



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Instituto de Matemática e Estatística

Vitor Balbio da Silva

Uma Abordagem para Análise e Monitoramento de Simulator Sickness em
Ambientes de Realidade Virtual

Rio de Janeiro

2017

Vitor Balbio da Silva

**Uma Abordagem para Análise e Monitoramento de Simulator Sickness em
Ambientes de Realidade Virtual**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Computacionais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof.^a Dra Rosa Maria E. Moreira Da Costa

Coorientador: Prof Dr. Alexandre Da Costa Sena

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC-A

S586 Silva, Vitor Balbio da.
Uma abordagem para análise e monitoramento de simulador sickness em ambientes de realidade virtual/ Vitor Balbio da Silva. – 2016..
81f. : il.

Orientadora: Rosa Maria Esteves Moreira da Costa
Coorientador: Alexandre da Costa Sena
Dissertação (Mestrado em Ciências Computacionais) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Matemática e Estatística.

1. Realidade virtual - Teses. 2. Simulação (Computadores) - Teses. I. Costa, Rosa Maria Esteves Moreira da. II. Sena, Alexandre da Costa. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Matemática e Estatística. IV. Título.

CDU 004.946

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Vitor Balbio da Silva

**Uma Abordagem para Análise e Monitoramento de Simulator Sickness em
Ambientes de Realidade Virtual**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós Graduação em Ciências Computacionais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 20 de Junho de 2017.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dra. Rosa Maria E. M. da Costa

Instituto de Matemática e Estatística - UERJ

Prof. Dr. Alexandre da Costa Sena

Instituto de Matemática e Estatística - UERJ

Prof. Dr. Esteban Walter Gonzalez Clua

Instituto de Computação - UFF

Prof. Dr. Gilson Alexandre O. Pedro da Costa

Instituto de Matemática e Estatística - UERJ

Prof Dr. Ricardo Guerra Marroquim

Departamento de Ciência da Computação - UFRJ

Rio de Janeiro

2017

RESUMO

SILVA, Vitor Balbio da. Uma Abordagem para Análise e Monitoramento de Simulator Sickness em Ambientes de Realidade Virtual. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Computacionais) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

Apesar dos recentes avanços dos HMDs (Head Mounted Displays) de Realidade Virtual e o lançamento de diversos desses dispositivos no mercado internacional, muitos desafios ainda persistem para introduzir essa tecnologia ao público em geral de forma segura, principalmente, devido a efeitos fisiológicos adversos que a utilização desses dispositivos podem causar como: desconforto, vertigem, fadiga visual e mais comumente náuseas, sintomas de um efeito conhecido como Simulator Sickness. Diante desse cenário, o objetivo desta dissertação é apresentar um sistema de análise e monitoramento da Simulator Sickness que auxilie no desenvolvimento de aplicações em realidade virtual mais seguras e ergonômicas, características imprescindíveis para a inserção da tecnologia para o público em geral. A SSA (Simulator Sickness Analyser) opera em tempo real apre-sentando o nível de cinetose estimada, causada pela aplicação e utilizando um modelo matemático-computacional da Simulator Sickness baseado na teoria RST. A ferramenta oferece funcionalidades que permitem uma melhor compreensão, em tempo de produção, da experiência imersiva do usuário final. Para validar o modelo e o sistema foi realizado um experimento com seis participantes que testaram 5 ambientes virtuais além de responderem a um questionário para identificar efeitos de Simulator Sickness. Os resultados obtidos confirmaram as previsões dos modelos teóricos adotados pelo modelo computacio-nal bem como indicam a capacidade da ferramenta para identificar ambientes que possuem alto potencial de gerar sintomas associados a Simulator Sickness.

Palavras-chave: Realidade Virtual. Simulator Sickness. HMD. Ferramentas de Análise.

ABSTRACT

SILVA, Vitor Balbio da. An approach for Analysis and Monitoring of Simulator Sickness in Virtual Reality Ambient. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Computacionais) - Instituto de Matemática e Estatística, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

Despite the recent advances in Virtual Reality Head Mounted Displays (HMDs) and the release of several of these devices in the international market, many challenges still persist to introduce this technology to the public in a safe way, mainly due to adverse physiological effects that those devices can cause such as: discomfort, vertigo, visual fatigue and more commonly nausea, symptoms of an effect known as Simulator Sickness. The goal of this dissertation is to present a system of analysis and monitoring of Simulator Sickness that could help in the development of safer and more ergonomic virtual reality applications, essential characteristics for the insertion of technology to the general public. The SSA (Simulator Sickness Analyzer) operates in real-time by presenting the estimated level of motion caused by the application and using a mathematical-computational Simulator Sickness model based on the RST theory. The tool offers functionalities that allow a better understanding, in production time, of the immersive experience of the final user. To validate the model and the system an experiment was carried out with six participants who tested 5 virtual environments in addition to answering a questionnaire to identify effects of Simulator Sickness. The results obtained confirmed the predictions of the theoretical models adopted by the computational model as well as indicate the ability of the tool to identify environments that have high potential to generate symptoms associated with Simulator Sickness.

Keywords: Virtual Reality. Simulator Sickness. HMD. Analysis Tool

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Resumo do Trabalho	9
Figura 2 - Contínuo de Virtualidade.	12
Figura 3 - Diagrama de Funcionamento	14
Figura 4 - Tabela comparativa entre diversos HMDs de realidade virtual e seus sistemas	16
Figura 5 - Motion Sickness	20
Figura 6 - Diagrama da Motion Sickness	24
Figura 7 - Rest Frame Motion Sickness	25
Figura 8 - Rest Frame Motion Sickness	26
Figura 9 - Espectro da Simulator Sickness em HMDs de Realidade Virtual	26
Figura 10 - <i>Motion Sickness</i> em HMDs	28
Figura 11 - Modelo Simulator Sickness	29
Figura 12 - Curva In Out Cúbica	31
Figura 13 - Dissociação discreta	33
Figura 14 - Testes de Filtros	34
Figura 15 - <i>SSA - Simulator Sickness Analyser</i>	40
Figura 16 - <i>SSA - Simulator Sickness Analyser</i>	41
Figura 17 - <i>SSA - Simulator Sickness Analyser</i>	42
Figura 18 - Dados de Aceleração Linear e Angular	44
Figura 19 - Dados de Dissociação	45
Figura 20 - Dados de Simulator Sickness	46
Figura 21 - Dados Exportados para excel	47
Figura 22 - BoboVR	51
Figura 23 - Optitrack	52
Figura 24 - Imagem da cena do experimento de locomoção com Teletransporte	56
Figura 25 - Experimento Locomoção com <i>Joystick</i> e <i>Positional Tracking</i>	56
Figura 26 - <i>Positional Tracking</i>	58
Figura 27 - Resultado médio do questionário SSQ	59
Figura 28 - Experimento teletransporte	60
Figura 29 - Experimento <i>Joystick</i>	60
Figura 30 - Experimento <i>Positional Tracking</i>	61
Figura 31 - Experimento <i>Positional Tracking</i>	62
Figura 32 - Experimento Teletransporte	62
Figura 33 - Experimento <i>Joystick</i>	63
Figura 34 - Resultados Finais do experimento de locomoção	64
Figura 35 - Experimento Sem Locomoção - <i>Hit Target</i>	66

Figura 36 - Experimento Hit Target Sem Locomoção	67
Figura 37 - Médias dos resultados do questionário SSQ	68
Figura 38 - Experimento Hit Target Sem Locomoção	68
Figura 39 - Experimento Hit Target com Latência	70
Figura 40 - Resultado médio do questionário SSQ	70
Figura 41 - Experimento Hit Target com Latência	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARPA	Advanced Research Projects Agency
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment
CRT	Cathode Ray Tube
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
HMD	Head Mounted Display
IMU	Inertial Motion Unity
IPD	Interpupil Distance
MEMS	Microeletromecanic System
SRT	Sensory Rearrangement Theory

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	8
1	A REALIDADE VIRTUAL	10
1.1	Definição	10
1.2	Funcionamento dos HMDs modernos	13
1.3	Análise Comparativa entre Plataformas e Dispositivos de Realidade Virtual	16
2	<i>SIMULATOR SICKNESS</i> EM AMBIENTES DE REALIDADE VIRTUAL	18
2.1	Sintomas e Causas da Simulator Sickness	19
3	UMA PROPOSTA DE MODELAGEM PARA <i>SIMULATOR SICKNESS</i> EM HMDS DE REALIDADE VIRTUAL	23
3.1	Trabalhos Relacionados	23
3.2	Modelando a <i>Simulator Sickness</i> em HMDs de Realidade Virtual	23
4	FERRAMENTA DE ANÁLISE E MONITORAMENTO DA <i>SIMULATOR SICKNESS</i>	37
4.1	Detecção e Medição de <i>Simulator Sickness</i>	37
4.1.1	<u>Avaliação usando questionários</u>	37
4.1.2	<u>Avaliação usando a análise de instabilidade postural</u>	38
4.1.3	<u>Avaliação usando a análise de estados fisiológicos</u>	38
4.1.4	<u>Uma nova proposta para avaliação de Simulator Sickness</u>	39
4.2	Ferramenta de Análise da <i>Simulator Sickness</i> em HMDs de realidade virtual	39
4.2.1	<u>Arquitetura</u>	41
4.2.2	<u>Dados Raw Angulares e Lineares</u>	43
4.2.3	<u>Dados de Dissociação</u>	43
4.2.4	<u>Dados de Simulator Sickness</u>	44
4.2.5	<u>Utilização em um Ambiente de Produção</u>	46
5	AVALIAÇÃO DO SSA EM UM AMBIENTE EXPERIMENTAL	48
5.1	Pré-teste	48
5.2	Protocolo de Calibração	49
5.2.1	<u>Aceleração Linear do Avatar</u>	49
5.2.2	<u>Aceleração Linear do Usuário</u>	50
5.2.3	<u>Aceleração Angular do Usuário</u>	50
5.2.4	<u>Aceleração Angular do Avatar</u>	50
5.2.5	<u>Aumento de sensibilidade</u>	50
5.3	Experimentos	51

5.3.1	<u>Avaliação de dissociação em modelos de locomoção</u>	54
5.3.1.1	Metodologia	55
5.3.1.2	Análise dos resultados	59
5.3.2	<u>Avaliação de Aplicações sem Locomoção</u>	65
5.3.2.1	Metodologia	66
5.3.2.2	Análise de Resultados	67
5.3.3	<u>Avaliação de Latência</u>	68
5.3.3.1	Metodologia	69
5.3.3.2	Avaliação dos Resultados	70
	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS	75
	ANEXO A - Formulário de Coleta de Dados	80
	ANEXO B - Termo De Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE)	81

INTRODUÇÃO

As fundações para construção de equipamentos de realidade virtual não são novas, remontando à década de 40 do século passado mas, somente nos últimos anos, as tecnologias necessárias para a produção de HMDs¹ de realidade virtual se tornaram acessíveis para o desenvolvimento de sistemas para o consumidor doméstico, alguns chegando a custar menos de \$100,00 dólares (ROBERTSON, 2016). Esse fenômeno reacendeu em entusiastas a idealização do uso popular desses sistemas, que antes só eram acessíveis para o meio acadêmico e de pesquisa.

Por outro lado, a demanda dos consumidores por conteúdo (aplicativos, vídeos, jogos, entre outros) para esses dispositivos requer atenção. Efeitos adversos como náuseas, tontura, desconforto visual e outros são comuns durante a utilização de dispositivos de realidade virtual, sintomas de um efeito conhecido como *Simulator Sickness* (FANG et al., 2015; KIRYU; SO, 2007; SOLOMON, 2014). Esses sintomas são causados não só devido as limitações de hardware de dispositivos de baixo custo, mas também, pela falta de um controle mais rigoroso na implementação dessas aplicações, visando minimizar esses efeitos adversos.

Atualmente, a avaliação da *Simulator Sickness* causada por aplicações é realizada comumente, por meio de comunicações e relatos informais, questionários como o SSQ (*Simulator Sickness Questionary*) (KENNEDY et al., 1993). A avaliação pode ser feita também, usando os resultados da análise indireta de sinais fisiológicos, como pressão arterial (intervalo RR) e batimentos cardíacos, sendo que nestes casos, são necessários equipamentos e conhecimentos externos à área computacional e de desenvolvimento de software (KIRYU et al., 2007).

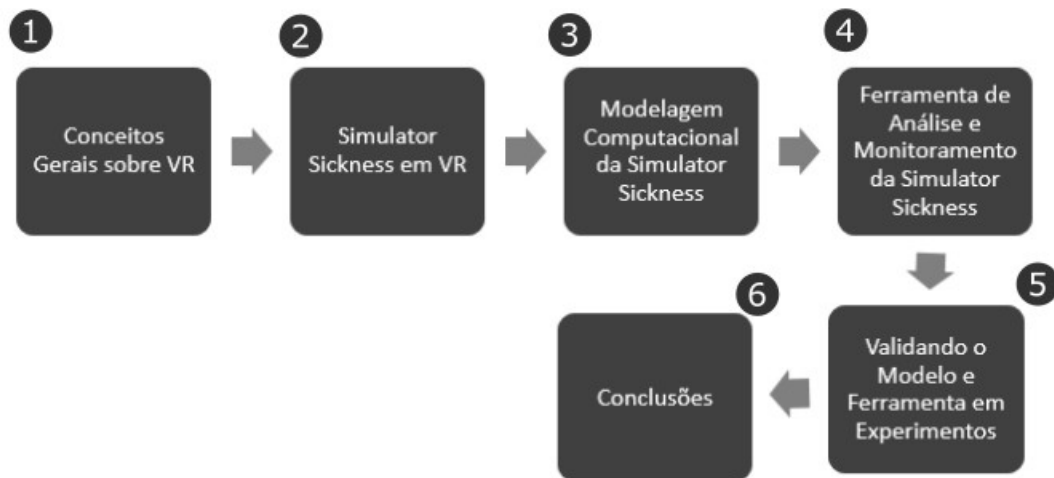
Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é apresentar uma abordagem para análise e monitoramento da *Simulator Sickness* em Ambientes de Realidade Virtual, que apresente em tempo real uma estimativa do potencial de geração de *Simulator Sickness*, permitindo aos desenvolvedores identificar em tempo de produção e testes primários, as mecânicas e elementos que não estão em conformidade com padrões de segurança, considerando diferentes perfis de usuários. Para isso, inicialmente, foi desenvolvido um modelo matemático-computacional para medir a *Simulator Sickness* baseado na teoria RST. A partir desse modelo, foi proposta e implementada uma ferramenta para avaliar e monitorar a *Simulator Sickness* em tempo real: a Simulator Sickness Analyser - SSA.

¹ HMDs ou *Head Mounted Displays* são dispositivos de realidade virtual onde são projetados imagens estereoscópicas de forma a produzir a sensação de imersão. Podem ou não vir também integrados com sistemas sensoriais como acelerômetros para captação dos movimentos do usuário. Uma descrição mais detalhadas dos HMDs será apresentado no capítulo x

Resultados obtidos em experimentos com voluntários, em cenários que simulam modelos de locomoção em realidade virtual e cenários sem locomoção, indicaram um alto grau de correspondência (acima de 90%) entre os resultados obtidos pelo SSA e a percepção dos usuários sobre os efeitos da *Simulator Sickness* informados por meio dos questionários SSQ.

A figura 1 apresenta um fluxograma com o resumo desse trabalho. No Capítulo 1 são apresentados conceitos gerais sobre a realidade virtual e funcionamento dos HMDs modernos. Em seguida, no Capítulo 2 é introduzido o tema da *Simulator Sickness* e seus efeitos em ambientes de realidade virtual, assim como, a importância desses temas para o desenvolvimento da tecnologia e sua adoção em massa. No Capítulo 3 é apresentada uma proposta de modelagem computacional para a *Simulator Sickness*. No Capítulo 4 é descrita a ferramenta de análise e monitoramento da *Simulator Sickness*. O Capítulo 5 apresenta os resultados dos experimentos realizados para validação do modelo computacional e da ferramenta. Por fim, apresentamos as conclusões deste trabalho, seguidas pelas referências e apêndices.

Figura 1 - Resumo do Trabalho



A seguir é apresentado um resumo das principais contribuições deste trabalho:

- Uma análise das diversas teorias e modelos da *Simulator Sickness*;
- Elaboração de um modelo Matemático/Computacional da *Simulator Sickness* em ambientes de realidade virtual;
- Desenvolvimento de uma ferramenta de análise de *Simulator Sickness* para aplicações de realidade virtual com HMDs.

Uma etapa preliminar do desenvolvimento deste trabalho foi publicada na SBGames 2016 - Silva et al. (2016).

1 A REALIDADE VIRTUAL

O objetivo desse capítulo é a conceitualização da Realidade Virtual como objeto de pesquisa, apresentando definições, equipamentos e o estado da arte da tecnologia.

1.1 Definição

Na busca de uma definição de "realidade virtual" que nos atenda, uma primeira consulta ao dicionário não é satisfatória. A divisão do termo em seus radicais: realidade - "O que existe realmente" e virtual - "O que é feito ou simulado através de meios eletrônicos." (FERREIRA, 2010) sugere uma realidade simulada por meio eletrônico, uma definição vaga para nosso uso e longe do estado da arte da tecnologia. De fato, a expressão "realidade virtual" possui uma gama de significados, variando conforme a área de interesse pelo qual se analisa o seu conceito. Uma definição de referência no segmento é a de Rheingold (1991) que define a realidade virtual como sendo o ambiente em que o indivíduo está imerso em um ambiente tridimensional gerado por computador e lhe é permitido se mover pelo ambiente virtual vendo sobre diferentes ângulos, interagindo com elementos e modificando-os. (RHEINGOLD, 1991)

Entretanto, as especificidades técnicas do que é definido como realidade virtual tornam essas definições muito restritas para a quantidade de dispositivos e aplicações diferentes desenvolvidas ao longo do tempo, e também, para as novas tecnologias atualmente no mercado.

Steuer (1993) apresenta uma definição que é independente de hardware ou suporte físico, destacando-se frente a pluralidade de dispositivos de realidade virtual:

"A "virtual reality" is defined as a real or simulated environment in which a perceiver experiences telepresence" (STEUER, 1993, p. -7)

O termo "telepresença", em tradução livre, aponta, também como definido por Steuer (1993), para a definição do termo "presence", ao se referenciar à percepção genérica de estar em um ambiente artificial. Ou em suas palavras:

"Presence" as used here refers to the experience of natural surroundings; that is, surroundings in which sensory input impinges directly upon the organs of sense." (STEUER, 1993, p. -6)

O aspecto "real" que a sua definição faz referência contempla ambientes de comunicação remota, os quais eram também objeto de estudo na época e originalmente referenciados diretamente ao conceito de "telepresença", porém, este segmento não possui relação direta com nosso trabalho nem exprime o uso atual comum do termo "realidade virtual". Baños et al. (2008) define presença nos termos da realidade virtual como sendo:

”Presence is traditionally considered the psychological sense of “being in” or “existing in” the VE² in which one is immersed.”(BAÑOS et al., 2008, page - .1)

Chegamos então a uma definição que abarca as principais correntes de pensamento e generaliza o termo para os fins desse trabalho:

“Realidade Virtual é um ambiente simulado no qual existe a percepção de presença gerada através de dispositivos que atuam em nossos órgãos de sentido”

A definição apresentada, abarca uma grande variedade de dispositivos de realidade virtual, desde HMDs, Simuladores e sistemas CAVEs³ com diversas configurações e formas de interação. Podemos definir dispositivos de realidade virtual como sendo portanto dispositivos que geram a percepção de presença em ambientes artificiais. Nesse ponto é importante notar que a definição adotada contempla ambientes e dispositivos de realidade virtual não digitais, mesmo que esses não sejam objetos do presente estudo. Vide que apesar do uso atual do termo ”virtual” ser de fácil conexão com os sistemas digitais a sua definição original significa ”potência”(LÉVY, 1996) e pode ser usada no contexto de pura oposição à realidade.

Nossa definição também vai ao encontro de trabalhos recentes relacionados ao segmento que estudam a importância e efeitos da percepção de presença em ambientes de realidade virtual. Neste sentido, podemos citar Diemer et al. (2015), Steinicke e Bruder (2014) e Baños et al. (2008).

Nesse ponto é necessário estabelecer as diferenças entre a realidade virtual e outra tecnologia da mesma área de pesquisa, a realidade aumentada. Enquanto a primeira tem como objetivo induzir a percepção de presença do usuário em um ambiente gerado totalmente pela máquina, a segunda visa apresentar elementos virtuais em sobreposição com o mundo real (AZUMA et al., 2001).

Milgram e Colquhoun (1999) definem a relação entre esses dispositivos como um “continuo de virtualidade”⁴, denominando assim, todas as tecnologias do seu espectro como sistemas de ”realidade mista”⁵, sendo a realidade aumentada a projeção de elementos virtuais em um ambiente real e a realidade virtual a projeção do indivíduo em um ambiente virtual. Note que, na realidade aumentada o ambiente no qual o indivíduo está inserido é o próprio mundo real, sendo assim, a importância da geração de percepção

² Virtual Environment ou Ambiente Virtual em tradução livre

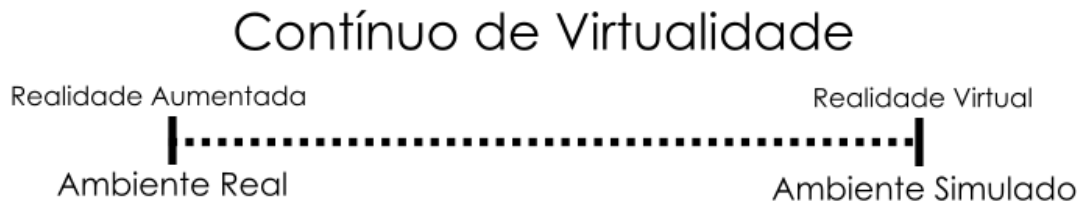
³ Sigla para ”Cave Automatic Virtual Environment”, sistema de realidade virtual onde as imagens são projetadas em paredes de um ambiente fechado ao redor do usuário

⁴ Tradução livre para o termo “virtuality continuum”. (MILGRAM; COLQUHOUN, 1999)

⁵ Tradução livre para o termo ”Mixed Reality”(MILGRAM; COLQUHOUN, 1999)

de presença se perde. Utilizando a definição de contínuo de virtualidade, Milgram e Colquhoun (1999) posicionam esses 2 segmentos em pontos opostos do espectro, como na Figura 2.

Figura 2 - Contínuo de Virtualidade.



Para fins de definição de escopo iremos nos focar nesta dissertação, especificamente, no espectro da realidade virtual.

