezes nas páginas 6, 7, 29, 30, 31, 33, 34, 38, 48 e 55.
- RAGOT, M. et al. Emotion recognition using physiological signals: Laboratory vs. wearable sensors. 2017. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:57555357>>. Citado na página 26.
- SEVINC, V.; BERKMAN, M. Psychometric evaluation of simulator sickness questionnaire and its variants as a measure of cybersickness in consumer virtual environments. *Applied ergonomics*, v. 82, p. 102958, 09 2019. Citado na página 20.
- SOBRAL, F. Identificando a cybersickness: combinação da atividade eletrodérmica e aprendizado de máquina simbólico. *Departamento de Ciência da Computação - UnB*, 2023. Citado 5 vezes nas páginas 31, 33, 34, 41 e 47.
- WALSH, K.; PAWLOWSKI, S. Virtual reality: A technology in need of is research. *Communications of the Association for Information Systems*, v. 8, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 14.
- WOHLGENANT, I.; SIMONS, A.; STIEGLITZ, S. Virtual reality. *Business Information and Systems Engineering*, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 15.
- YAN, Y. et al. The effects of weight on comfort of virtual reality devices. In: _____. [S.l.: s.n.], 2019. p. 239–248. ISBN 978-3-319-94705-1. Citado na página 20.
- YANG, Y. et al. Effects of social interaction on virtual reality cybersickness. *Displays*, v. 80, p. 102512, 2023. ISSN 0141-9382. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141938223001452>>. Citado na página 23.

Anexos

ANEXO A – Virtual Reality Sickness Questionnaire - VRSQ

Desconforto geral	Nenhum	Leve	Moderado	Severo
Fadiga (cansaço)	Nenhum	Leve	Moderado	Severo
Fadiga ocular	Nenhum	Leve	Moderado	Severo
Concentração	Nenhum	Leve	Moderado	Severo
Dor de cabeça	Nenhum	Leve	Moderado	Severo
"Cabeça pesada"	Nenhum	Leve	Moderado	Severo
Visão embaçada	Nenhum	Leve	Moderado	Severo
Tontura (olhos fechados)	Nenhum	Leve	Moderado	Severo
Vertigem	Nenhum	Leve	Moderado	Severo

Tabela 3 – Exemplo do VRSQ adaptado para o português utilizado durante o experimento. Fonte: [Kim et al. \(2018\)](#)

ANEXO B – Cybersickness Profile Questionnaire - CSPQ

Gênero	Masculino	Feminino		
Faixa etária	18 à 36	37 à 50	50+	
Frequência de uso de RV	Nenhuma	Alguma	Muita	
Nível de desconforto atual	Nenhum	Algum	Muito	
Usa óculos	Sim	Não		
Algum problema de visão	Nenhum	Miopia	Hipermetropia	Astigmatismo
Desconforto com telas	Nenhum	Algum	Muito	
Olho dominante	Esquerdo	Direito		
Como vai jogar	Sentado	Em pé		

Tabela 4 – Exemplo do CSPQ adaptado para o português utilizado durante o experimento. Fonte: [Porcino, Trevisan e Clua \(2022\)](#)