Definimos anteriormente que o elemento chave da realidade virtual é a percepção de presença. Podemos e devemos então, avaliar qualitativamente os sistemas de realidade virtual baseados no nível de percepção de presença que eles proporcionam para o usuário. Note que a percepção de presença como experiência é inescrutável, ou seja, não é possível avaliar quantitativamente o quanto um indivíduo se sentiu mais “imerso” no ambiente virtual do que outro, porém, um mesmo indivíduo pode avaliar diversas experiências com diferentes dispositivos de realidade virtual indicando quais proporcionaram maior ou menor percepção de presença para ele.

Sheridan (1992) aponta o caminho para uma avaliação da experiência com a utilização de equipamentos de realidade virtual indicando três componentes ou dimensões da percepção de presença que podem ser quantificados: (i) Extensão da informação sensorial, que se refere a apropriação sensorial do observador, por exemplo, quando imagens são exibidas e o sistema se apropria da visão do usuário. É também a capacidade de isolar o usuário de sensações externas às que o dispositivo produz; (ii) Relação entre sensores e ambiente, que diz respeito à coerência entre o que o usuário sente e o seu efeito no ambiente simulado e (iii) Habilidade de modificar o ambiente e sua interação com ele.

Existem diversos fatores que podem impactar diretamente a experiência geral do usuário, mais gravemente, alguns podem desencadear um efeito fisiológico conhecido como *Simulator Sickness* que causa náuseas, tonturas e outros, impactando diretamente a experiência e na manutenção da percepção de presença. Com relação à *Simulator Sickness*, ela está diretamente relacionada ao segundo fator apontado por Sheridan, sendo causada pela dissociação entre os sistemas visão-vestibular, como será abordado no Capítulo 2.

Para entendermos melhor sobre a *Simulation Sickness* nos HMDs de realidade virtual modernos, precisamos introduzir conhecimentos básicos sobre o funcionamento desses

dispositivos.

1.2 Funcionamento dos HMDs modernos

Sendo uma forma de tecnologia multimídia, os dispositivos de realidade virtual são complexos pois, agregam diversas áreas do conhecimento como ótica, física, mecânica, eletrônica, computação gráfica, visão computacional, processamento de som e muitas outras, porém, em grande parte, os HMDs são baseados nos mesmos conceitos básicos dos primeiros sistemas dos anos 60. Em suma, o HMD é um dispositivo que permite exibir imagens estereoscópicas através de lentes que ampliam a imagem e aumentam o campo de visão ou FOV (Field of View) do usuário sob um *display* onde imagens são exibidas. Essas imagens são geralmente geradas por um sistema de renderização em tempo real⁶. O dispositivo ainda conta com sistemas de rastreamento para captura de aceleração angular da cabeça (*Head Tracking*) e em alguns dispositivos também a posição do usuário em relação ao mundo (*Positional Tracking*) de modo que essas informações são passadas ao sistema para que movimentos do usuário sejam replicados por movimentos da câmera e/ou personagem virtual.

Apesar do funcionamento base ser similar, a tecnologia em cada um desses segmentos evoluiu muito nos últimos 40 anos. Atualmente, contamos com displays AMOLED de alta resolução e baixa persistência que minimizam borrões de movimento (*Motion Blur*). Contamos também com IMUs miniaturizados e de baixo custo que detectam aceleração angular, linear, dados de bússola digital e outros dados que permitem o cálculo de movimento no mesmo *chip* a custos inexpressivos, bem como outras diversas melhorias de *software* e *hardware* advindos da evolução da computação gráfica nos últimos 40 anos.

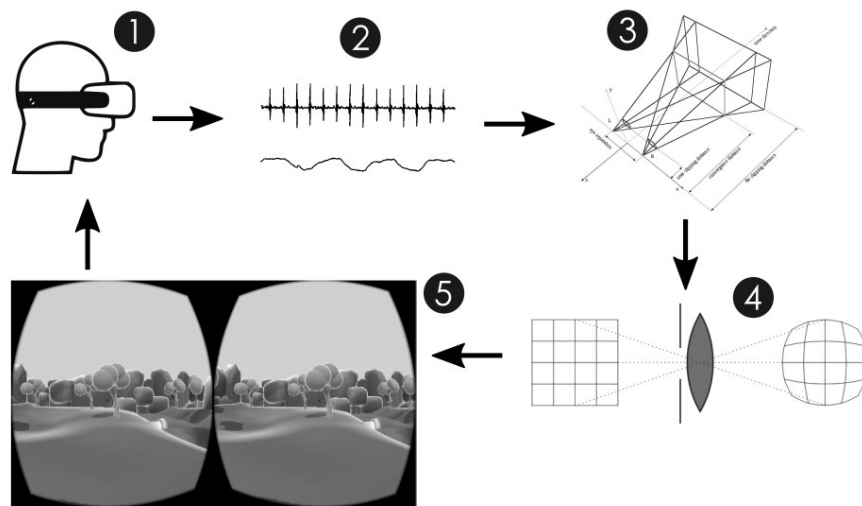
A Figura 3 apresenta o diagrama básico de funcionamento de um HMD moderno operando em um ambiente interativo tridimensional. De modo a obter informações sobre o usuário diversas técnicas e dispositivos podem ser utilizados. Esse processo é representado na Figura 3 pela etapa (1). Para o cálculo de *Head Tracking*, que corresponde captura da orientação da cabeça do usuário, é comum atualmente o uso de IMUs⁷ como Acelerômetros, Giroscópios, Magnetômetros e Bússolas Digitais. Já para o cálculo da posição do usuário no ambiente podem ser adotados 2 abordagens. (i) Sistemas de *tracking outside-in*, que utilizam referenciais e equipamentos externos como câmeras ou feixes de luzes estruturadas de modo a detectar o usuário em relação ao ambiente, ou (ii) Siste-

⁶ Mesmo imagens pré renderizadas como filmes precisam ser exibidas dentro de um ambiente interativo em tempo real para habilitar o uso de *Head Tracking*

⁷ IMU - Inertial Measurement Unit ou Unidades de Medida Inercial em tradução livre

mas de *tracking inside-out* onde todos os dados para o cálculo de posicionamento possuem como referencial o próprio usuário, nesse caso geralmente são adotados soluções de visão computacional com câmeras. Atualmente, o uso de sistemas de *head tracking* em HMDs é comum, principalmente devido ao custo reduzido dos IMUs e a popularização desses dispositivos mesmo em *smartphones* de médio a baixo custo. Sistemas de *Positional Tracking* podem ser encontrados em HMDs mais especializados como o Oculus CV1 ou o HTC Vive, ambos utilizando sistemas *outside-in*. Mas, a expectativa é que a longo prazo esses sistemas estejam disponíveis também, para HMDs de entrada, como os baseados em *smartphones* e sejam adotados sistemas *inside-out* sem a necessidade de equipamentos externos.

Figura 3 - Diagrama de Funcionamento



Legenda: Funcionamento Básico dos HMDs modernos

Geralmente, os dados vindos dos IMUs, Câmeras e outros tipos de sensores possuem ruído, variam conforme o tempo e temperatura ou possuem outros tipos de imprecisão, portanto, são pouco confiáveis por si só. Desse modo, eles passam por processos de filtragem e tratamento de sinais representado na Figura 3 pela etapa (2). Os dados coletados e filtrados são fundidos por algoritmos de *Sensor Fusion*⁸ que nos permite estimar a posição (*Positional Tracking*) e orientação (*Head Tracking*) final do usuário em relação ao ambiente. Alguns IMUs realizam o *Sensor Fusion* no próprio chip mas geralmente correções externas realizadas em software ainda são aplicadas.

⁸ Sensor Fusion é a denominação de um conjunto de técnicas matemático/computacionais que permitem integrar um conjunto de sensores na obtenção de dados que não seriam possíveis de obter individualmente com a mesma precisão (SILVA et al., 2016)

Na etapa (3) da Figura 3 os Dados de rotação e posição do usuário são passados para a câmera do sistema de renderização tridimensional de modo que a rotação e posição do avatar virtual corresponda à do usuário. Nessa etapa são gerados 2 imagens de modo a realizar a renderização estereoscópica, isso dá ao usuário a sensação de profundidade. A técnica é similar à utilizada por cinemas 3D, com a exceção de que neste caso não utilizamos lentes polarizadas e sim cada imagem é diretamente exibida em um dos olhos no HMD.

As lentes do HMD tem função dupla de ampliar o FOV e permitir o foco correto com o *Display* posicionado a apenas alguns centímetros do usuário. Porém, como efeito colateral, essas lentes também causam deformações na imagem. Para corrigir esse problema é aplicado na imagem uma deformação inversa, de modo a compensar essas causadas pela lente. Esse processo é representado na Figura 3 na etapa (4).

Na Etapa (5) as duas imagens são então, unidas em uma única composição, que é passada para o display do usuário. Esse ciclo se repete indefinidamente a uma taxa mínima recomendada de 90 ciclos por segundo para algumas plataformas como Oculus CV1 e HTC Vive e de 60 ciclos por segundo para HMDs baseados em smartphones. O tempo entre a captura dos dados pelos sensores no HMD e a exibição dos dados na tela é chamado Latência *Motion-To-Photon* e representa a latência total do sistema. Atualmente é recomendado latências inferiores a 20ms, pois valores acima disso são percebidos pelo organismo como uma dissociação sensorial entre o que se vê e o que se sente no sistema vestibular, aumentando as chances de experimentar efeitos adversos como *Simulator Sickness*.

A renderização de imagens tridimensionais em tempo real e todas as tecnologias de software necessárias para a construção desses ambientes e do próprio funcionamento dos sistemas de realidade virtual são, em grande parte, as mesmas utilizadas em *games*. Não por acaso, grande parte do desenvolvimento da última geração de HMDs de realidade virtual tem como principal foco o mercado de *games*, já que as projeções nos HMDs se beneficiam diretamente das tecnologias desenvolvidas para *games*.

Para a construção dos aplicativos de realidade virtual que são executados nos HMDs é comumente utilizada uma *Game Engine*, ou seja, uma ferramenta para construção de games integrada a outras aplicações interativas, que organiza todos os componentes da aplicação como modelos 3D, texturas, sons e as interações entre esses elementos e o usuário, em um único aplicativo.

O resultado do processo é uma aplicação interativa 3D que pode ser executada em um HMD por meio de um computador, console ou *smartphone*. Essas plataformas possuem diferenças e particularidades que são analisadas na próxima seção.

1.3 Análise Comparativa entre Plataformas e Dispositivos de Realidade Virtual

Analisando a disponibilidade de dispositivos HMDs na atualidade, é possível observar 3 plataformas distintas de desenvolvimento para ambientes de realidade virtual. Estabelecemos essa separação baseado no sistema computacional ao qual ele é direcionado: PCs/Desktops, Mobile e Consoles. Esta classificação se faz necessária para estabelecer parâmetros comparativos já que diferentes plataformas possuem diferentes restrições para o uso de técnicas computacionais.

A Figura 4 apresenta um quadro comparativo entre algumas das principais plataformas disponíveis no mercado.

Figura 4 - Tabela comparativa entre diversos HMDs de realidade virtual e seus sistemas

Dispositivo	Plataforma	Preço da Plataforma	Preço do HMD	Total	Head Tracking	Positional Tracking	Room Scale	Resolução	Refresh Display	Wireless
PSVR	Console	\$300	\$400	\$ 700	Sim	Sim	Não	1080 per eye	120hz	Não
Oculus Rift	PC	~ \$500	\$800	~ \$ 1300	Sim	Sim	Sim	1200 per eye	90hz	Não
HTC Vive	PC	~ \$800	\$800	~ \$ 1600	Sim	Sim	Sim	1200 per eye	90Hz	Não
GearVR	Smartphone	~ \$550	\$100	~ \$ 650	Sim	Não	Não	1440 per eye	60Hz	Sim
Daydream	Smartphone	\$649	\$80	\$ 730	Sim	Não	Não	1440 per eye	60Hz	Sim

fonte: <http://newatlas.com/best-vr-headsets-comparison-2016/45984/>

Head Mounted Displays direcionados à PC/Desktops possuem à sua disposição o maior poder computacional disponível para o usuário comum comparativamente às outras duas plataformas (*Mobile* e Consoles). O suporte de grandes fabricantes da indústria como NVIDIA, AMD e INTEL e a possibilidade de uso de tecnologias de maior custo computacional contribuem significativamente para que, em última instância, as plataformas voltadas para PC possuam a melhor resolução, menor tempo de resposta e atualmente, a melhor experiência no uso de HMDs. Porém, elas possuem um alto custo, que é referente tanto ao dispositivo HMD, quanto ao PC/Desktop requerido para processamento dos ambientes interativos, tornando assim, as plataformas de realidade virtual baseadas em PC, ainda inacessíveis para a maioria do público.

Plataformas baseadas em *smartphone* estão no extremo oposto dos sistemas computacionais, eles utilizam o poder computacional, sensores e *display* de alta resolução dos *smartphones* para apresentar uma experiência mais acessível e sem fio. Porém, devido as suas limitações, as aplicações desenvolvidas para esses dispositivos costumam ser mais simples e a autonomia é limitada pela bateria. Em geral, esses dispositivos sofrem de problemas de superaquecimento devido ao alto consumo computacional e a falta de sistemas de resfriamento mais avançados como os utilizados em computadores. Atualmente, nenhuma plataforma baseada em *smartphone* possui *Positional Tracking*, mas a expectativa é de que esse quadro se altere no futuro. com sistemas *outside-in* para *smartphone*. Um exemplo disso são os sistemas Tango (GOOGLE, 2017) da Google.

Plataformas baseadas em console como o PSVR da Sony se situam em um meio termo. Eles possuem preço mais acessível do que plataformas voltadas para computador porém, não sofrem de problemas como superaquecimento e autonomia limitada, já que estão conectados ao console. Atualmente, o único HMD para console disponível é o PSVR e este possui sistema de *Positional Tracking outside-in* que funciona com câmeras.

Enquanto algumas características, como por exemplo resolução, não possuem impacto significativo para a produção de Simulator Sickness, outras são diretamente relacionados a ela. Podemos citar a falta de *Positional Tracking* e baixas taxas de *refresh rate*.

No próximo capítulo são apresentadas as características do *Simulator Sickness*, suas causas, sintomas e impactos negativos que causam ao mercado de sistemas de realidade virtual.

2 *SIMULATOR SICKNESS* EM AMBIENTES DE REALIDADE VIRTUAL

Apesar de todo apelo que a tecnologia de realidade virtual gera para o público e o grande avanço em *software* e *hardware* ocorrido nos últimos anos, um grave problema permanece em aberto. Aplicações de realidade virtual, em diversas situações, ainda causam sintomas desagradáveis, em um efeito conhecido como *Simulator Sickness*, que provoca náusea, desorientação, estresse visual e, por vezes, pode inviabilizar totalmente a experiência de utilização desse tipo de tecnologia (FANG et al., 2015; KIRYU; SO, 2007).

Ao longo dos últimos anos, diversos termos foram cunhados para se referir a esses efeitos, onde os mais comumente encontrados são: "*Simulator Sickness*" e mais recentemente "*Cybersickness*". Outro termo conhecido como "*Motion Sickness Visualmente Induzido*" apesar de semanticamente apropriado, é geralmente atribuído a outros equipamentos analógicos, que induzem a efeitos similares (REBENITSCH; OWEN, 2016). Atualmente, os termos *Simulator Sickness*, *Cybersickness* e *Virtual Reality Sickness* são os mais utilizados para designar os efeitos da *Motion Sickness* em HMDs de realidade virtual e podem ser considerados equivalentes.

Simulator Sickness não é um tópico de pesquisa recente e seus efeitos vêm sendo estudados com maior ou menor interesse durante as últimas décadas em áreas como psicologia (BARRETT; THORNTON, 1968), aeroespacial (KENNEDY et al., 1989), medicina (FANG et al., 2015), entre outras. Estudos apontam que de 30% a até 80% da população pode ser suscetível a esses efeitos (REBENITSCH; OWEN, 2016) e, apesar dos sintomas fisiológicos da *Simulator Sickness* diminuírem com a exposição contínua (REASON, 1978) e não causarem sequelas permanentes conhecidas (REBENITSCH; OWEN, 2016), podem constituir um problema para a área de saúde, considerando o aumento da disponibilidade desses dispositivos em maior escala para grupos de risco como crianças, adolescentes e idosos.

Adicionado a isso, destaca-se o fato da falta de legislação específica para utilização de aplicações de realidade virtual em diferentes contextos específicos. Em geral, essas aplicações possuem classificação similar a jogos eletrônicos, ou seja, considera-se somente seu conteúdo (violência, sexo, sangue) e não os padrões de ergonomia e segurança física e psicológica envolvidos na sua utilização. Manuais dos dispositivos como o HTC Vive e o Oculus Rift CV1 orientam a utilização desses equipamentos apenas para maiores de 13 anos, mas estudos mais aprofundados sobre os limites de utilização, segurança e ergonomia das próprias aplicações ainda precisam ser desenvolvidos (OCULUSVR, 2016).

Portanto, os impactos negativos da *Simulator Sickness* em aplicações de realidade virtual não devem ser negligenciados. Durante os últimos anos esse problema se tornou tópico recorrente em redes de notícia especializadas e não especializadas da área de tec-

nologia, principalmente, pela preocupação crescente sobre quão segura é a utilização de sistemas de realidade virtual para o público geral. Em buscas online pelos termos "Virtual Reality Sickness" é possível encontrar facilmente artigos sobre os perigos da *Simulator Sickness* e os esforços de companhias para minimizar seus efeitos aos consumidores finais Dredge (2014), Lang (2016) e Caddy (2016). Neste caso, apesar das previsões de faturamento na ordem de 120 bilhões de dólares para 2020 (DIGI-CAPITAL, 2016), solucionar esta questão torna-se fundamental para o sucesso da indústria de aplicações e *hardware* de realidade virtual como mercado global a longo prazo (DREDGE, 2014).

A seguir, é apresentada uma breve explicação sobre os sintomas e causas conhecidas da *Simulator Sickness*

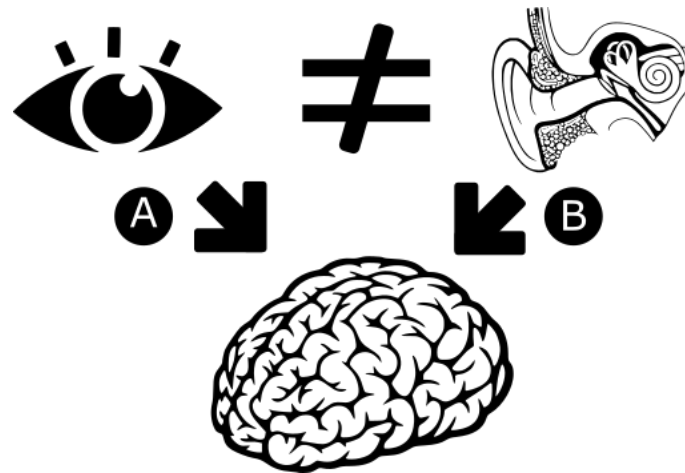
2.1 Sintomas e Causas da Simulator Sickness

Rebenitsch e Owen (2016) apontam que os efeitos da *Simulator Sickness* são poli-sintomáticos e podem variar de forma e intensidade entre indivíduos tornando-o um problema complexo de descrever e definir. Podemos tomar como exemplo o questionário SSQ (*Simulator Sickness Questionary*) (KENNEDY et al., 1993), que descreve um total de 16 sintomas categorizados em 3 principais áreas: Náuseas, Problemas Oculomotores (Cansaço Visual, dificuldade de focar, entre outros) e Desorientação (Vertigem, Tontura, etc). Outros sintomas, como dor de cabeça e dificuldade de concentração, também são comuns.

Em uma revisão sobre diversos trabalhos relacionados ao tema, Rebenitsch e Owen (2016) afirmam que as causas biológicas desse problema ainda não estão firmemente estabelecidas e que diferentes hipóteses atribuem variados fatores como responsáveis pela *Simulator Sickness*, entretanto, a teoria mais aceita é a "*Sensory Rearrangement Theory*" ou SRT, proposta por Reason e Brand (1975). Uma representação de suas principais ideias pode ser vista na Figura 5.

A *Simulator Sickness* é considerado como um tipo de *Motion Sickness*. A SRT apresenta uma causa única para todos os tipos de *Motion Sickness* e se baseia em uma premissa principal, a de que todas as situações que provocam *Motion Sickness* são caracterizadas por uma condição de rearranjo sensorial, no qual sinais transmitidos pelas vias visual (A) e vestibular (B) estão em discordância ou dissociação entre si e com o que é esperado de experiências anteriores (REASON, 1978). As informações visuais são levadas através do nervo ótico para o sistema nervoso central. A via vestibular, por sua vez, conduz informações sobre os movimentos da cabeça no espaço, aceleração e postura (FANG et al., 2015). Quando existe uma dissociação entre esses elementos e a expectativa sensorial é frustrada (baseada em experiências anteriores), os efeitos da *Motion Sickness* se manifestam.

Figura 5 - Motion Sickness



Legenda: Motion Sickness causada pela dissociação sensorial das vias vestibular, visual e proprioceptiva no sistema nervoso central

Com relação aos efeitos fisiológicos sentidos como náuseas, segundo Reason (1978) apenas a dissociação sensorial por si só não é o bastante para os provocar, sendo principalmente a comparação com estados anteriores, e a não correspondência com estados normalmente experienciados, que causa a sensação de enjojo. Isso explica o fato de que os efeitos dos diferentes tipos de *Motion Sickness* são amenizados com a exposição continuada do indivíduo a essas condições. A hipótese evolucionária propõe, por sua vez, que os sintomas como náuseas, são causados devido a uma aplicação incorreta de mecanismos de defesa do organismo contra envenenamentos. Segundo Treisman (1977) esse mecanismo foi desenvolvido pois associamos estados de dissociação sensorial com quadros de envenenamento e a defesa fisiológica executada é expulsar os alimentos do estomago. Favorece essa teoria o fato de que outros mamíferos também sofrem de *Motion Sickness* indicando que esse é um mecanismo de defesa antigo na linha evolucionária do ser humano Treisman (1977).

Reason (1978) aponta dois principais modelos de rearranjo sensorial possíveis: (i) Visual-Vestibular que corresponde a uma dissociação entre a visão e o sistema vestibular e (ii) Canal-Otólito, responsável por dissociações do ouvido interno. A *Simulator Sickness* se enquadra como uma *Motion Sickness* da primeira categoria. Reason (1978) aponta também que sobre condições naturais enquanto caminhando sozinho em um ambiente com a gravidade da terra, a visão e o sistema vestibular estão em conformidade, porém, esses estados podem ser perturbados de três formas diferentes: (i) Quando ambas, a visão e sistema vestibular, possuem informações não correlatas, ou contraditórias, (ii) Quando a visão possui informação dissociada da realidade e (iii) quando o sistema vestibular possui

informação dissociada da realidade.

Outra premissa fundamental da SRT é a de que, o sistema vestibular é o elemento central deste processo, independente de outros sensores espaciais como o proprioceptivo. Reason (1978) aponta que isso implica que esses efeitos só se manifestam quando há o envolvimento de movimentos com mudança de velocidade (aceleração), já que o sistema vestibular só responde a acelerações angulares e lineares. Esse aspecto também acomoda o fato de que a suscetibilidade aos efeitos da *Motion Sickness* dependem do correto funcionamento do sistema vestibular. Por último, Reason (1978) sugere que não existe distinção fundamental entre o movimento do corpo e o aparente movimento do corpo induzido visualmente que, sobre circunstâncias mais familiares, deveriam ser acompanhados do estímulo vestibular. Isso abre espaço para que solucionado os problemas da dissociação sensorial, os sistemas de realidade virtual seriam livres da *Simulator Sickness*.

Variações dessa teoria propõem que apenas subsets dos dados sensoriais são significantes para a produção da *Motion Sickness*. Bles et al., (BLES et al., 1998) e Bos et al. (BOS; BLES; GROEN, 2008) por exemplo, citam que a teoria de Instabilidade Postural vem ganhando força ao longo dos anos e observam que a Motion Sickness não é causada por todas as dissociações visual-vestibulares e sim, pelo indivíduo não conseguir manter posturas apropriadas, de modo a compensar estímulos externos (REBENITSCH; OWEN, 2016). É conhecido que indivíduos tendem a mover seu centro de gravidade e postura de modo a compensar dissociações entre o sistema vestibular e a visão. Enquanto isso é visto por uns como uma consequência natural e um sintoma desta, outros afirmam que essa é a principal causa da *Motion Sickness*, de modo que, quanto mais instável é uma postura, mais um indivíduo sofrerá os efeitos da *Motion Sickness*. Neste sentido, Rebenitsch e Owen (REBENITSCH; OWEN, 2016) destacam que a instabilidade postural pode ser vista como uma forma mais restritiva SRT, onde o sistema vestibular não conseguir responder aos estímulos externos é o único fator relevante para a *Motion Sickness*.

Outras teorias como a "*Rest Frame*" apontam que somente um eixo específico, no caso o vertical, é relevante para provocar dissociações que causam *Motion Sickness*. Esta afirmação generaliza a teoria da instabilidade postural e explica situações onde a anterior falha, por exemplo, em situações onde o indivíduo está sentado e sua postura não é alterada (REBENITSCH; OWEN, 2016).

Apesar de não haver consenso sobre as causas da *Simulator Sickness*, a SRT vem apresentando sucesso em explicar diversos aspectos do problema. Enquanto variações dessa teoria ainda estão por se estabelecerem, a teoria original se apresenta como estrutura sólida para o objetivo final deste trabalho, que é desenvolver uma ferramenta que nos permita analisar em tempo real o nível de *Simulator Sickness* causado por uma aplicação. Portanto, neste caso, adotamos a SRT como base para o desenvolvimento de nossos produtos.

Já citamos anteriormente, que com repetidas exposições o nosso organismo cria

adaptações neurológicas que, com o tempo diminuem, ou mesmo, eliminam os efeitos da *Simulator Sickness* no organismo, pois não existe mais frustração de expectativa com relação às dissociações. Enquanto esse fato é um ponto positivo para a tecnologia, pois é possível "treinar" um indivíduo para utilizar as aplicações em realidade virtual, essa prática ainda encontra restrições éticas. Por exemplo, é discutível se seria aceitável a exposição deliberada de crianças e idosos a esses ambientes para que propositalmente, experimentassem a *Simulator Sickness*, visando a formação de suas "VR Legs". Essa prática que, sem uma análise aprofundada, nos parece nociva, tem se tornado comum para uma parcela de entusiastas, de forma a permitir que fiquem engajados durante mais tempo em ambientes virtuais, principalmente em *games* (ARONSSON, 2014).

Uma possível solução pode ser a redução da *Simulator Sickness* provocada pelas aplicações em si, com a disponibilização de ferramentas de análise, que permitam aos desenvolvedores detectar esses problemas em tempo de produção. É com essa visão que propomos a ferramenta descrita neste trabalho.

De forma a viabilizar esse objetivo, faz-se necessário a formulação de um modelo computacional que permita estimar a *Simulator Sickness* provocada por HMDs de realidade virtual, que é o foco do próximo capítulo.

3 UMA PROPOSTA DE MODELAGEM PARA *SIMULATOR SICKNESS* EM HMDS DE REALIDADE VIRTUAL

Esse capítulo apresenta uma proposta de modelagem matemático-computacional para a Simulator Sickness em sistemas de realidade virtual utilizando HMDs.

3.1 Trabalhos Relacionados

A proposta de modelar, de alguma forma, o funcionamento do cérebro, em específico o funcionamento dos circuitos neurológicos que desencadeiam os diversos tipos de Motion Sickness, não é nova. Reason em seu artigo de 1978 "*Motion Sickness Adaptation: A neural Mismatch model*" apresentou uma das primeiras propostas de modelagem com fluxogramas do fenômeno mostrando, segundo a SRT, a sequência de passos executados pelo sistema nervoso central na produção da Motion Sickness. Um exemplo desse diagrama pode ser visto na Figura 6.

Outros trabalhos mais recentes baseados em subconjuntos da SRT apresentam formulações mais próximas de uma definição matemática. Um exemplo pode ser visto no trabalho de Bles et al. (1998) e na Figura 7 sobre sua proposta de explicação "*Rest Frame*" da *Motion Sickness*, que por sua vez, se abstém em apresentar um maior rigor matemático.

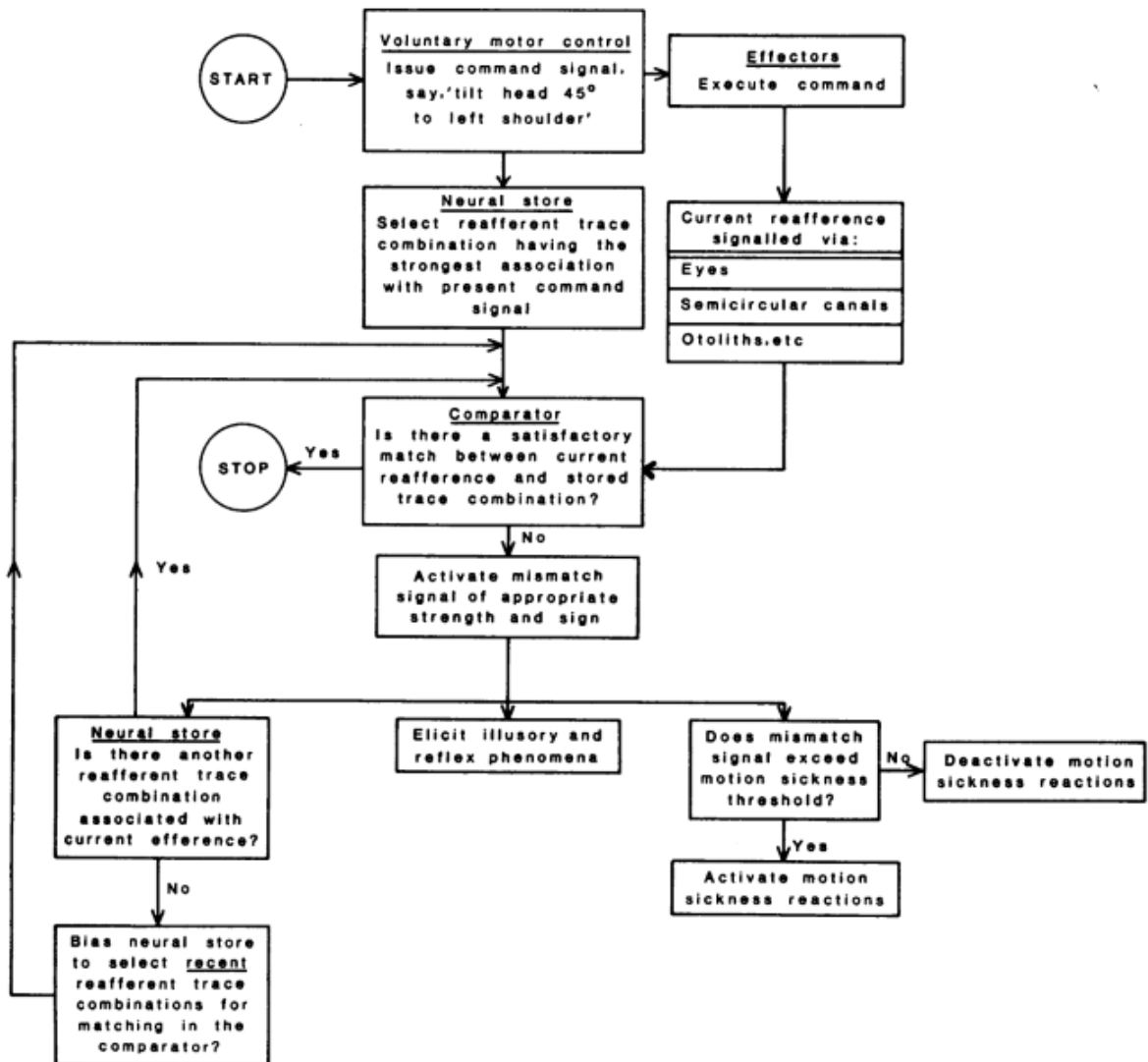
Bos, Bles e Groen (2008) apresentam um diagrama (ou "*Framework*" em suas palavras) que mapeia as funções cerebrais baseado na teoria "*Rest Frame*" de Bles et al. (1998), que possui uma abordagem com um rigor matemático-computacional mais bem desenvolvido.

Essas propostas de modelagem, portanto, falham em nos atender em nosso objetivo final de criação de uma ferramenta que possa ser utilizada pelos desenvolvedores. Ora por sua simplicidade e falta de rigor matemático, ora pela inclusão ou inadequação de elementos, que não podem ser qualitativamente averiguados como mecanismos internos ao sistema nervoso central de antecipação e memória sensorial.

3.2 Modelando a *Simulator Sickness* em HMDs de Realidade Virtual

Nossa proposta de modelagem computacional da *Simulator Sickness* em HMDs de Realidade Virtual tem como objetivo principal servir de base para a construção de ferramentas de análise em tempo real para que desenvolvedores de aplicações de realidade virtual possam estimar, durante a produção e/ou sessões de testes, com que intensidade

Figura 6 - Diagrama da Motion Sickness



Legenda: Fluxograma dos processos mentais que desencadeiam *Motion Sickness* (REASON, 1978)

ao longo do tempo e também, no instante atual, se as suas aplicações estão produzindo as condições conhecidas, que desencadeiam a *Simulator Sickness*.

Como apontado por Reason (1978) a dissociação visual-vestibular é o principal fator desencadeador da *Simulator Sickness* e outros tipos de *Motion Sickness*, sendo esta portanto, causada por dissociações entre o movimento aparente recebido através da visão e da aceleração linear e angulares sentidos pelo sistema vestibular. Modelos da *Motion Sickness* como o da *Rest Frame* de Bos, Bles e Groen (2008) levam em consideração também, dados somestésicos vindo de outras vias como músculos, articulações e tato. Porém, a importância destas para o fenômeno específico da *Simulator Sickness* ainda é incerto, Reason (1978) aponta a *Simulator Sickness* como sendo um fenômeno onde atuam

Figura 7 - Rest Frame Motion Sickness

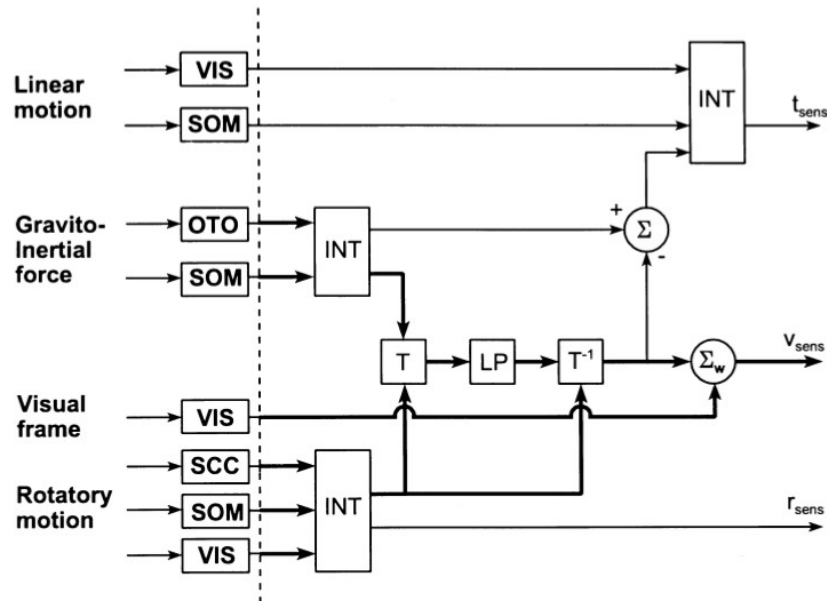


FIG. 2. Global scheme for computation of the signals indicating translation, rotation and the vertical. To illustrate how this diagram connects to the main model shown in Fig. 1, the dotted line is drawn to mark the input side for module V . Everything to the left of the dotted line represents vector a in Fig. 1; everything to the right represents module V . The thick lines indicate the components involved in the calculation of the subjective vertical. See text for further details.

Legenda: Diagrama de Bles et al. (1998) da teoria "Rest Frame" da *Motion Sickness*

especificamente o sistema visão-vestibular por exemplo.

Por meio dessa análise podemos estabelecer um espectro de problemas causadores da *Simulator Sickness* em sistemas de HMDs conforme mostrado na Figura 9.

Podemos averiguar que a dissociação da componente de aceleração linear do movimento possui 3 possibilidades conforme as classificações de dissociações apontadas no capítulo anterior por Reason (1978): (i) Ambos o sistema vestibular e a visão possuem informações não coerentes entre si e não coerentes com a realidade. Colocando em perspectiva do uso de sistemas de realidade virtual, essa situação equivale a utilização de um HMD que exiba imagens e o uso de um sistema de estimulação galvânica do sistema vestibular provocando estímulos que não são coerentes com o que se exibe no HMD. Como esse tipo de bi-estimulação é pouco comum, deixamos ele de fora de nosso espectro de causas comuns da *Simulator Sickness* em sistemas de HMDs, apesar dele ser contemplado no modelo proposto. (ii) Apenas o sistema vestibular está em discordância. Esse caso nominamos de "Usuário Incoerente" e corresponde aos momentos em que o sistema vestibular não responde a estímulos visuais, por exemplo, quando o avatar virtual está em movimento (e seu movimento aparente é visto no *display*) mas o usuário está parado. Por último (iii) quando apenas a visão está em discordância. Vide que o HMD se apropria da

Figura 8 - Rest Frame Motion Sickness

J.E. Bos et al. / Displays 29 (2008) 47-57

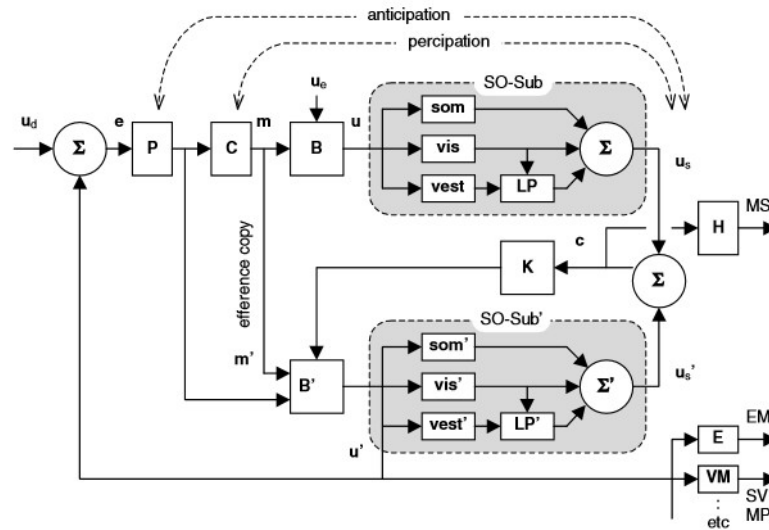
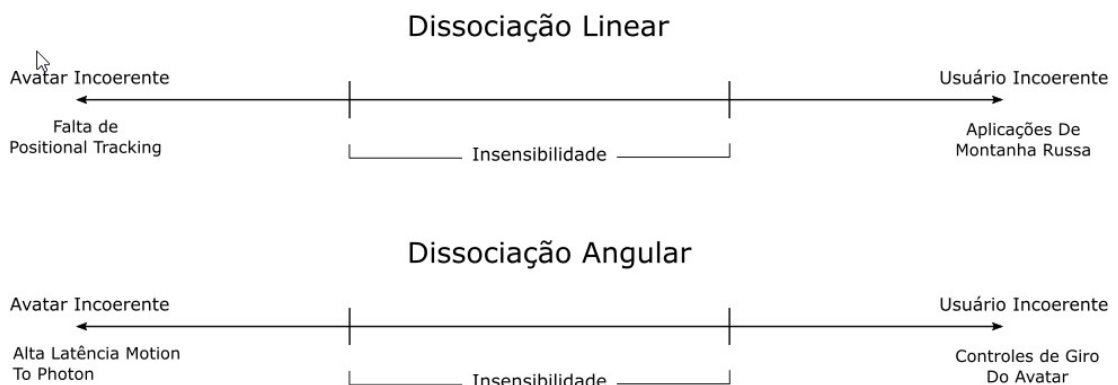


Fig. 1. Global overview of the spatial orientation and motion sickness model. **P** = preparatory phase, **C** = motor commands generating controller, **B** = body, **vis** = visual system, **som** = somatosensory system, **vest** = vestibular system, **LP** = low-pass filter, **H** = transfer function for motion sickness, **E** = eye movement system, **V/M** = verbal/manual system to finally give the SV and motion perception (MP), **K** = internal feedback (or Kalman) gain. Within the internal model, all functions have been indicated with a prime. The model's inputs are the desired body state (u_d) and the external disturbances (u_e). The outputs are motion sickness (MS), eye movements (EM), the subjective vertical (SV), and motion perception variables (MP). Note that summations may as well be complex (weighted) functions. Within this model, the grey areas encompass the two spatial orientation submodels essential for describing motion sickness.

Legenda: Framework de Bos, Bles e Groen (2008) da teoria "Rest Frame" da Motion Sickness

Figura 9 - Espectro da Simulator Sickness em HMDs de Realidade Virtual



Legenda: Espectro Dissociativo relacionado à Simulator Sickness em aplicações de Realidade Virtual

visão do usuário logo que as imagens são exibidas e são o resultado da movimentação do avatar virtual. Chamamos esse extremo do espectro de "Avatar Incoerente". Ele corres-

ponde aos casos onde movimentos do usuário não são replicados pelo avatar virtual, por exemplo, os HMDs que não possuem sistemas de *Positional Tracking* onde nenhum tipo de movimento linear do usuário é replicado em seu avatar virtual.

Analogamente, podemos classificar as dissociações de aceleração angular do sistema visão-vestibular. Avatares incoerentes ocorrem, por exemplo, se a latência *Motion-To-Photon* (OCULUSVR, 2016) for alta e Usuários Incoerentes quando é permitido outros controles para a mudanças de orientação do avatar, além do *Head Tracking* do usuário. Uma dissociação dupla é incomum, mas pode ser produzida artificialmente com a ajuda de cadeiras giratórias e um HMD.

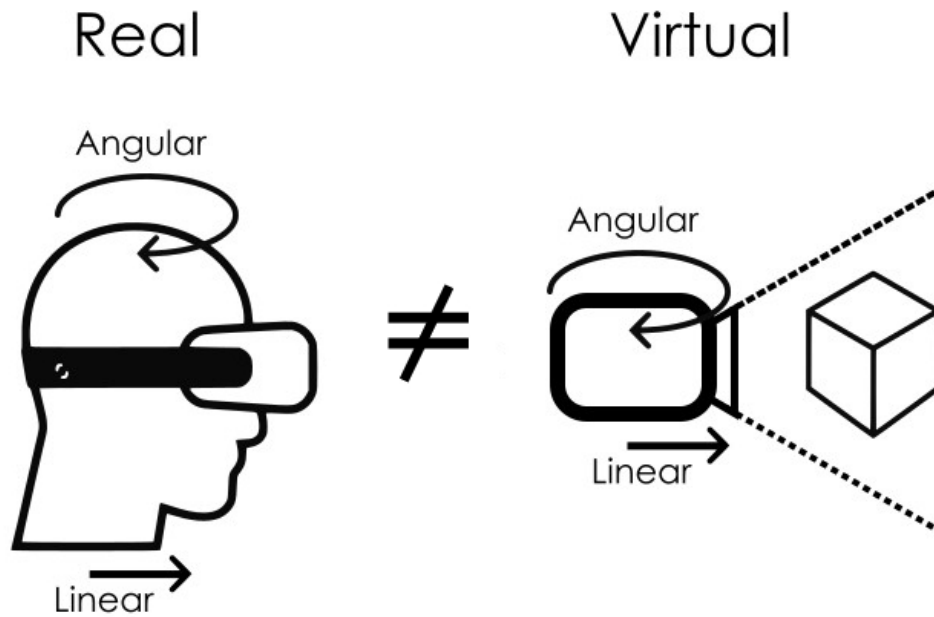
Partindo do centro do espectro e nos distanciando em direção as extremidades aumentamos a intensidade do efeito. Porém, como já apresentado anteriormente, a *Simulation Sickness* se apresenta como um problema com características muito diversas entre indivíduos, incluindo a sensibilidade pessoal a seus efeitos. É conhecido que a contínua exposição à *Simulator Sickness* faz com que indivíduos adquiram maior resistência a ela. A resistência natural de cada indivíduo à *Simulator Sickness* é conhecido informalmente como "*VRLeg*" (XINREALITY, 2017). Isso vai ao encontro da SRT, que prediz que a frustração da expectativa sobre uma certa configuração visual-vestibular é fator fundamental para desencadear os diversos tipos de *Motion Sickness*, logo, se um indivíduo está habituado a ambientes dissociativos, os efeitos da *Simulator Sickness* não se manifestam, ou são minimizados.

É importante notar que no âmbito da realidade virtual com HMDs o que temos é a apropriação da visão pelo dispositivo, apresentando imagens geradas por computador. Um corolário dessa análise fundamental é que a dissociação causadora da *Simulator Sickness* em HMDs sempre ocorre entre o sistema vestibular do usuário e o movimento aparente visto nos *displays* por meio do aparato de lentes. Como esse movimento aparente é causado pela movimentação de uma câmera, ou avatar virtual, e não existe atraso entre o que é visto no *display* e processado pelo sistema nervoso central, podemos inferir a visão do usuário através do movimento de câmera do avatar virtual. O resultado dessa análise é ilustrado na Figura 10

Diante de todo o quadro apresentado até agora, nosso modelo se baseia portanto, nas seguintes proposições:

- A "*Sensory Rearrangement Theory*" é robusta o suficiente para abarcar outras variações dela, logo, uma posição conservadora para o modelo proposto é partir de suas suposições mais gerais que podem, no futuro, serem alinhadas a outras teorias mais restritivas;
- Existem quatro componentes principais e independentes atuando na formação da dissociação: Aceleração Linear e Angular sentidas no sistema vestibular e o Movimento aparente Linear e Angular percebidos pela visão através do HMD;

Figura 10 - *Motion Sickness* em HMDs



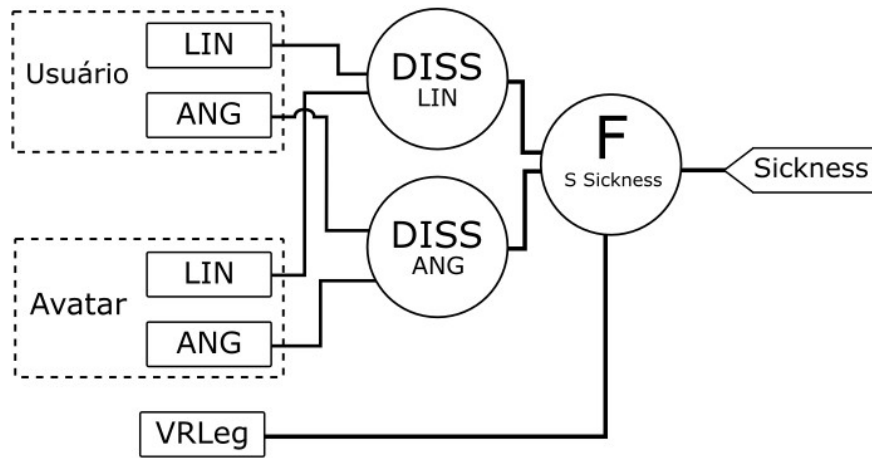
Legenda: *Motion Sickness* e a dissociação entre os movimentos no *Display* do HMD e o registro vestibular

- Os movimentos vistos pelo usuário através do HMD podem ser generalizados como os movimentos da câmera virtual ou do avatar virtual;
- Como apontado por (REASON, 1978) Não existe diferença conhecida entre a dissociação vestibular e visual, logo a *Simulator Sickness* ocorre simetricamente no espectro apresentado na Figura 9;
- A intensidade de *Simulator Sickness* varia conforme cada indivíduo e também, ao longo do tempo, sendo necessário um termo amortizador dos efeitos dissociativos.

Esses pontos nos levam ao diagrama base de funcionamento do nosso modelo, apresentado na Figura 11.

Conforme apresentado no capítulo 2, a *Simulator Sickness* é causada por disfunções relacionadas à movimento, principalmente aceleração, já que, nosso sistema vestibular não detecta a velocidade do corpo relativa a um sistema referencial qualquer e sim, a aceleração linear e angular no interior do osso temporal pela mudança da velocidade. A *Motion Sickness* associada à *Simulator Sickness* está portanto diretamente relacionada à mudança de aceleração vista pelo usuário no *Display* (Movimento este realizado pela câmera virtual) e a sua não correspondência com a estimulação do sistema vestibular. Dessa forma, em nosso modelo (Figura 11), ignoramos as informações proprioceptivas e

Figura 11 - Modelo Simulator Sickness



Legenda: Modelo de dissociação da Simulator Sickness em HMDs de Realidade Virtual

consideramos apenas duas variáveis relevantes: (i) A aceleração no espaço tridimensional da câmera virtual, que é um valor conhecido ou calculável do sistema virtual e está diretamente relacionado ao que é visto como movimento aparente nas imagens exibidas no HMD (aceleração visual) e (ii) a aceleração (linear e angular) do corpo do indivíduo (aceleração vestibular), que pode ser obtida por meio de instrumentos de medição inercial (IMU), como acelerômetros e giroscópios, que estão disponíveis nos próprios HMDs, ou com captura de meios externos.

Considerando a intensidade de *Simulator Sickness* uma função de dissociação entre o movimento aparente e a aceleração vestibular, inicialmente foi proposto um modelo em artigo publicado na SBGames 2016 - Silva et al. (2016) adotando a formalização das equações 1,2 e 3 :

$$D_{Lin} = \frac{|\vec{A}_{AcelLin} - \vec{U}_{AcelLin}|}{|\vec{Max}_{AcelLin}|} \quad (1)$$

$$D_{Ang} = \frac{|\vec{A}_{AcelAng} - \vec{U}_{AcelAng}|}{|\vec{Max}_{AcelAng}|} \quad (2)$$

$$Sickness = Max_{element}(D_{Lin}) + Max_{element}(D_{Ang}) - 2VRLeg \quad (3)$$

Consideramos \mathbf{D}_{Lin} a dissociação de aceleração linear geral, $\tilde{\mathbf{U}}_{\text{AcelLin}}$ a do usuário e $\tilde{\mathbf{A}}_{\text{AcelLin}}$ a do avatar virtual. De forma análoga, \mathbf{D}_{Ang} e seus termos respondem pela componente angular da dissociação. Para adequação matemática, os valores foram todos normalizados pelos termos $\tilde{\mathbf{M}}_{\text{AcelLin}}$ e $\tilde{\mathbf{M}}_{\text{AcelAng}}$ de forma que 0.0 seria a situação que se encontra o usuário ou avatar sem aceleração e 1.0 em aceleração máxima aceitável pelo sistema. Para o cálculo final da intensidade do fenômeno consideramos a maior componente entre os 3 eixos, ou seja, o eixo onde a dissociação ocorre com maior intensidade. Esse valor é extraído por meio da função $\mathbf{Max}_{\text{element}}$. É realizado então, o somatório das duas componentes (angular e linear), subtraídas do termo $2\mathbf{VRLeg}$.

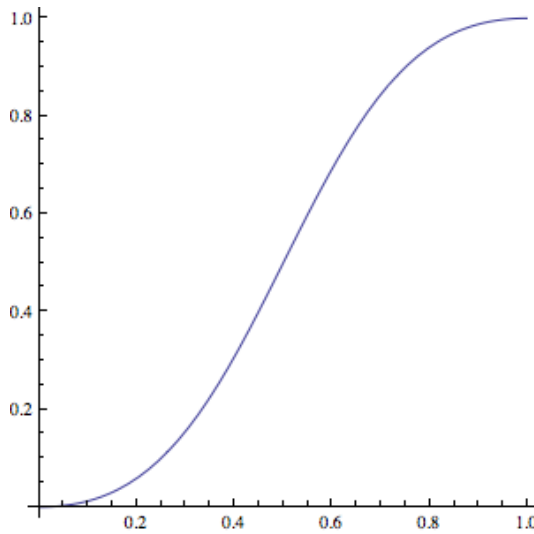
O termo \mathbf{VRLeg} é o termo de amortização dos efeitos dissociativos e designa a resistência biológica (que um usuário possui e potencialmente pode desenvolver com o tempo) aos efeitos da *Simulator Sickness*. Em nossa formulação ele necessita de uma adequação numérica para manter os valores finais normalizados entre 0 e 1, então multiplicamos pelo fator 2. Dessa forma, é possível testar os efeitos da aplicação do modelo em diversos perfis de usuários, variando \mathbf{VRLeg} tal que: 0.5 seria um usuário comum, 0.0 um usuário ultra sensível e 1.0 um indivíduo com total resistência à *Simulator Sickness*.

Esse modelo, entretanto, possui algumas falhas que foram posteriormente identificadas.

Primeiro, os termos $\tilde{\mathbf{A}}_{\text{AcelLin}}$ e $\tilde{\mathbf{U}}_{\text{AcelLin}}$ são normalizados por um único termo $\tilde{\mathbf{M}}_{\text{AcelLin}}$ o que é uma impossibilidade, pois os valores de Aceleração do usuário e do Avatar geralmente possuem escalas diferentes. Segundo o nosso modelo, os valores de $\tilde{\mathbf{A}}_{\text{AcelLin}}$ são conhecidos, ou calculados pela aplicação no ambiente virtual tridimensional e possuem métrica interna baseado na escala utilizada pelo aplicativo. Apesar de $\tilde{\mathbf{A}}_{\text{AcelLin}}$ em um sistema de realidade virtual ideal e $\tilde{\mathbf{U}}_{\text{AcelLin}}$ serem relacionados através de uma função linear, essa função varia para cada sistema de captura e aplicação desenvolvida, pois trata do espaço geométrico tridimensional criado pelo computador e os dados reais do ambiente do usuário, provenientes dos sistemas de captura como IMUs e câmeras. Desmembrando esses termos em normalizações separadamente, podemos contornar esse problema mais facilmente usando os mecanismos de calibragem.

Outro problema desse modelo relaciona-se a forma com que a *Simulator Sickness* ocorre no organismo. No modelo proposto, ela ocorre com uma progressão linear, mas esta é uma informação desconhecida e pouco provável. Uma solução mais conservadora é aplicar uma função de transferência ao cálculo, assim futuramente, outros trabalhos podem avaliar qual função de transferência modela com mais precisão o fenômeno. Em nossas análises, iremos utilizar a interpolação definida por uma curva *Cúbica Easing InOut* (PENNER, 2002; DUNN, 2011). Uma das características dessa curva é um início lento e final ágil amortizando os menores valores e ampliando os valores mais próximos do topo. A seguir é apresentada a equação e na Figura 12 a curva definida por essa função de transferência:

Figura 12 - Curva In Out Cúbica



Legenda: Curva In Out Cubica utilizada como função de transferência.

$$(x/2) < 1) \rightarrow f(x) = \left(\frac{1}{2 * x^3}\right) \wedge f(x) = \left(\frac{1}{2} * (x - 2)^3 + 2\right)$$

Por último, teorias como a *Rest Frame* apontam para a possibilidade de que eixos específicos possam ser mais significativos para a produção dos sintomas, logo, a aplicação de pesos ao modelo, tanto com relação aos eixos, quanto em relação às duas componentes principais (Linear e Angular) o torna mais preparado para subconjuntos atuais e futuros da "*Sensory Rearrangement Theory*". Neste trabalho, adotamos a solução mais conservadora e mais alinhada à teoria original, onde todos os eixos possuem o mesmo peso, assim como, as suas componentes principais (linear e angular), tornando o espectro dissociativo, apresentado na Figura 9, totalmente simétrico.

O segundo modelo proposto implementa essas melhorias e é apresentado a seguir nas equações 4, 5 e 6:

$$D_{Lin} = \frac{|\vec{A}_{AcelLin}| * Vec\vec{Inf}}{|M\vec{a}x A_{AcelLin}|} - \frac{|\vec{U}_{AcelLin}| * Vec\vec{Inf}}{|M\vec{a}x U_{AcelLin}|} \quad (4)$$

$$D_{Ang} = \frac{|\vec{A}_{AcelAng}| * Vec\vec{Inf}}{|M\vec{a}x A_{AcelAng}|} - \frac{|\vec{U}_{AcelAng}| * Vec\vec{Inf}}{|M\vec{a}x U_{AcelAng}|} \quad (5)$$

$$Sickness = f_{Sickness}(Max_{element}(D_{Lin} * D_{LinInf}) + Max_{element}(D_{Ang} * D_{AngInf})) - VRLeg \quad (6)$$

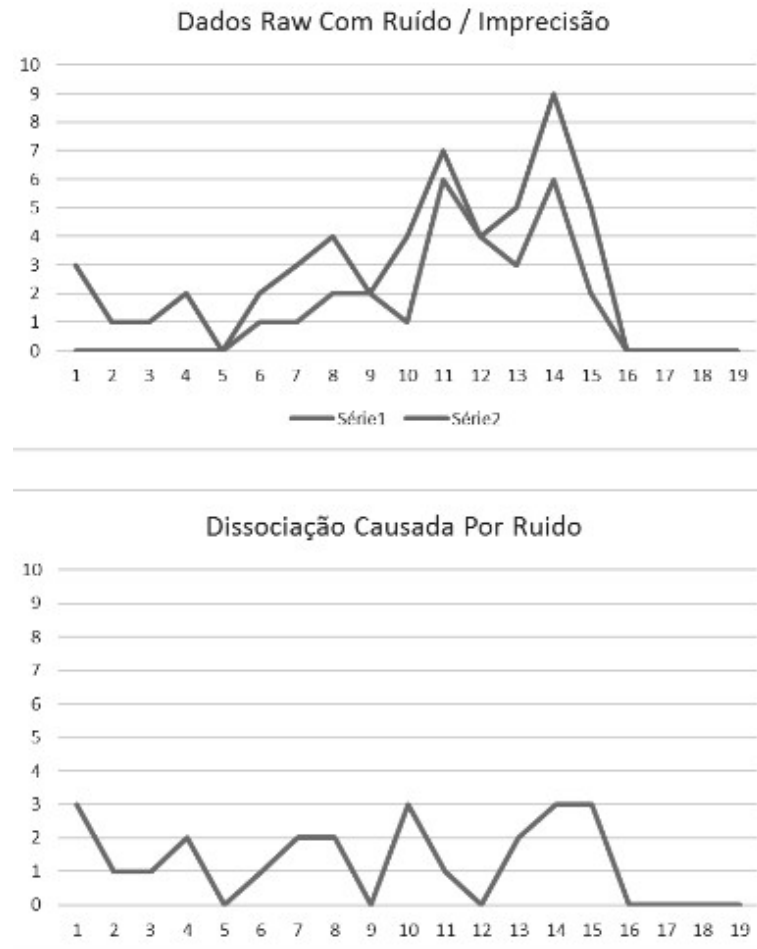
O termo $\mathbf{Vec\tilde{Inf}}$ é um vetor de 3 posições com valores entre 0 e 1 que representa o peso de cada eixo sobre a *Simulator Sickness*. Analogamente, temos os termos $\mathbf{D_{LinInf}}$ e $\mathbf{D_{AngInf}}$ como valores escalares entre 0 e 1, que configuram a influência das componentes lineares e angulares. $\mathbf{f_{Sickness}}$ corresponde à função de transferência apresentada anteriormente e retorna a intensidade final do fenômeno amortizada pela resistência natural ("VRLeg") do indivíduo à *Simulator Sickness*.

Entretanto, durante a etapa de implementação uma limitação técnica foi detectada o que levou a uma nova revisão do modelo. Essa limitação está diretamente relacionadas à forma com que os dados de aceleração linear e angular do usuário são capturados, processados e transformados em informações para o avatar virtual. Em um sistema de realidade virtual ideal o sistema de *tracking* captura os dados do usuário e os transforma em coordenadas de posição e orientação sem ruídos e imperfeições. No entanto, isso não acontece no mundo real. Como explicado no capítulo 2, os dados capturados por IMUs como acelerômetros e giroscópios são imprecisos, possuem ruído e derivam com o tempo e temperatura. Esses dados passam por diversos filtros e por processos de *Sensor Fusion*, até serem convertidos para dados de orientação e posição de câmera do avatar virtual. Outras imperfeições desse processo são imprecisões numéricas e a latência natural dos sistemas. Esse quadro, enquanto de fato corresponde à real dissociação do usuário, também é influenciado pelas limitações do sistema de captura inercial o que leva a resultados com muito ruído quando analisados de forma discreta em cada momento do tempo. Um exemplo de uma alta dissociação discreta causada por ruído pode ser visto na Figura 13.

A solução adotada para minimizar esse problema foi uma mudança na forma de análise dos dados. Ao invés de realizar o cálculo de forma discreta para cada instante de tempo, foi implementado um sistema de análise em *snapshots* com uma amostra de dados (*Kernel*) em função do tempo. Uma questão fundamental é que a análise em *snapshot* não necessariamente, diminui a precisão do sistema para o desenvolvedor. É importante notar que a análise é executada em tempo real, com taxa fixada a 40 quadros por segundo, logo um *kernel* de 10 frames como o proposto, cria uma janela de 4 avaliações por segundo.

Para o melhor formato de unificação de dados de aceleração angular e linear 4 modos foram inicialmente propostos e avaliados: (i) A aplicação de filtro mediano separadamente em cada componente de aceleração do usuário e do avatar virtual. (ii) A aplicação de filtro máximo separadamente em cada componente do usuário e avatar virtual. (iii) A aplicação de filtro mediano aos resultados de dissociação discretos e (iv) a aplicação de filtro mediano aos resultados de dissociação discretos. A Figura 14 apresenta

Figura 13 - Dissociação discreta



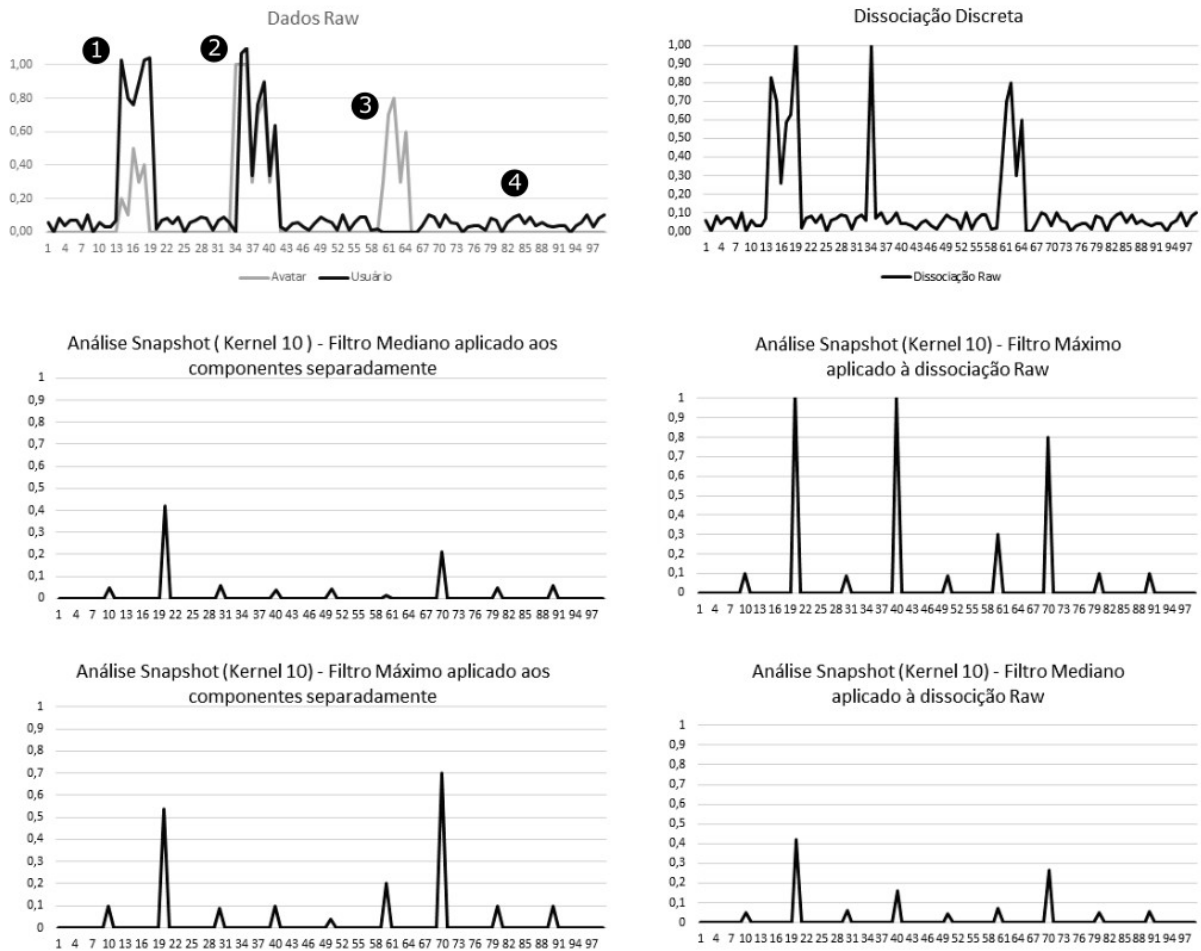
Legenda: Dissociação Discreta causada por ruído, erros de leitura e outros

gráficos de resultados da aplicação desses 4 filtros para comparação:

Para a escolha do melhor resultado e portanto do modelo de análise adotado foram averiguados os resultados em 4 pontos apresentados na Figura 14: (1) Dissociação parcial causada por problemas de *Tracking* e não correspondência de movimento, (2) dissociação causada por Latência do sistema, (3) dissociação real causada por característica da aplicação, erro de implementação ou falta de recurso (como *Positional Tracking*) e (4) dissociação causada por ruído.

Do ponto de vista do desenvolvedor, a detecção de algumas dessas características são mais relevantes do que outras, principalmente as do ponto (3), que indicam diretamente que uma certa funcionalidade implementada, ou momento da aplicação, causa alto grau de dissociação ou seja, quando estamos no extremo do espectro de dissociação. Outros dados porém, são menos relevantes pois não estão diretamente no seu escopo de

Figura 14 - Testes de Filtros



Legenda: Comparação da aplicação de Diversos filtros para o cálculo de dissociação.

análise e na sua capacidade de modificação. Por exemplo, o ponto (4) que indica o ruído natural do sistema e o ponto (2) indica um momento de dissociação causada por latência ou seja, pelo atraso entre o movimento do usuário e a conversão em dados para a câmera virtual. Geralmente, esse elemento não está no escopo de ação dos desenvolvedores de aplicações. Dessa forma, os pontos 3 e 1 são indicados como mais relevantes e, portanto, é desejado que reportem dissociações desse tipo com um alto grau de fidelidade, enquanto outros elementos menos relevantes podem ser filtrados.

Uma crítica possível para essa escolha é a de que o modelo proposto artificialmente diminui a importância de tipos específicos de dissociação, que também reconhecidamente, causam *Simulator Sickness* e são tão graves quanto outros tipos de dissociação. O objetivo de nosso modelo, entretanto, é fornecer uma base confiável para o desenvolvimento de um sistema de análise, de modo que desenvolvedores, de posse da melhor representação possível sobre o comportamento de suas aplicações, possam realizar avaliações da segu-

rança e da usabilidade. O objetivo deste trabalho não é portanto, uma representação médica precisa sobre o funcionamento e mecanismos biológicos da *Simulator Sickness*. Esse nível de precisão e representação não é nosso objetivo, em todo caso, em nossa proposta, estão disponíveis também, os dados *Raw* de aceleração e dissociação, que podem ser eventualmente utilizados para uma análise mais criteriosa do fenômeno.

Diversos trabalhos sobre *Simulator Sickness* apresentados por Rebenitsch e Owen (REBENITSCH; OWEN, 2016) apontam que não existe necessidade de que ambos as componentes Linear e Angular estejam agindo simultaneamente no organismo para que a *Simulator Sickness* ocorra, logo a intensidade do efeito não é a média das duas componentes, mas uma composição. Para nosso modelo escolhemos uma função Máximo entre as duas componentes, ou seja, o valor de dissociação total é o valor da maior componente dissociativa (linear ou angular). Dessa forma, eliminamos aberrações como a possibilidade de que exista uma dissociação máxima (100%) em uma das componentes, porém a dissociação total calculada é apenas de 50%.

Diante desse quadro, a função de análise escolhida para implementação é a de Filtro Máximo aplicado aos componentes separadamente. Ela não somente possui uma alta sensibilidade para dissociações do tipo (3) e (1) como também, possui pouca suscetibilidade para dissociações causadas por ruído e latência de sinal.

A formulação matemática do modelo final proposto é apresentado a seguir nas equações 7 a 13.

$$AcelLinAvatar_t = \max_{t*kernel}^{(t*kernel)+kernel} (|Max_{element}(\frac{\vec{A}_{AcelLin_i} * Vec\vec{Inf}}{MaxA_{AcelLin_i}})|) \quad (7)$$

$$AcelLinUser_t = \max_{t*kernel}^{(t*kernel)+kernel} (|Max_{element}(\frac{\vec{U}_{AcelLin_i} * Vec\vec{Inf}}{MaxU_{AcelLin_i}})|) \quad (8)$$

$$AcelAngAvatar_t = \max_{t*kernel}^{(t*kernel)+kernel} (|Max_{element}(\frac{\vec{A}_{AcelAng_i} * Vec\vec{Inf}}{MaxA_{AcelAng_i}})|) \quad (9)$$

$$AcelAngUser_t = \max_{i*kernel}^{(i*kernel)+kernel} (|Max_{element}(\frac{\vec{U}_{AcelAng_i} * Vec\vec{Inf}}{MaxU_{AcelAng_i}})|) \quad (10)$$

$$DisLinear_t = (|AcelLinAvatar_t - AcelLinUser_t|) * D_{LinInf} \quad (11)$$

$$DisAngular_t = (|AcelAngAvatar_t - AcelAngUser_t|) * D_{AngInf} \quad (12)$$

$$Sickness_t = f_{Sickness}(Max(DisLinear_t, DisAngular_t)) * (1 - VRLeg) \quad (13)$$

Outras discussões sobre o modelo implementado serão expostas no capítulo a seguir com a apresentação da Ferramenta de Análise.

4 FERRAMENTA DE ANÁLISE E MONITORAMENTO DA SIMULATOR SICKNESS

Tradicionalmente, o processo de QA (*Quality Assurance*) e testes durante o desenvolvimento de jogos e aplicações de realidade virtual, contam com uma bateria de testes realizados por profissionais (*Beta Testers*) e ferramentas que auxiliam na detecção de erros de código e/ou lógica (*Debuggers*). Para aplicações em realidade virtual questões como conforto e ergonomia do usuário necessitam ser avaliados tanto quanto outros problemas de codificação já que a *Simulator Sickness* e outros problemas fisiológicos podem inviabilizar a experiência do jogo. A seguir apresentamos um levantamento das principais técnicas de detecção e Medição da *Simulator Sickness*

4.1 Detecção e Medição de *Simulator Sickness*

O Desenvolvimento de aplicações de realidade virtual mais seguras passa pela possibilidade de detecção e avaliação da intensidade da *Simulator Sickness* causada nos usuários. Além de métodos informais, como a simples informação dos usuários após, ou durante o uso da aplicação, existem 3 métodos científicos que podem ser utilizados para essa avaliação: (i) Questionários, (ii) Avaliação de Instabilidade Postural e (iii) Avaliação de Estados Fisiológicos. A seguir, são descritas as principais vantagens e desvantagens de cada um desses métodos.

4.1.1 Avaliação usando questionários

A utilização de questionários é usual para a averiguação de problemas que envolvem estados psicológicos, percepção e sentidos, já que as experiências são qualitativas e não podem ser precisamente quantificadas. Neste sentido, o *Simulator Sickness Questionary* (SSQ) propõem uma metodologia de avaliação para os efeitos da *Simulator Sickness* usando uma escala de valores. O Questionário SSQ foi desenvolvido em 1993 por Kennedy et al. (1993) e é, até a atualidade, o modelo padrão para avaliar a *Simulator Sickness* (REBENITSCH; OWEN, 2016). Sua metodologia consiste em uma tabela com sintomas onde são atribuídos pesos de 0 a 3 de acordo com a intensidade sentida pelo usuário. Esses sintomas são classificados em 3 categorias principais: (N) - Náuseas. (O) Problemas Oculomotores e (D) Desorientação (KENNEDY et al., 1993).

As principais vantagens do ponto de vista da utilização do questionário SSQ por parte dos desenvolvedores são: (i) Baixo Custo de implantação; (ii) Não requer equipa-

mentos externos e (iii) É uma metodologia reconhecida como padrão para esse tipo de avaliação.

As principais desvantagens são: (i) As avaliações são subjetivas inviabilizando a comparação entre indivíduos; (ii) A avaliação é realizada após o uso da aplicação, não sendo possível portanto identificar exatamente que áreas, ou mecânicas da aplicação, causam os efeitos da *Simulator Sickness*.

4.1.2 Avaliação usando a análise de instabilidade postural

A teoria de instabilidade postural citada no capítulo 2 apresenta a possibilidade de avaliação do nível de *Simulator Sickness* em indivíduos por meio da análise de sua instabilidade postural, ou seja, da incapacidade de, ao longo do tempo, manter uma postura alinhada com o horizonte. Enquanto esse método apresenta bons resultados para previsão de *Simulator Sickness*, ele requer uma série de equipamentos específicos para comparação e análise postural (REBENITSCH; OWEN, 2016). Além disso, assim como os questionários, não existe relação direta entre a instabilidade postural momentânea e o elemento causador da *Simulator Sickness*, sendo portanto um bom instrumento de avaliação para uma sessão de exibição, pois não informa aos desenvolvedores exatamente que mecânicas, ou áreas da aplicação, causam mais ou menos *Simulator Sickness*.

4.1.3 Avaliação usando a análise de estados fisiológicos

De forma análoga aos sistemas de avaliação, que verificam a instabilidade postural, a avaliação por meio de análise de estados fisiológica considera os efeitos secundários (e fisiológicos) da *Simulator Sickness* como: o aumento da frequência cardíaca (conhecido como intervalo R-R), de pressão sanguínea, de temperatura corporal e a análise de eletroencefalograma (EGG). Alguns problemas inerentes ao modelo de avaliação por instabilidade postural também se mantêm para este modelo de avaliação: (i) A necessidade de equipamentos específicos como EGGs; medidor de frequência cardíaca; etc e (ii) a dificuldade de identificar que elementos/funcionalidades da aplicação estão causando *Simulator Sickness*.

Assim, todos os métodos existentes para detecção e avaliação da *Simulator Sickness* apresentam fragilidades e não ofereçam ferramentas que automatizem a captura de dados, ou apontem exatamente os níveis e os elementos que causam a *Simulator Sickness*. Visando preencher esta lacuna, a seguir, é descrita uma ferramenta de análise do potencial de geração de *Simulator Sickness* em programas que geram visualização 3D.

4.1.4 Uma nova proposta para avaliação de Simulator Sickness

Atualmente, a ferramenta mais popular para avaliação de *Simulator Sickness* é o questionário SSQ (*Simulator Sickness Questionnaire*) (KENNEDY et al., 1993). Como apresentado anteriormente, apesar de sua importância reconhecida, a utilização de questionários para avaliação não permite a localização exata do momento do evento ou da ação que desencadeou a *Simulator Sickness* e nem a estimativa da variação de sua intensidade, avaliando apenas a experiência geral de utilização. Desse modo, o uso do questionário torna inviável a tarefa de detectar os elementos causadores da *Simulator Sickness* dentro das aplicações, sendo necessário uma outra abordagem.

Observou-se que nenhum dos métodos utilizados nas pesquisas científicas recentes supre totalmente as necessidades dos desenvolvedores de ferramentas para análise de *Simulator Sickness* em aplicações de realidade virtual. Tendo em vista que as perspectivas são de que somente melhorias de *hardware* não irão solucionar o problema em todos os casos (principalmente a curto prazo onde soluções como *Positional Tracking* não estão disponíveis para plataformas como VR Mobile), encontrar meios de detectar e amenizar os efeitos da *Simulator Sickness* torna-se fundamental para que desenvolvedores possam criar aplicativos de realidade virtual seguros e confortáveis para uso geral.

A seguir, de modo a suprir essa necessidade, é apresentada uma proposta de ferramenta de análise da *Simulator Sickness* que implementa o modelo computacional apresentado no Capítulo 3 de modo a identificar em tempo real, as condições de dissociação conhecidas por causar *Simulator Sickness*.

4.2 Ferramenta de Análise da *Simulator Sickness* em HMDs de realidade virtual

O SSA (*Simulator Sickness Analyser*) busca suprir as necessidade apresentadas anteriormente, fornecendo para os desenvolvedores diversos gráficos que auxiliam na identificação de mecânicas, comportamentos e/ou áreas do sistema, que eventualmente, poderiam causar *Simulator Sickness*. Essa avaliação pode ser realizada em tempo de desenvolvimento e de testes do aplicativo.

Por meio do SSA pretendemos resolver uma das principais limitações dos testes de *Simulator Sickness* tradicionais como o SSQ (CARVALHO¹; COSTA¹; NARDI¹, 2011), que não avaliam áreas específicas da aplicação e sim, a experiência como um todo, tornando difícil a identificação dos elementos causadores dos problemas associados.

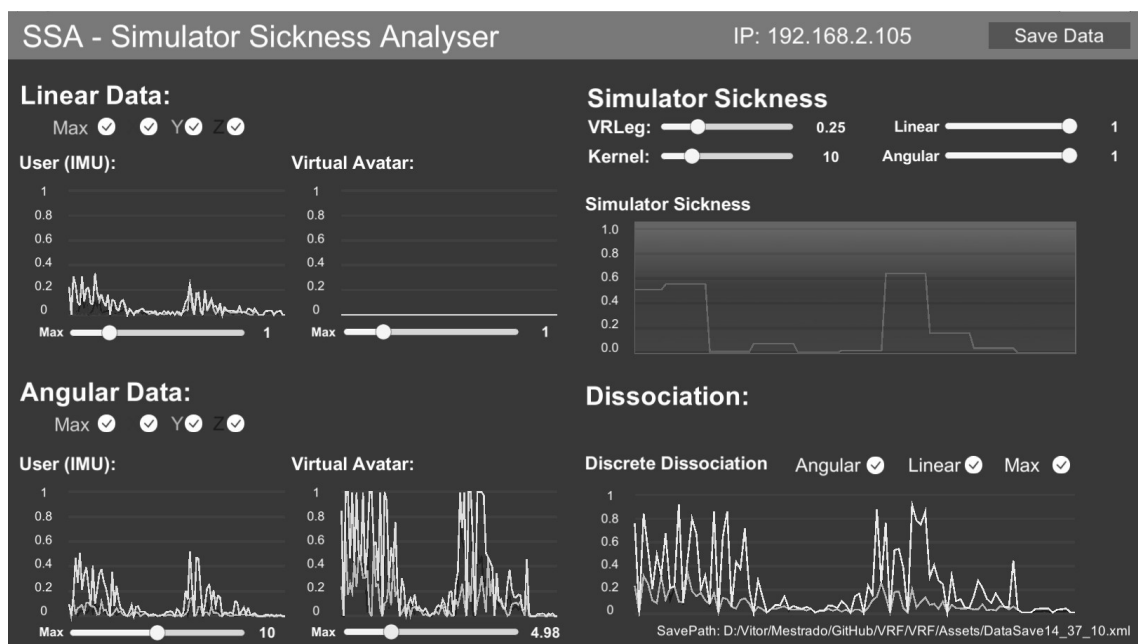
O sistema proposto é baseado no modelo computacional da *Simulator Sickness* apresentado no Capítulo 3 e funciona como um aplicativo *standalone* que se conecta

por protocolo UDP (User Datagram Protocol) ⁹ à aplicação, esteja ela executando no dispositivo local, ou remotamente. O SSA recebe os dados *RAW* de aceleração linear e angular do usuário e do avatar virtual, processa e apresenta as seguintes informações:

- Aceleração Linear do Usuário e do Avatar Virtual. Dados de eixos específicos e máxima;
- Aceleração Angular do Usuário e do Avatar Virtual. Dados de eixos específicos e máxima;
- Dissociação Discreta Linear, Angular e Máxima;
- Estimação da Simulator Sickness

Uma Imagem do Analisador em funcionamento pode ser vista na Figura 15, onde, do lado esquerdo da tela são apresentados os dados de aceleração linear e angular do avatar e do usuário e, do lado direito, são apresentados os níveis de dissociação e *Simulator Sickness*.

Figura 15 - SSA - Simulator Sickness Analyser

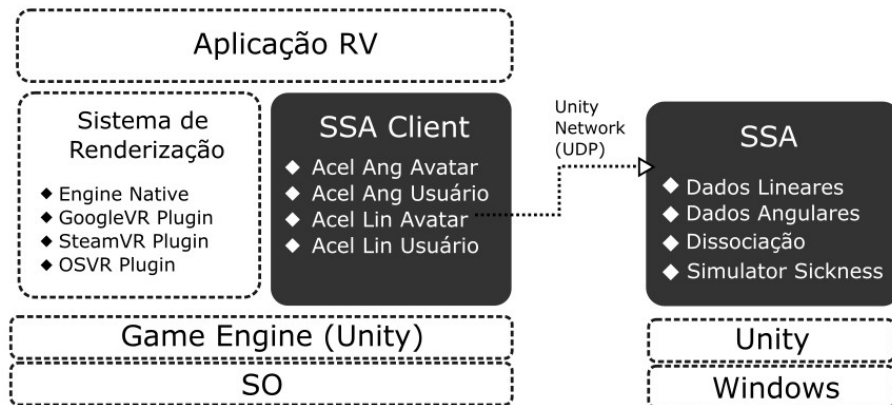


⁹ UDP ou User Datagram Protocol é um protocolo de comunicação de rede utilizado geralmente quando velocidade é preferível em relação a confiança de dados. Muito utilizado em Games e outras aplicações interativas

4.2.1 Arquitetura

O sistema desenvolvido possui dois módulos principais. Uma aplicação *standalone* para o sistema de análise e exibição gráfica e um módulo cliente que se integra à aplicação ao qual se deseja analisar. A arquitetura base pode ser vista na figura 16.

Figura 16 - SSA - *Simulator Sickness Analyser*



Legenda: Arquitetura do Sistema de Análise de Simulator Sickness

O objetivo principal do *SSA Client* é passar as informações de aceleração do usuário e do avatar virtual para o aplicativo *standalone* (SSA). A princípio, a ferramenta foi proposta para executar em qualquer *Game Engine* (bastando apenas ter o *SSA Client* da *engine*) e acoplada com quaisquer sistemas de HMD. Entretanto, até o momento só foi implementado o módulo cliente para a ferramenta da Unity em dispositivos móveis. Nesse caso, o sistema é compatível com o Google Cardboard, o Google Daydream e o GearVR.

Essa escolha inicial pelo suporte a dispositivos móveis se deve a fatores como custo desses equipamentos e acessibilidade conforme descrito na sessão 1.3.

Sistemas de *Positional Tracking* externos como NOLO (LYROBOTICX, 2017), VICOVR (VICOVR, 2017) e Optitrack (NATURALPOINT, 2017) podem ser utilizados sem modificações no cliente, já que os dados de aceleração linear do avatar (gerados a partir do *Positional Tracking*), continuarão sendo calculados a partir da sua movimentação, e não, dos dados *raw* do dispositivo. Os dados de aceleração linear do usuário continuarão sendo capturados a partir do acelerômetro do dispositivo móvel.

A ferramenta Unity foi a contemplada nesta proposta devido a sua grande representatividade no desenvolvimento de aplicações de realidade virtual (correspondendo a 47% do mercado mundial) (SILVA et al., 2016) e a sua facilidade de comunicação UDP através do *Unity Networking*. No futuro, outros módulos cliente poderão ser desenvolvidos para outras *Game Engines* como *Unreal* e *CryEngine*, de modo que elas também possam

se conectar ao SSA.

A comunicação entre o módulo cliente e o SSA (Cliente e Servidor) é realizada por meio de uma rede local, de modo que o endereço IP do computador onde o SSA está sendo executado possa ser transmitido para o cliente.

Isso pode ser feito usando uma configuração estática no *Inspector*¹⁰ do módulo cliente ou "on the fly" em uma tela de configuração da aplicação, como apresentado na Figura 17.

Figura 17 - SSA - Simulator Sickness Analyser



Legenda: Configuração de localização

A aplicação obtém e envia os dados de aceleração linear e angular do avatar 40 vezes por segundo. Isso é feito por meio da movimentação do avatar virtual (Calculado com dados oriundos do componente *Transform*). Desse modo, obrigatoriamente, o componente *SSA Client* precisa estar anexado ao avatar virtual, para capturar esses dados. As aplicações de realidade virtual para equipamentos móveis, como as que utilizam o GoogleVR e o OculusVR (GearVR), não dispõem de *Positional Tracking*, isso implica que os gráficos de aceleração linear do avatar virtual correspondem somente à movimentação aplicada artificialmente, como em sistemas de locomoção e uso de dispositivos de entrada externos, por exemplo: os *joysticks*.

Para aplicações para dispositivos móveis (utilizando o GoogleVR) o módulo cliente se conectará usando uma rede local. Para as aplicações de realidade virtual, que são processadas pelo mesmo sistema onde o SSA está sendo executado, basta a configuração

¹⁰ Inspector na Unity é um painel de configuração de propriedades de scripts e objetos

para o endereço "localhost" ou seja: 127.0.0.1 (IPv4).

4.2.2 Dados Raw Angulares e Lineares

O Sistema dispõe de visualização de Dados Angulares e Lineares provenientes dos usuários, recolhidos diretamente das IMUs dos HMDs e dos avatares virtuais calculados pela diferença de deslocamento entre frames e a diferença de orientação (Quaternion) entre frames.

Esses valores são então, normalizados e apresentados em um gráfico de linha como pode ser visto na Figura 18. Os valores de normalização podem ser configurados usando Sliders na interface, seguindo um protocolo de calibragem. Eles correspondem aos seguintes parâmetros do modelo computacional proposto no capítulo anterior:

- Aceleração Linear e Angular Máxima do Usuário ($\tilde{\mathbf{Max}}\mathbf{U}_{\text{AcelLin}_i}$ e $\tilde{\mathbf{Max}}\mathbf{U}_{\text{AcelLin}_i}$ respectivamente);
- Aceleração Linear e Angular Máxima do Avatar Virtual ($\tilde{\mathbf{Max}}\mathbf{A}_{\text{AcelLin}_i}$ e $\tilde{\mathbf{Max}}\mathbf{A}_{\text{AcelLin}_i}$ respectivamente).

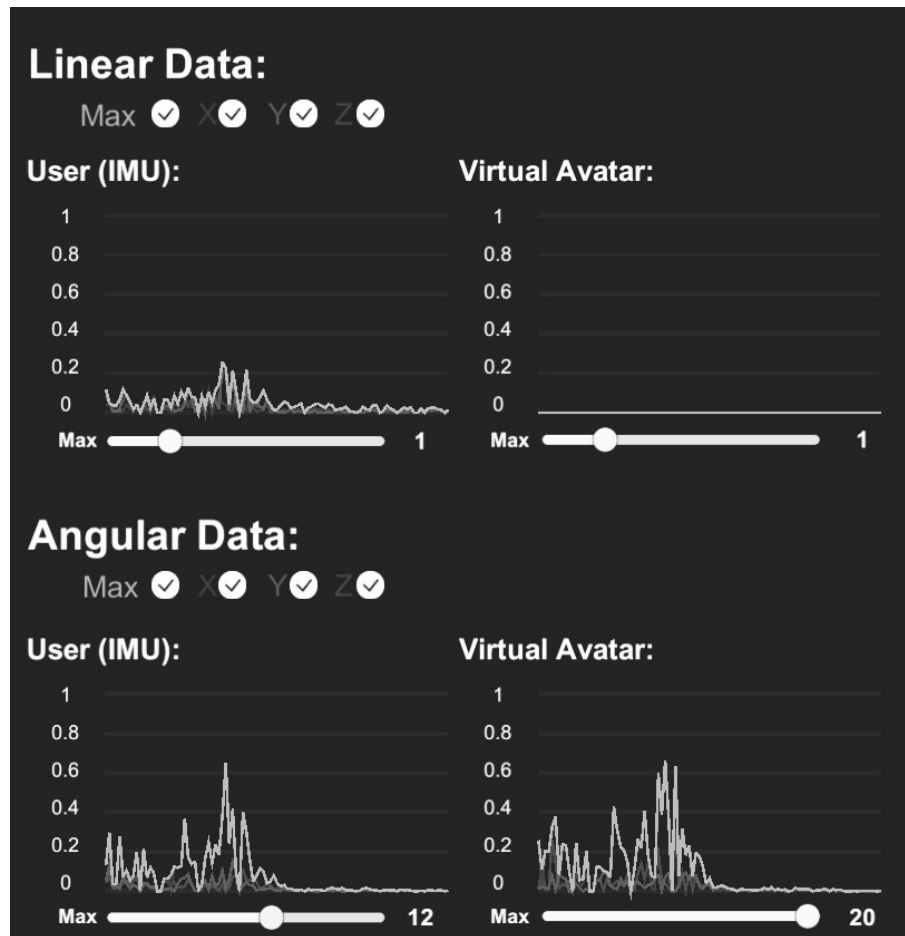
É possível ainda, visualizar somente eixos específicos e, também, o máximo valor entre todos os eixos.

Os gráficos gerados fornecem diferentes informações. Por exemplo, na Figura 18 é possível observar a grande variação de aceleração linear no usuário e a falta de correspondência no avatar virtual. Nesse caso, isso se dá pela falta de *Positional Tracking* no sistema. Essas são condições que, segundo os modelos apresentados no Capítulo 3 seriam propícias para incitar Cinetose no usuário. De fato, a falta de *Positional Tracking* em HMDs é apontado com um dos principais fatores causadores de *Simulator Sickness* já que, qualquer movimento de deslocamento do usuário no ambiente não possui correspondência em seu avatar virtual (OCULUSVR, 2016).

4.2.3 Dados de Dissociação

O gráfico de dissociação (Figura 19) apresenta o módulo da diferença entre as acelerações angulares e lineares com relação à sua componente Real (coletada do usuário por meio dos IMUs) e a componente virtual (coletada do avatar virtual). O gráfico de dissociação máxima possibilita obter uma análise discreta do nível de dissociação e do ruído geral do sistema. Foi observado que o gráfico de dissociação é muito suscetível aos ruídos naturais do sistema e a configurações equivocadas nos valores de normalização de

Figura 18 - Dados de Aceleração Linear e Angular



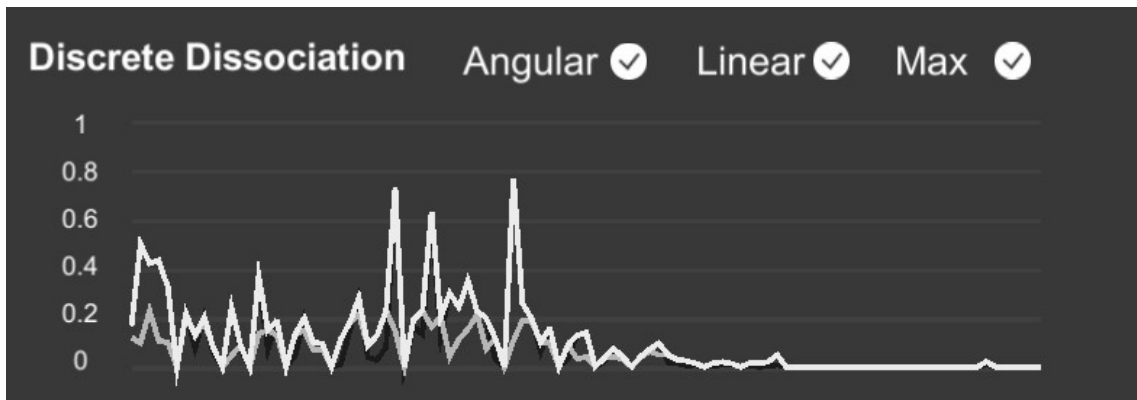
Legenda: Dissociação causada pela falta de *Positional Tracking* identificada na visualização Raw de dados de aceleração Linear

aceleração linear e angular máxima. O processo de calibragem que será apresentado na sessão 5.2 deve portanto, ser seguido para minimizar distorções nas medições.

4.2.4 Dados de Simulator Sickness

O último gráfico apresentado pelo SSA é o gráfico de *Simulator Sickness* gerado pelo modelo apresentado no Capítulo 3. No sistema existem parâmetros fixos (hardcoded, ou pré-configurados antes da compilação da ferramenta SSA *standalone*) e parâmetros que podem ser configurados *on-the-fly* durante a execução do sistema. Os parâmetros do sistema são:

Figura 19 - Dados de Dissociação



Legenda: Dissociação discreta calculada entre a dissociação do usuário e do avatar virtual

- Influência de Vetores para o Máximo Elemento (VecInf);
- Influência da Dissociação Linear e Angular ($\mathbf{D}_{\text{LinInf}}$ e $\mathbf{D}_{\text{AngInf}}$) respectivamente;
- Função de Transferência ($\mathbf{f}_{\text{Sickness}}$);
- Kernel do filtro Máximo;
- (Parâmetro de resistência do usuário (VRLeg)).

Para o parâmetro de configuração da influência de eixos específicos foi adotada a opção mais conservadora, de acordo com a teoria apresentada no Capítulo 3, onde nenhum eixo foi adotado como preferencial. O valor do campo foi então fixado em $[1, 1, 1]$. Porém, incluímos a opção de dissociações preferenciais ao cálculo, e neste caso, os valores da dissociação Linear e Angular são ambos configurados na interface.

A função de transferência escolhida foi obtida da curva *Cúbica Easing InOut*, que foi apresentada no Capítulo 3. Ela está fixada, sem possibilidade de configuração na aplicação, mas futuramente, esse parâmetro pode ser mostrado na interface.

Por último, os parâmetros Kernel e VRLeg podem ser configurados manualmente na interface. Quanto maior o valor do Kernel, menos precisa no tempo será a avaliação, já que os dados serão filtrados por mais tempo. Um valor 1 no Kernel corresponde a uma avaliação discreta, com a função de transferência aplicada. O valor do parâmetro VRLeg é um amortizador de forma que, quanto maior o valor do parâmetro, menor será o resultado de Simulator Sickness no gráfico. A Figura 20 apresenta o gráfico de *Simulator Sickness* na aplicação. O gráfico representa a intensidade de Simulator Sickness calculada pelo modelo, é possível variar a influência Linear e Angular aplicada ao modelo bem como o valor de VRLeg e o Kernel do Filtro aplicado .

Figura 20 - Dados de Simulator Sickness



Legenda: Simulator Sickness calculada entre a dissociação do usuário e a do avatar virtual

O SSA apresenta também, uma função de exportação dos dados em formato XML. Caso o usuário queira realizar análises externas, foi preparada uma planilha XSL, previamente configurada, para importação dos dados. Os arquivos XML são salvos na pasta da aplicação, de acordo com o caminho (*path*) informado no rodapé. Como o limite de linhas do MS Excel 2017 é de 1,048,576 linhas, e como o sistema gera 40 dados por segundo, temos aproximadamente 436 minutos ininterruptos de gravação, valor muito maior do que o necessário para uma avaliação com o sistema. Os arquivos XML exportados foram otimizados e atualmente, ocupam por volta de 2Mb por minuto de gravação. Um exemplo dos dados carregados na planilha pode ser visto na Figura 21.

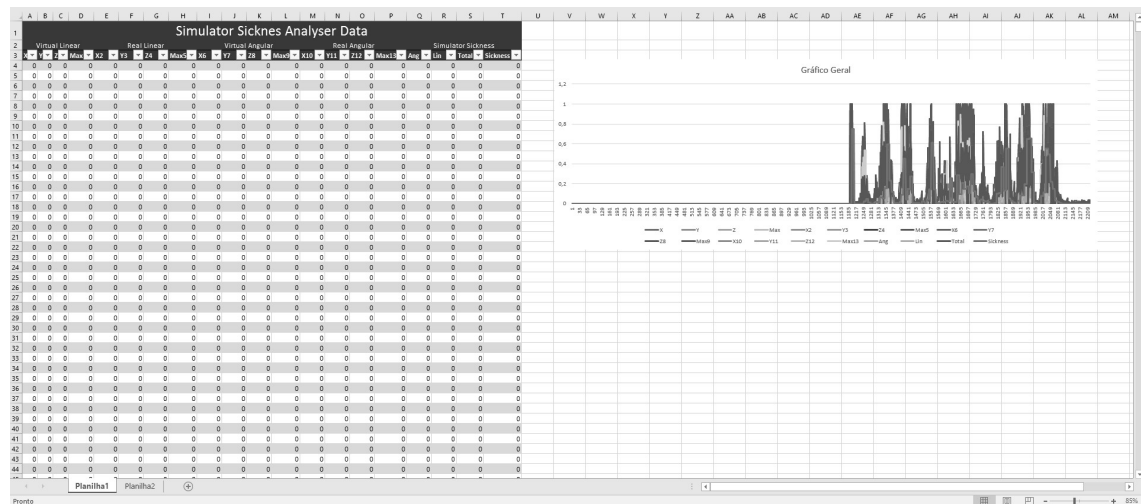
A seguir, é apresentado um conjunto de testes que foram executados com a ferramenta e a análise de resultados obtidos.

4.2.5 Utilização em um Ambiente de Produção

O Objetivo final do SSA é ser utilizado efetivamente por empresas em um ambiente de desenvolvimento. A sequência de passos para a implementação do SSA no processo de testes e avaliação de um software é a seguinte:

- Instalar o pacote SSA Client no projeto
- Adicionar o prefab SSA Client na cena que será avaliada

Figura 21 - Dados Exportados para excel



Legenda: Dados exportados em formato XML e importados em planilha excel

- Configurar no cliente dados de rede como IP do servidor onde estará rodando o Analisador
- Executar o processo de calibração
- Executar a Aplicação local ou mobile, neste ultimo caso, garantindo comunicação wireless entre o servidor e o cliente.
- Verificar áreas de maior incidência de Simulator Sickness nos gráficos e associar isso a elementos da aplicação como mecânicas específicas ou áreas do cenário
- Após recolhido os dados, esses podem ser exportados para formato XML para futura análise

5 AVALIAÇÃO DO SSA EM UM AMBIENTE EXPERIMENTAL

Para a avaliação do sistema foram desenvolvidos experimentos com voluntários. Esses experimentos foram realizados nas instalações, e em parceria, com o VISGRAF/IMPA e tiveram como principal objetivo, avaliar a capacidade do SSA de indicar analiticamente, previsões da SRT e situações que os manuais de boas práticas de HMDs indicam empiricamente, como sendo causadores da *Simulator Sickness*. Os experimentos foram avaliados e aprovados previamente pelo comitê de ética da UERJ.

Os experimentos se concentraram em 3 áreas de avaliação:

- Avaliação de *Simulator Sickness* em modelos com locomoção;
- Avaliação de *Simulator Sickness* em Aplicações sem locomoção;
- Avaliação de latência.

5.1 Pré-teste

O Objetivo do pré-teste foi a calibração das cenas e correções de erros no sistema antes da realização dos experimentos controlados. O pré-teste foi realizado na UERJ com dois voluntários, utilizando o dispositivo mobile LG G3 e o HMD BoboVR Z4.

Durante o pré-teste foi decidido o modelo de avaliação para o teste de *Positional Tracking* e *joystick*. Alguns problemas foram identificados e suas soluções são descritas a seguir:

- Correções no sistema de *Fuse Click*¹¹ do experimento de aceleração angular;
- Foi decidido a utilização de VRLeg com valor 0 para todos os testes pois, posteriormente, de posse dos dados, é possível simular qualquer perfil de usuário;
- Foi realizada uma mudança no formulário do experimento SSQ, trocando o quesito Vertigem por Desorientação Espacial;
- Foi sugerido e implementado um temporizador para marcar o tempo de execução do experimento;
- Foi detectado e corrigido problemas com o sistema de exportação de dados XML.

¹¹ Fuse Click é um modelo de click com ponteiro temporizado utilizado por gaze pointers.

5.2 Protocolo de Calibração

O Protocolo de configuração do SSA consiste em encontrar os valores de normalização. Ou seja, os valores máximos de aceleração linear e angular do aplicativo e do usuário. Como esses valores podem ser arbitrários, foi definido um protocolo de acordo com cada aplicação. O protocolo proposto possui 4 etapas:

- Encontrar o valor de Aceleração Linear do Avatar;
- Encontrar o melhor valor de aceleração linear do usuário relativo ao anterior;
- Encontrar o valor de Aceleração Angular do Usuário;
- Encontrar o melhor valor de aceleração angular do avatar relativo ao anterior.

O objetivo geral do processo de calibragem é causar no gráfico os seguintes comportamentos:

- Quando o valor de aceleração do usuário e do avatar for máximo, o gráfico será máximo;
- Quando não existe dissociação óbvia, por exemplo a provocada pela falta de *Positional Tracking*, então o gráfico de dissociação e de *Simulator Sickness* tem de ser mínimo.

A seguir, o processo de calibragem para os 4 parâmetros é descrito.

5.2.1 Aceleração Linear do Avatar

A aceleração linear do avatar virtual é a máxima aceleração que o avatar virtual consegue executar na aplicação. A aceleração é portanto, definida pelo modelo de locomoção adotado, como por exemplo: teleporte, *joystick* ou *Positional Tracking*. A velocidade do ser humano mais rápido é de 45km/h ou 12,5m/s (BBC, 2010), ou seja, saindo do repouso e em 1 segundo atingido essa velocidade, teremos uma aceleração máxima por frame de aproximadamente $0.2 \left(\frac{12.5m/s}{60frames} \right)$. Em nossos testes 0.2 parece de fato, o melhor valor para representar a aceleração máxima de um avatar virtual humano, usando teleporte e *Positional Tracking*. Em outras aplicações onde a aceleração máxima é determinada por um joystick com o avatar se locomovendo no ambiente com aceleração, a aceleração máxima é determinada pela maior aceleração que o modelo de movimentação impõe ao avatar. Nossa recomendação inicial é para valores entre 0.1 (6m/s) e 0.2 (12m/s). Em todos os nossos experimentos utilizamos o valor 0.2.

5.2.2 Aceleração Linear do Usuário

A aceleração linear do usuário é a máxima aceleração que o usuário consegue executar na aplicação utilizando um HMD. Como esse valor pode variar conforme o acelerômetro do dispositivo, a melhor forma de obter esse valor é manipulando o dispositivo, aplicando a ele a maior aceleração possível e configurando o valor onde o gráfico de aceleração se torna máximo, quando é aplicado a ele a máxima aceleração. Para os dispositivos móveis testados (LG G3, Samsung Galaxy S7, Lenovo Vibe K5) o valor 1.0 corresponde a aceleração máxima que pode ser executada e também melhor corresponde nos gráficos de dissociação o valor 0.2 para aceleração linear do avatar.

5.2.3 Aceleração Angular do Usuário

A aceleração angular do usuário é o valor máximo de aceleração angular que o usuário consegue desenvolver girando a cabeça. Esse valor pode variar conforme o giroscópio do dispositivo. O protocolo de calibragem desse parâmetro é similar ao descrito acima, manipulando o dispositivo e variando o valor de normalização até que a aceleração máxima no gráfico corresponda à aceleração máxima provocada no dispositivo. Para esse processo de calibragem é recomendado a manipulação manual do dispositivo, já que vestir o HMD e girar a cabeça com a maior aceleração possível pode provocar tonturas e desorientação, além do risco de quedas e acidentes. Em nossos testes utilizamos o valor 2.0 que corresponde a um giro de 2 graus por frame ao quadrado, ou 120 graus por segundo ao quadrado de aceleração angular.

5.2.4 Aceleração Angular do Avatar

A aceleração angular do avatar é o valor máximo de aceleração angular que o avatar virtual consegue desenvolver girando a cabeça. A forma adotada para calibragem desse parâmetro é encontrar o valor que corresponde, no gráfico de dissociação, à aceleração angular do usuário. Em nossos testes foi adotado o valor 9.0.

5.2.5 Aumento de sensibilidade

Aumentar a sensibilidade do sistema corresponde a diminuir os valores de normalização além do ideal. Isso pode ser executado em testes onde é necessário detectar elementos como latência, porém, quanto maior a sensibilidade do gráfico, mais sujeito

ele estará também à ruído. Enquanto os filtros e a função de transferência do modelo lidam com a maior parte dos ruídos naturais do sistema, conforme os ruídos representarem valores maiores e mais instáveis, o modelo também se torna mais instável acusando mais *Simulator Sickness*. Nossa recomendação, portanto, é evitar utilização de valores de normalização abaixo do ideal.

5.3 Experimentos

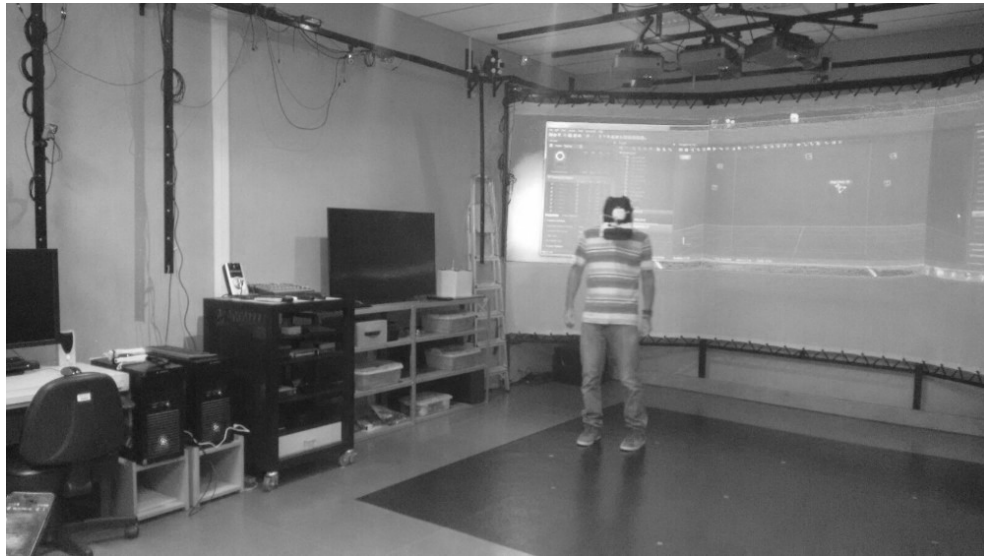
Os Experimentos foram realizados em parceria com o VISGRAF/IMPA, em suas instalações. Os testes foram feitos com 6 voluntários com graus variados de experiência em aplicações de realidade virtual, idades entre 23 e 56 anos, sendo 4 do sexo masculino e 2 do feminino. Todos os testes foram realizados com o Samsung Galaxy S7 configurado no modo de desenvolvedor do GearVR para utilização do *display* de baixa persistência e utilizando o HMD BoboVRZ4 (Figura 22) que utiliza o padrão Google Cardboard. Também, foi utilizado para os testes de *Positional Tracking* o sistema Optitrack (Figura 23), disponibilizado pelo IMPA/VISGRAF.

Figura 22 - BoboVR



Para a realização dos experimentos foi elaborado um conjunto de ferramentas (gaze pointers, teletransporte, interação com menus e outros) para aplicações em realidade virtual, de forma a minimizar os efeitos da *Simulator Sickness* (SILVA et al., 2016). Esse conjunto de ferramentas está disponível separadamente, com nome de SAFEVR.

Figura 23 - Optitrack



Legenda: Ambiente de captura utilizando optitrack no IMPA/VISGRAF

As aplicações foram desenvolvidas com a Unity 5.5 utilizando o SAFEVR para elementos como Teletransporte, Sistema de Interação com Retículo e *Fuse Click*. Para o sistema de renderização stereo foi utilizado o sistema GoogleVR, que é responsável por gerar as imagens stereoscópicas para o padrão Google Cardboard.

Durante os experimentos cada voluntário se submeteu a 5 sessões de testes de 2 minutos cada. Depois de cada sessão, o voluntário respondeu a uma adaptação do questionário SSQ, que está sendo utilizado como parâmetro para comparação dos dados obtidos e registro da percepção do usuário sobre os experimentos

Os experimentos foram separados em 3 categorias conforme a área de análise.

- Aceleração em modelos de locomoção: Teletransporte, *Joystick* e *Positional Tracking*;
- Aceleração e *Head Tracking* em HMDs sem Locomoção;
- Latência Artificial.

A avaliação do SSA foi realizada basicamente através da comparação entre os resultados produzidos pela ferramenta e a percepção do usuário que foi captada através do preenchimento de questionários SSQ. O Apêndice 1 contém o formulário SSQ utilizado durante os experimentos, já o Apêndice 2 contém o termo de consentimento aprovado pelo comitê de ética e assinado pelos voluntários.

Para todos os experimentos apresentados os dados obtidos pela ferramenta SSA foram exportados em formato XML e convertidos para tabelas das quais os seguintes

dados foram extraídos:

- Para cada voluntário (i)
 - Intensidade Média de Simulator Sickness:

$$Im_i = \frac{\sum_{t=1}^{Tfinal_i} SSA_i}{Tfinal_i} \quad (14)$$

- Período de tempo durante o experimento em que a intensidade de Simulator Sickness foi maior do que 50%:

$$I50_i = \frac{\sum_{t=1}^{Tfinal_i} fracI50_t}{Tfinal_i} \quad (15)$$

$$fracI50_t(i, t, SSA_i) = \begin{cases} 1, & \text{Se } SSA_i \geq 50\% \\ 0, & \text{Se } SSA_i < 50\% \end{cases} \quad (16)$$

- Período de tempo durante o experimento em que a intensidade de Simulator Sickness foi maior do que 90%

$$I90_i = \frac{\sum_{t=1}^{Tfinal_i} fracI90_t}{Tfinal_i} \quad (17)$$

$$fracI90_t(i, t, SSA_i) = \begin{cases} 1, & \text{Se } SSA_i \geq 90\% \\ 0, & \text{Se } SSA_i < 90\% \end{cases} \quad (18)$$

- Dados Agrupados

- Intensidade Média Máxima entre todos os participantes:

$$Im_{totalMax} = \max_{1 \leq i \leq 6} (Im_i) \quad (19)$$

- Intensidade Média Mínima entre todos os participantes:

$$Im_{totalMin} = \min_{1 \leq i \leq 6} (Im_i) \quad (20)$$

- Média aritmética das intensidades médias dos participantes:

$$Im_{total} = \frac{\sum_{i=1}^{i=6} Im_i}{6} \quad (21)$$

- Período Máximo de Dissociação acima de 50% entre os participantes:

$$I50_{totalMax} = \max_{1 \leq i \leq 6} (I50_i) \quad (22)$$

- Período Mínimo de Dissociação acima de 50% entre os participantes:

$$I50_{totalMin} = \min_{1 \leq i \leq 6} (I50_i) \quad (23)$$

- Período Médio de Dissociação acima de 50% entre os participantes:

$$I50_{total} = \frac{\sum_{i=1}^{i=6} I50_i}{6} \quad (24)$$

- Período Máximo de Dissociação acima de 90% entre os participantes:

$$I90_{totalMax} = \max_{1 \leq i \leq 6} (I90_i) \quad (25)$$

- Período Mínimo de Dissociação acima de 90% entre os participantes:

$$I90_{totalMin} = \min_{1 \leq i \leq 6} (I90_i) \quad (26)$$

- Período médio de Dissociação acima de 90% entre os participantes:

$$I90_{total} = \frac{\sum_{i=1}^{i=6} I90_i}{6} \quad (27)$$

No final todos esse dados são apresentados como porcentagem.

5.3.1 Avaliação de dissociação em modelos de locomoção

Atualmente uma das principais questões em aberto em sistemas de realidade virtual diz respeito aos modelos de locomoção em ambientes virtuais. Soluções propostas vão desde novos hardwares como o Virtuix (2017) até soluções puramente de software, como a utilizada neste experimento. De forma geral, é consenso entre a mídia especializada,

que essa questão é um dos principais entraves para o desenvolvimento de *games* e outras aplicações (HAYDEN, 2016; SKARREDGHOST, 2017; CARBOTTE, 2016).

Os problemas de se desenvolver um sistema de locomoção confortável e responsivo em ambientes de realidade virtual são claros à luz da *Sensory Rearrangement Theory*, pois, na maioria dos casos, o deslocamento físico do usuário não corresponderá ao deslocamento do avatar virtual, não importando o tipo de modelo de navegação adotado. Mesmos nos casos ideais, em que existe *Positional Tracking* e o ambiente virtual é similar ao ambiente real disponível para locomoção do usuário, ainda existem problemas de latência e ruído provocado pelos vários passos de *sensor fusion* e filtros, até a posição do usuário ser convertida em uma posição similar para o avatar virtual.

O objetivo desse experimento foi avaliar o SSA com base nas predições feitas pela *Sensory Rearrangement Theory* e nas avaliações empíricas disponibilizados pelos manuais de boas práticas dos HMDs, como o da OculusVR (2016). Para isso foram comparados 3 modelos:

- Locomoção com Teletransporte;
- Locomoção usando um *Joystick*;
- Locomoção direta com *Positional Tracking*.

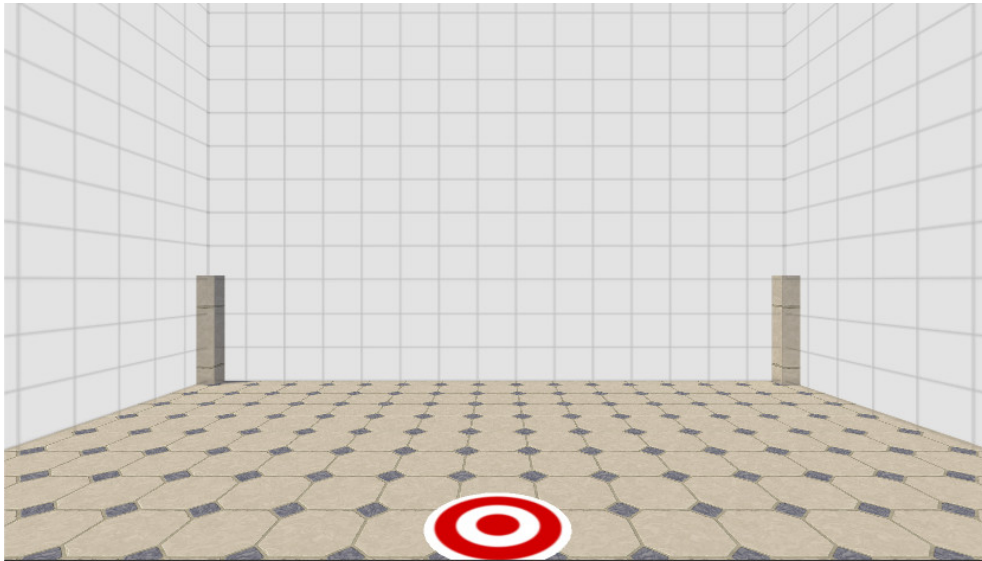
5.3.1.1 Metodologia

Para esse experimento foram desenvolvidos 3 cenários de avaliação, um para cada modelo de locomoção. Cada voluntário foi submetido ao teste nos 3 cenários durante um período de 2 minutos em cada um. Cada um dos testes foi executado para todos os voluntários antes de seguir para o próximo teste, mantendo assim um tempo mínimo de 15 minutos entre cada teste, para cada voluntário.

O primeiro teste realizado foi o de Locomoção utilizando teletransporte. Os voluntários foram orientados a encontrar e se locomover com teletransporte utilizando o *gaze pointer*. Cada vez que o usuário se teletransportava para o alvo, uma nova localização era gerada randomicamente. O diâmetro de movimentação do alvo pelo cenário era de 2 metros, para mimetizar as limitações de espaço físico do teste de *Positional Tracking* (Figura 24).

O segundo teste executado foi o de locomoção utilizando *Joystick*. Nesse experimento foi exibido um cenário com um caminho quadrado de 2x2 metros demarcado no chão, como pode ser visto na Figura 25. Os voluntários foram orientados a seguir essa demarcação utilizando um *Joystick* para movimentação. Quando o botão analógico era movido para frente o usuário acelerava para a direção apontada pelo *gaze pointer*. A

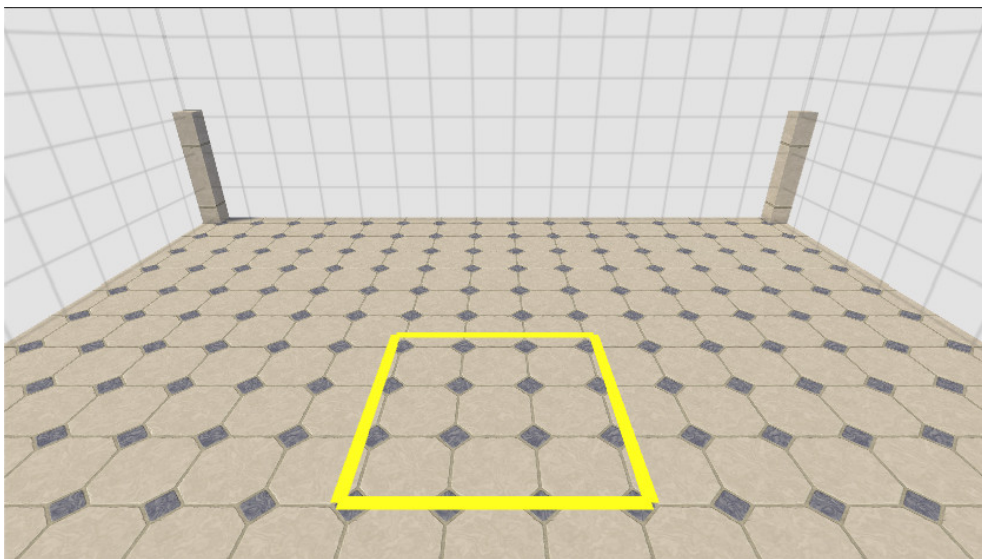
Figura 24 - Imagem da cena do experimento de locomoção com Teletransporte



Legenda: Experimento Locomoção com Teletransporte, o objetivo é representado pelo "alvo" vermelho e branco.

altura do usuário em relação ao chão era fixa para simular corretamente a sensação de caminhada e não, de voo livre.

Figura 25 - Experimento Locomoção com *Joystick* e *Positional Tracking*



Legenda: O caminho a ser percorrido pelo usuário está demarcado em amarelo no chão

O terceiro e último experimento dessa sessão foi o de locomoção utilizando *Positional Tracking*. Para esse experimento foi utilizado o sistema OptiTrack do IMPA/VIS-GRAF. Esse sistema de captura utiliza um conjunto de câmeras para triangular a posição de marcadores no ambiente. Todo o cálculo de *tracking* é executado em um servidor e foi passada para a aplicação por *UDP unicast*.¹² Para esse experimento foi necessário adicionar um conjunto de três marcadores ao BoboVR Z4 de forma que, sua posição pudesse ser rastreada pelo Optitrack.

Nesse experimento cada voluntário foi orientado a seguir o mesmo caminho definido pela linha amarela do experimento anterior (Figura 25), porém, sem utilizar dispositivos de entrada e sim se movendo no ambiente real. Uma fotografia desse experimento que mostra um usuário durante o experimento pode ser visto na Figura 26.

De modo a padronizar os experimentos, todos tinham uma área de locomoção de 2x2m, sendo circular para o primeiro e quadrada para os dois posteriores.

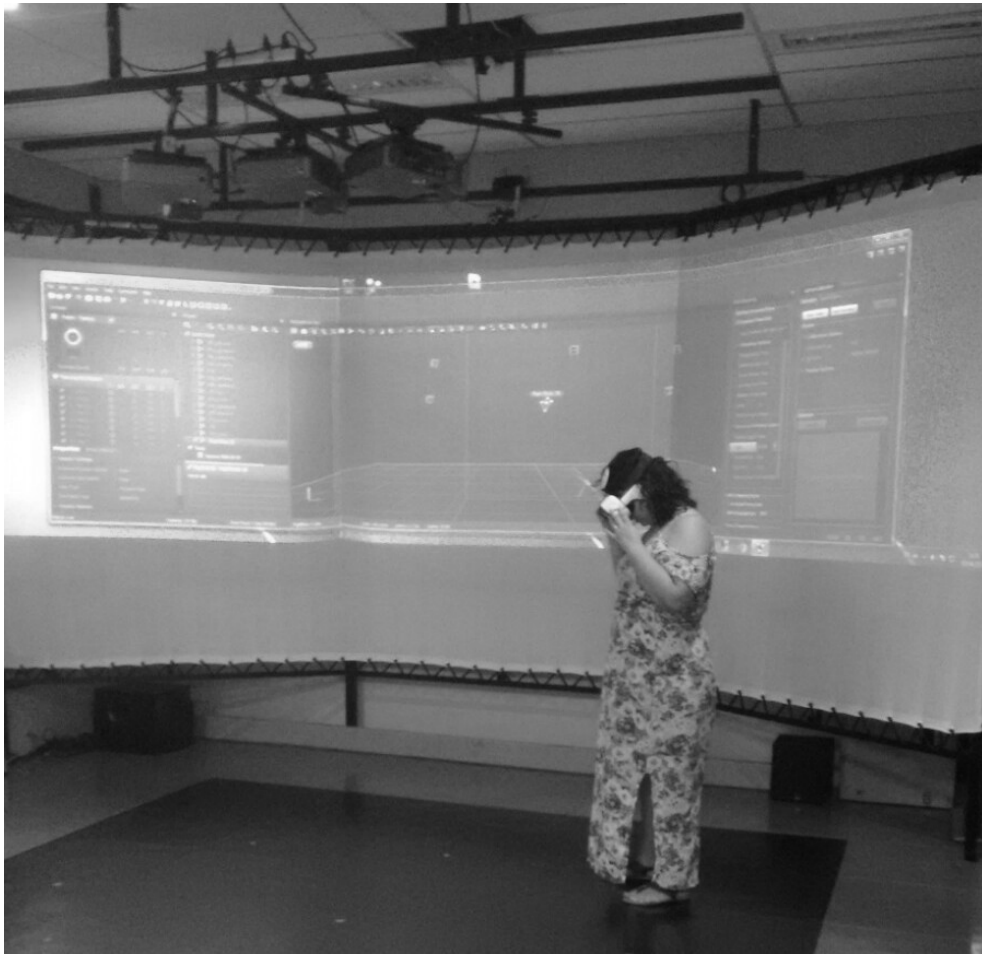
Para esse experimento os parâmetros foram fixados durante a etapa de calibragem nos seguintes valores:

- Kernel: 5;
- VRLeg : 0.0;
- Linear Influence: 1.0;
- Angular Influence: 1.0;
- Linear IMU: 1.0;
- Linear Avatar: 0.2;
- Angular IMU: 2.0;
- Angular Avatar: 9.

Não foi possível encontrar avaliações em larga escala para a classificação dos perfis de usuários baseados no nível de intensidade analítica medido em testes de *Simulator Sickness*. Para os experimentos o VRLeg foi ajustado para 0.0, ou seja, os dados colhidos foram simulando uma pessoa com nenhuma resistência à *Simulator Sickness*. Isso nos permite também, simular outros valores de VRLeg posteriormente, utilizando os dados exportados para as tabelas Excel de forma mais fácil.

¹² Modelo de Comunicação com protocolo UDP, onde os dados são enviados de um ponto a outro, havendo somente um emissor e um receptor.

Figura 26 - Positional Tracking



Legenda: Experimento de Locomoção utilizando Positional Tracking com Optitrack

O *kernel* de valor 5 representa um filtro, que avalia os dados a cada 12 milissegundos aproximadamente, visto que, a captura de dados discretas é feita a aproximadamente 40 hertz. Os valores de *Influencia Linear* (D_{LinInf}) e *Influência Angular* (D_{AngInf}) foram mantidos para simular aplicações reais, onde não somente a aceleração linear importa, mas também, a angular. Por exemplo, as aplicações de teletransporte requerem um movimento maior da cabeça (para focar o local de destino) o que, em teoria, poderia causar maior desconforto, gerado por dissociação angular. Porém, como veremos na análise de resultados, essa dissociação se tornou desprezível nesses experimentos, sendo a linear a responsável pela maior parte da dissociação, assim como previsto na elaboração dos experimentos.

5.3.1.2 Análise dos resultados

Os resultados da percepção dos voluntários sobre os efeitos da *Simulator Sickness* durante os experimentos foram obtidos através do questionário SSQ (que se encontra no Apêndice 1). As médias aritméticas dos valores reportados para cada sintoma, bem como a média aritmética final dos valores entre todos os sintomas, para cada um dos três experimentos, são apresentadas na Figura 27.

Figura 27 - Resultado médio do questionário SSQ

SSQ	Voluntários		
	Teleportation	Joystick	Positional
Desconforto Geral	1,33	2,33	1,83
Fadiga	1,00	1,83	1,17
Cansaço Visual	1,83	2,67	1,67
Dificuldade de Foco	1,50	1,83	1,17
Salivação	1,00	1,67	1,00
Náuseas	1,67	2,17	1,17
Dificuldade de Concentração	1,00	2,00	1,33
Visão Borrada	1,33	2,00	1,33
Tontura	1,83	2,50	1,67
Desorientação Espacial	1,67	2,67	2,00
Média	1,42	2,17	1,43

Legenda: O Questionário SSQ adaptado possui valores de 1 a 4 de intensidade para os sintomas da *Simulator Sickness* sendo: 1- Nenhum, 2 - Pouco, 3 - Moderado, 4 - Severo

A Figura 28 apresenta os dados do SSA relativos aos experimentos do modelo de locomoção baseado em teletransporte:

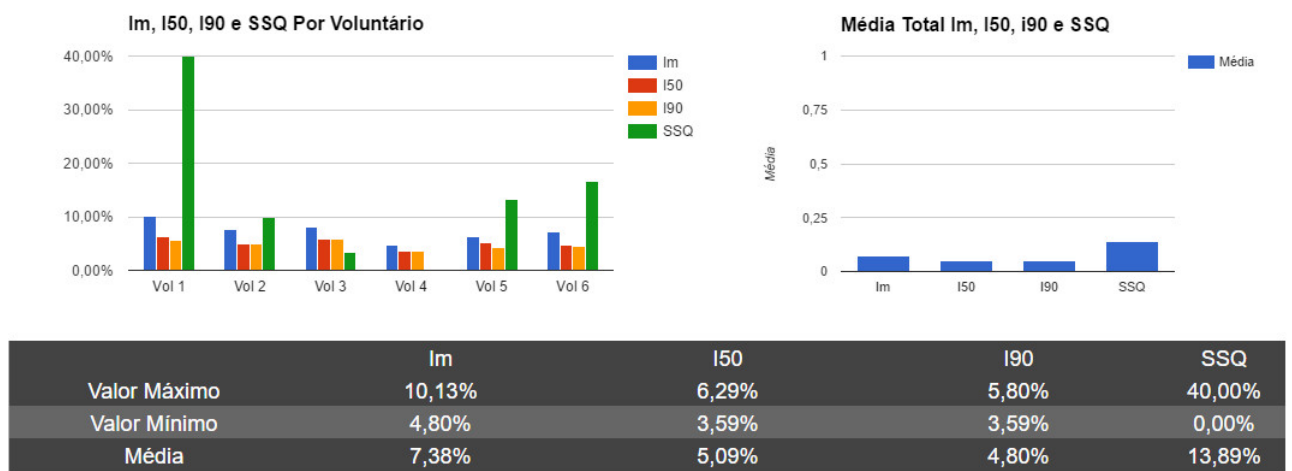
Nesse experimento, a intensidade média de *Simulator Sickness* calculada pelo SSA ficou em 7,38%. Os voluntários foram expostos a *Simulator Sickness* com intensidade acima de 50% em média, apenas durante 5,09% do tempo e acima de 90% de intensidade em média apenas durante 4,80% do tempo do experimento.

Já o resultado do questionário SSQ (Figura 27) dos voluntários apresenta um valor médio 1,42 com prevalência dos quesitos Tontura: 1,83 e Desorientação Espacial: 1,67.

A Figura 29 apresenta os dados do SSA relativos aos experimentos de modelos de locomoção com *Joystick*.

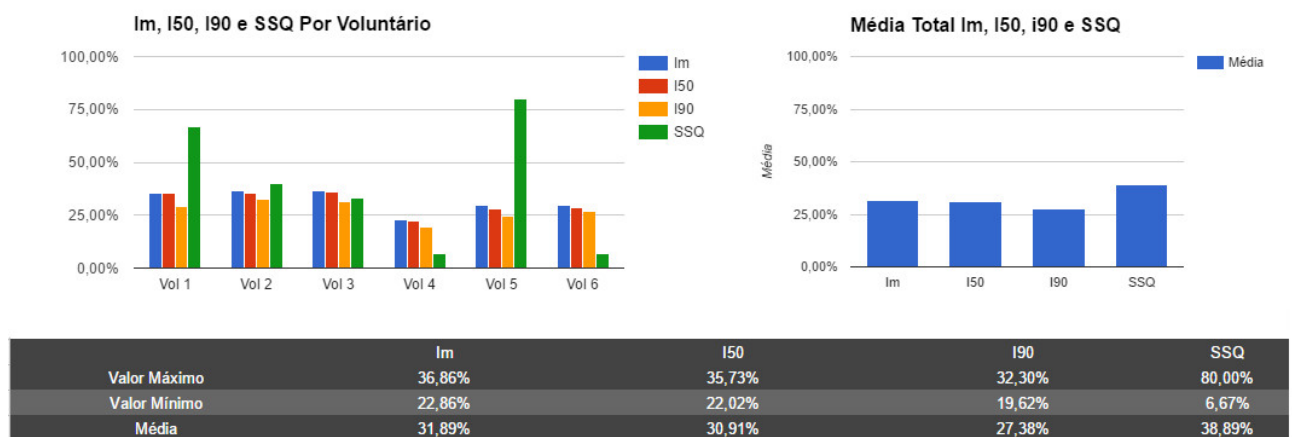
A intensidade média de *Simulator Sickness* calculada pelo SSA ficou em 31,89%.

Figura 28 - Experimento teletransporte



Legenda: Gráficos por Voluntário e média geral dos dados obtidos do SSA e questionário SSQ no experimento de locomoção com Teletransporte

Figura 29 - Experimento Joystick



Legenda: Gráficos por Voluntário e média geral dos dados obtidos do SSA e questionário SSQ no experimento de Locomoção com Joystick

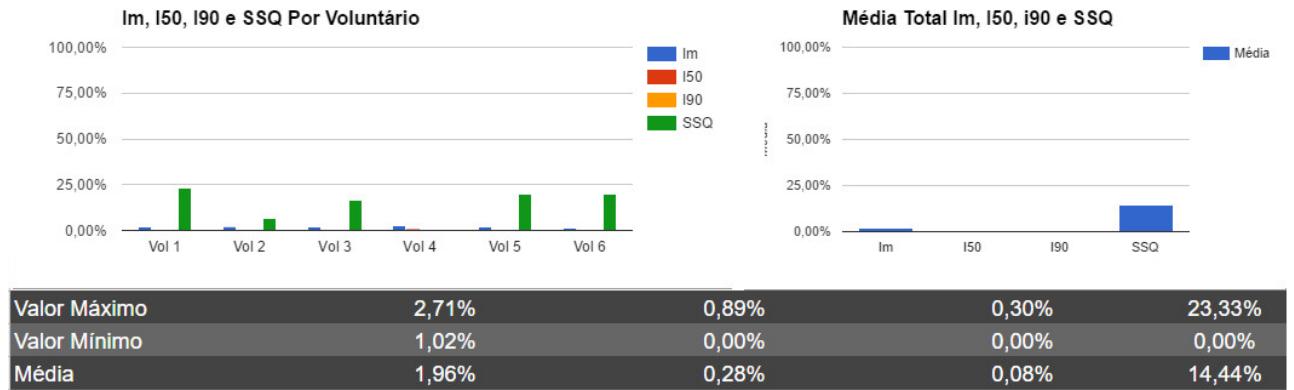
Os voluntários foram expostos a *Simulator Sickness* com intensidade acima de 50% durante 30,91% do tempo e acima de 90% de intensidade durante 27,38% do tempo do experimento em média.

Para esse experimento, a média do questionário SSQ (Figura 27) dos voluntários é de 2,17 com prevalência para os quesitos Desorientação Espacial: 2,67 e Cansaço Visual:

2,67.

A Figura 30 apresenta os dados do SSA relativos aos experimentos de modelos de locomoção com *Positional Tracking*.

Figura 30 - Experimento *Positional Tracking*



Legenda: Gráficos por Voluntário e média geral dos dados obtidos do SSA e questionário SSQ no experimento com *Positional Tracking*

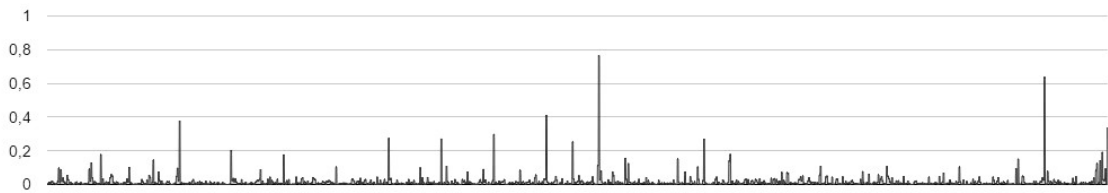
A intensidade média de *Simulator Sickness* calculada pelo SSA ficou em 1,96%. Os voluntários foram expostos a *Simulator Sickness* com intensidade acima de 50% durante apenas 0,28% do tempo e acima de 90% de intensidade durante 0,08% do tempo do experimento em média.

A média do questionário SSQ (Figura 27) dos voluntários para esse experimento é de 1,43 com prevalência para os quesitos Desorientação Espacial: 2,0 e Tontura: 1,67.

Por meio desses dados é possível destacar algumas observações relevantes. Nos ambientes com *Positional Tracking* e *Head Tracking* a dissociação entre o usuário e o avatar virtual é minimizada, sendo apenas causada por ruídos, latência natural do sistema e correções de *sensor fusion*, logo, esse é o cenário de menor dissociação segundo a *Sensory Rearrangement Theory* - SRT. O SSA corretamente apontou esse cenário como o de menor dissociação e menor *Simulator Sickness* durante os experimentos, com uma intensidade média de apenas 1.96%. Durante os experimentos foi verificada uma intensidade de *Simulator Sickness* acima de 50% apenas por 0,28% do tempo do experimento e em somente 0,08% do tempo, ela esteve acima de 90% de intensidade. O gráfico do experimento que mostra o nível de *Simulator Sickness* ao longo do tempo de um dos voluntários pode ser visto na Figura 31. É importante notar que o nível de *Simulator Sickness* é baixo ou nenhum na maior parte do tempo. Os picos de dissociação, nesse caso, são causados por ruído dos IMUs, falha de comunicação, latência e outros fatores externos.

Por sua vez, a SRT prevê que os sistemas de teletransporte apresentam níveis de

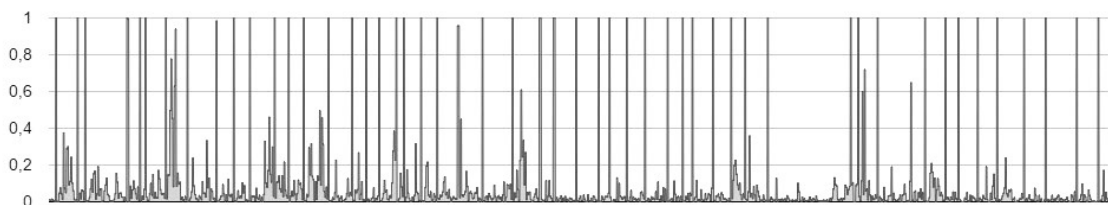
Figura 31 - Experimento *Positional Tracking*



Legenda: Gráfico de *Simulator Sickness* de um voluntário obtido pelo SSA

dissociação aceitáveis. Isso se deve à baixa aceleração linear do usuário (que está em uma posição relativamente estável no ambiente, por exemplo em pé, ou em uma cadeira) e à aceleração durante curtíssimos períodos de tempo (16 milissegundos correspondente a um frame) por parte do avatar, quando executando o teletransporte. Novamente a SSA foi capaz de corresponder a essa predição da teoria. Em nossos experimentos, observamos uma intensidade média de *Simulator Sickness* de apenas 7,38%. Somente durante 4,88% do tempo de experimento a intensidade ultrapassou mais do que 90% de *Simulator Sickness*, o que corresponde exatamente aos picos de aceleração causados pelo teletransporte. O gráfico do experimento de um dos voluntários, que mostra claramente os picos causados pelo teletransporte, pode ser visto na Figura 32.

Figura 32 - Experimento Teletransporte

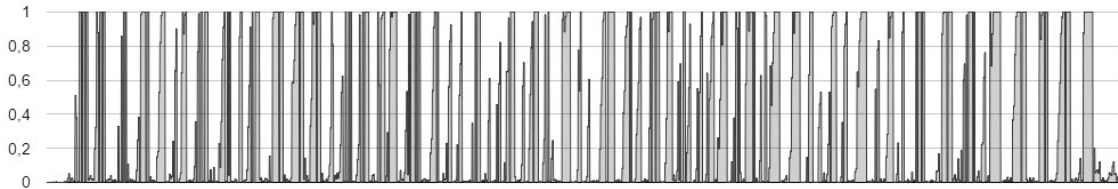


Legenda: Gráfico de *Simulator Sickness* obtido pelo SSA em um dos experimentos

Por fim, para o modelo de locomoção utilizando *Joystick* com um personagem que possui aceleração, a SRT prevê uma grande quantidade de *Simulator Sickness* já que, durante todo o período de locomoção, seria aplicado uma aceleração ao avatar virtual, que não possui correspondência com os movimentos do usuário. O SSA também verificou uma grande quantidade de *Simulator Sickness* média, assim como previsto pela SRT, com 31% de intensidade média, sendo que durante 30,91% do tempo do experimento, ela esteve acima de 50% e 27% do tempo teve intensidade acima de 90%. Ou seja, em aproximadamente 30% do tempo do experimento o usuário esteve sob efeito das condições que a SRT prevê, que sejam causadoras da *Simulator Sickness*. O gráfico do experimento

de um dos voluntários pode ser visto na Figura 33. É possível observar o alto grau de dissociação causado pela aceleração do avatar virtual, que não possui correspondência com a aceleração do usuário.

Figura 33 - Experimento *Joystick*



Legenda: Gráfico de *Simulator Sickness* obtido pelo SSA em um dos experimentos

Aplicando Normalização e convertendo os valores SSQ para porcentagem ($SSQ_{percent} = ((SSQ - 1)/3 * 100)$) temos o valor de aproximadamente 14% de intensidade nos testes de Teletransporte e *Positional Tracking*.

Ou seja, diferença de 6,51 pontos percentuais para os valores médios obtidos no experimento SSA de Teletransporte e 12,48 pontos percentuais para o teste de *Positional Tracking*. Uma correspondência relevante, principalmente, considerando as limitações do SSQ para representar medições analíticas.

A intensidade de *Simulator Sickness* medida pelo SSA para um usuário padrão com 50% de VRLeg seriam virtualmente nulos para os experimentos de *Positional Tracking* e de aproximadamente 3% para o de Teletransporte. Essa avaliação é corroborada pela experiência dos usuários no questionário SSQ. Analisando os dados, podemos verificar portanto, que as experiências de Teletransporte e *Positional Tracking* se mostraram equivalentes em relação aos sintomas de *Simulator Sickness* avaliados pelos usuários através da SSQ, com valores médios entre 1 (Nenhum) e 2 (Pouco), assim como obtido pelos resultados do SSA para um usuário padrão.

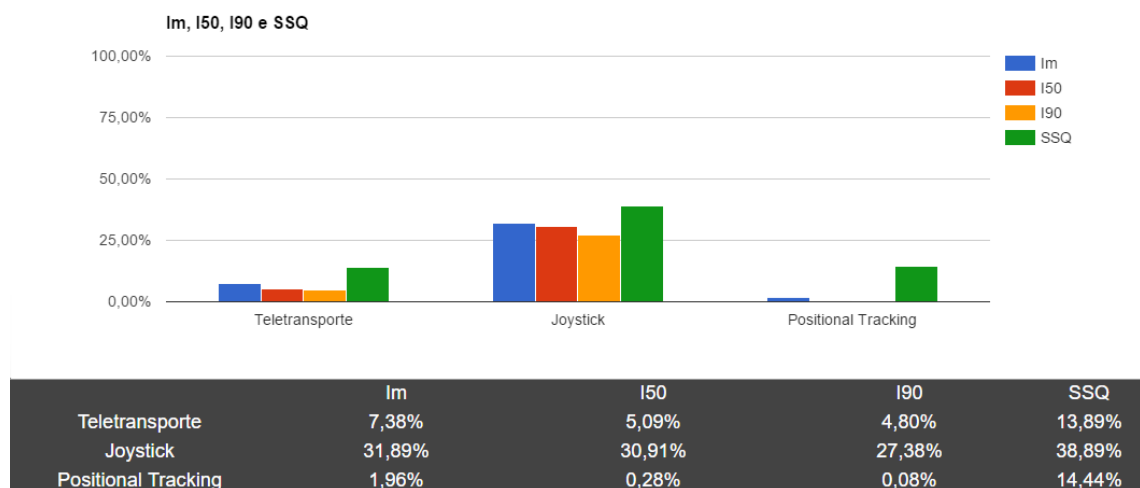
Outro ponto importante a ser destacado foi a sensação (por parte dos voluntários) de maior intensidade de Desorientação Espacial e desconforto geral no uso do *Positional Tracking*, especialmente quando comparado com o Teletransporte. Podemos supor que isso se deva ao fato de que, nesse experimento, o usuário precisar andar fisicamente no ambiente olhando para baixo, o que normalmente pode ser considerado uma experiência desconfortável, independente do uso do HMD. Observou-se que durante a experiência com Teletransporte os níveis de tontura foram maiores. Neste caso, podemos supor que isso foi causado pela necessidade de realizar muitos giros com o corpo e cabeça para localizar a posição do alvo a cada novo teletransporte.

Sobre o experimento com *Joystick* os usuários relataram, no questionário SSQ, valores de intensidade médio de 2,17 ou seja, intensidades entre 2 (Pouco) e 3 (Moderado).

Normalizando e Convertendo esse valor em porcentagens, obtemos um valor de 39% de intensidade dos sintomas. Comparativamente, nosso sistema averiguou um nível médio de intensidade dos efeitos de 31,89%. Uma diferença de apenas 7 pontos percentuais entre os resultados obtidos pelo SSA e a percepção dos usuários sobre esse experimento.

Para os experimentos de locomoção obtivemos portanto uma diferença média entre a percepção do usuário no questionário SSQ e os resultados analíticos do SSA de 8.66 pontos percentuais, dessa forma podemos observar que as medições do SSA correspondem com considerável grau de fidelidade às previsões da SRT e também, aos resultados analíticos da percepção dos usuários, quando usamos o questionário SSQ. Um resumo dos dados médios finais dos 3 experimentos pode ser visto na Figura 34

Figura 34 - Resultados Finais do experimento de locomoção



Curiosamente, quando pedido aos usuários para classificar livremente os experimentos com relação ao conforto como um todo (não somente em relação aos efeitos de *Simulator Sickness*), os resultados foram os seguintes:

- 100% dos voluntários consideram o experimento 1 (Teletransporte) como o mais confortável;
- 83% considerou o experimento 3 (*Positional Tracking* como segundo mais confortável e o experimento 2 como o terceiro menos confortável);
- 17% (um voluntário) considerou o experimento com joystick mais confortável do que o com *Positional Tracking*.

Estes dados colaboram para que se perceba que outros fatores, além da *Simulator Sickness*, podem impactar em algum grau a percepção dos usuários sobre o conforto das aplicações em realidade virtual. Isso pode ser observado na avaliação livre, que apontou

com unanimidade o modelo de Teletransporte como o mais confortável, mesmo nos casos em que os voluntários apontaram no questionário SSQ menos sintomas para o sistema de *Positional Tracking* (isso ocorreu em 30% dos voluntários).

O resultado dessa avaliação corrobora as recomendações de manuais de boas práticas, que indicam que quanto menor a liberdade de locomoção do usuário, mais confortável como um todo, essas experiências serão vivenciadas OculusVR (2016). Podemos especular que o sistema de *Positional Tracking*, apesar de minimizar os efeitos da *Simulator Sickness*, assim como previsto pela SRT, medido pela SSA e corroborado pelo SSQ, força o usuário a se deslocar fisicamente no ambiente real. Esse deslocamento pode ser percebido como menos confortável para os usuários, que prefeririam permanecer parados no ambiente real e somente se teletransportarem para as posições virtuais.

Uma avaliação específica sobre os efeitos da *Simulator Sickness* e conforto em ambientes, onde nenhum tipo de locomoção é adotado, é apresentado a seguir.

5.3.2 Avaliação de Aplicações sem Locomoção

O objetivo desse experimento foi avaliar, utilizando o SSA, o impacto da dissociação angular e linear relacionada ao conforto de usuários de aplicações móveis de realidade virtual. Neste caso, o usuário mantém uma posição fixa no ambiente. Essa estratégia é utilizada na visualização de vídeos e em alguns jogos. Esse modelo de experiência compõe o principal uso das aplicações móveis de realidade virtual e é indicado, por exemplo, no início de toda sessão na tela inicial do Oculus Home para o GearVR ¹³ (OCULUS, 2017).

Dessa forma, o objetivo desse teste é verificar a afirmativa de manuais de usabilidade dos HMDs, de que as aplicações de realidade virtual com menor índice de *Simulation Sickness* e mais confortáveis são as que o usuário não realiza nenhum tipo de locomoção, citada em OculusVR (2016).

The most comfortable VR experiences involve no self-motion for the user besides head and body movements to look around the environment. (OCULUSVR, 2016)

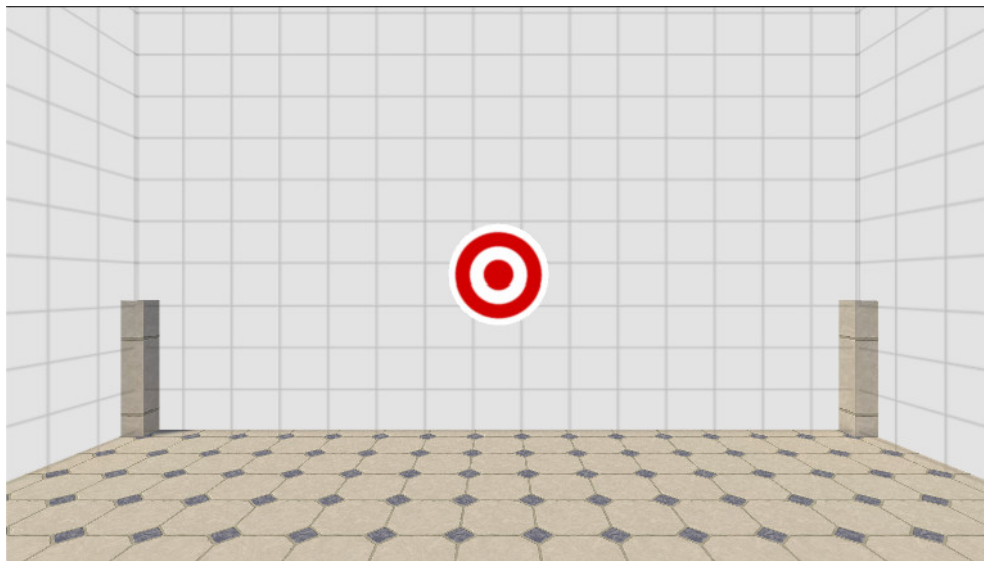
Na próxima seção é apresentada a metodologia adotada para esse experimento.

¹³ aplicativo que funciona como launcher para outras aplicações no GearVR

5.3.2.1 Metodologia

Para esse experimento foi desenvolvido um ambiente em realidade virtual, chamado de *Hit Target*, onde os voluntários tinham como objetivo clicar (com *gaze pointer*) em alvos no cenário (Figura 35). Cada vez que o alvo era "clicado", sua posição no ambiente tridimensional era modificada randomicamente com distância máxima de 3 metros, a partir do ponto central do cenário.

Figura 35 - Experimento Sem Locomoção - *Hit Target*



Legenda: Experimento sem Locomoção

De forma análoga aos experimentos anteriores, cada voluntário foi submetido a uma sessão de 2 minutos no experimento e em seguida, respondeu ao questionário SSQ.

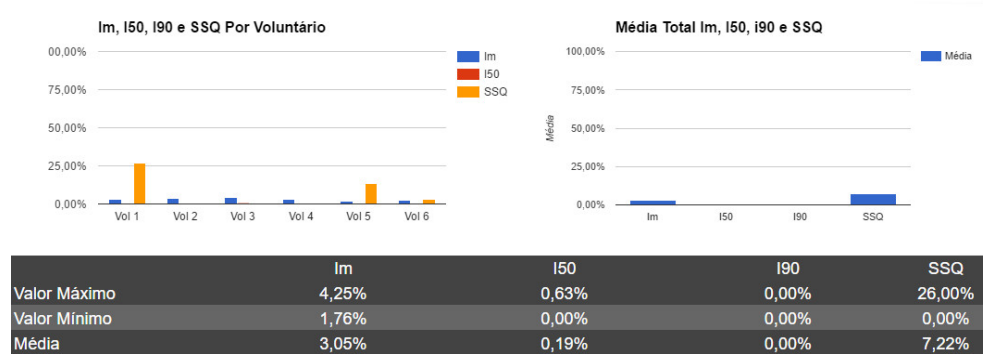
Abaixo os valores de calibração do experimento:

- Kernel: 5;
- VRLeg : 0.0;
- Linear Influence: 1.0;
- Angular Influence: 1.0;
- Linear IMU: 1.0;
- Linear Avatar: 0.2;
- Angular IMU: 2.0;
- Angular Avatar: 9;

5.3.2.2 Análise de Resultados

A Figura 36 apresenta os dados do experimento *Hit Target* sem Locomoção, usando o SSA.

Figura 36 - Experimento Hit Target Sem Locomoção



A percepção dos usuários sobre os efeitos da *Simulator Sickness* durante os experimentos, expressada no questionário SSQ, é apresentada na Figura 37.

O questionário SSQ dos voluntários (Valores de 1 a 4 sendo: 1 - Nenhum, 2 - Pouco, 3 - Moderado e 4 - Severo) apresenta um valor médio 1,22 com nenhum quesito ultrapassando a marca de 1,33.

Aplicando Normalização e convertendo os valores SSQ para porcentagem temos o valor de aproximadamente 7,3% de intensidade nesse experimento. Ou seja, uma diferença de apenas 4,17 pontos percentuais para os valores médios avaliados no SSA. Uma correspondência significativa, principalmente, considerando as limitações do SSQ para representar medições analíticas.

De forma geral, esse resultado corrobora as indicações dos manuais de boas práticas, que indicam as aplicações sem locomoção como confortáveis. Considerando um usuário padrão (VRLeg 50%) a medição do SSA seria praticamente nula assim como os experimentos de Teletransporte e de *Positional Tracking*. A Figura 38 apresenta o gráfico de *Simulator Sickness* do SSA obtido durante o experimento com um dos voluntários. É possível observar a baixa taxa de dissociação geral. Os picos de dissociação são causados principalmente, por eventuais movimentações do usuário que por não haver *Positional Tracking*, não são correspondidas pelo avatar virtual.

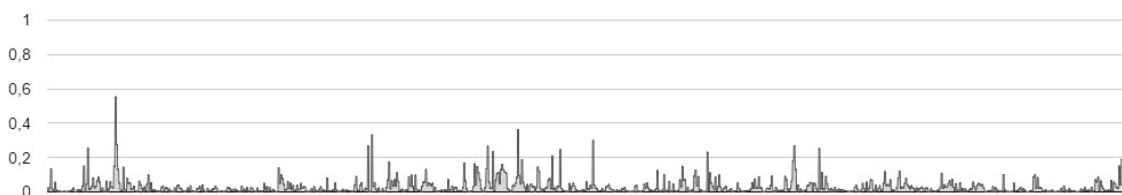
Infelizmente, não foi questionado aos voluntários se esse experimento era o mais confortável no âmbito geral, porém comparando os dados do questionário SSQ temos a avaliação analítica de que esse foi o experimento com menor índice de Simulator Sickness (apenas 7,3%).

Figura 37 - Médias dos resultados do questionário SSQ

SSQ	Voluntários
Desconforto Geral	1,33
Fadiga	1,17
Cansaço Visual	1,33
Dificuldade de Foco	1,17
Salivação	1,00
Náuseas	1,17
Dificuldade de Concentração	1,17
Visão Borrada	1,17
Tontura	1,33
Desorientação Espacial	1,33
Média	1,22

Legenda: O Questionário SSQ adaptado possui valores de 1 a 4 de intensidade para os sintomas da *Simulator Sickness* sendo: 1- Nenhum, 2 - Pouco, 3 - Moderado, 4 - Severo

Figura 38 - Experimento Hit Target Sem Locomoção



Legenda: Gráfico de *Simulator Sickness* obtido pelo SSA em um dos experimentos *Hit Target* sem Locomoção

5.3.3 Avaliação de Latência

O objetivo desse experimento foi verificar a capacidade do SSA de avaliar a latência de sistemas de realidade virtual. Segundo (OCULUSVR, 2016) os valores de 20ms de latência são considerados aceitáveis para sistemas de realidade virtual. Enquanto esse tipo

de avaliação não é o objetivo principal do SSA, as implicações de uma alta latência para o conforto dos sistemas de realidade virtual ficam claros à luz da SRT, já que a dissociação é a principal causa apontada da *Simulator Sickness*. Logo, avaliar essa característica dos sistemas é crucial para o conforto e segurança das aplicações de realidade virtual.

5.3.3.1 Metodologia

Para esse experimento foi utilizado o mesmo ambiente do experimento anterior, onde o usuário se mantém em um ponto fixo no ambiente virtual e tem de utilizar o *gaze pointer* para acertar um alvo que muda de posição randomicamente quando é selecionado (Figura 35). Porém, foi introduzida uma latência artificial de 30 milisegundos a mais, entre os dados captados pelo HMD e o avatar virtual.

Para o experimento com latência, os valores de normalização de aceleração angular, tanto do avatar, quanto do usuário, foram modificados para uma maior sensibilidade do sistema. Isso se deve ao fato de que, como demonstrado adiante, os valores de aceleração normalmente aplicados a sistemas de *Head Tracking* são muito baixos, dificultando assim (por falta de amplitude numérica), a avaliação de propriedades mais evasivas como a latência. Por esse motivo, foi decidido aumentar a sensibilidade do sistema para melhor avaliar esse parâmetro, mesmo tendo em vista que essa prática amplifica também, o ruído natural dos dados e a imprecisão dos resultados. Por esse motivo, é impossível uma comparação direta entre este experimento e os outros executados anteriormente.

Os valores de configuração foram os seguintes:

- Kernel: 5;
- VRLeg : 0.0;
- Linear Influence: 1.0;
- Angular Influence: 1.0;
- Linear IMU: 1.0;
- Linear Avatar: 0.2;
- Angular IMU: 0.1;
- Angular Avatar: 0.8.

5.3.3.2 Avaliação dos Resultados

A Figura 39 apresenta os dados do SSA do experimento *Hit Target* sem Locomoção e com latência.

Figura 39 - Experimento Hit Target com Latência

Análise de Dados de Simulator Sickness - Hit Targets com Delay			
	Intensidade Média Simulator Sickness	Simulator Sickness Maior do que 50%	Simulator Sickness Maior do que 90%
Valor Máximo	29,51%	26,57%	10,44%
Valor Mínimo	20,58%	15,17%	6,36%
Média	24,91%	20,25%	8,25%

A percepção dos usuários sobre os efeitos da *Simulator Sickness* durante os experimentos, observadas nas respostas ao questionário SSQ, é apresentada na Figura 40.

Figura 40 - Resultado médio do questionário SSQ

SSQ	Voluntários
	Angular
Desconforto Geral	3,50
Fadiga	2,17
Cansaço Visual	3,83
Dificuldade de Foco	3,00
Salivação	1,83
Náuseas	2,67
Dificuldade de Concentração	3,00
Visão Borrada	1,67
Tontura	3,17
Desorientação Espacial	3,33
Média	2,82

Legenda: O Questionário SSQ adaptado possui valores de 1 a 4 de intensidade para os sintomas da *Simulator Sickness* sendo: 1- Nenhum, 2 - Pouco, 3 - Moderado, 4 - Severo

O questionário SSQ dos voluntários (Valores de 1 a 4 sendo: 1 - Nenhum, 2 - Pouco, 3 - Moderado e 4 - Severo) apresenta um valor médio de 2,82.

Aplicando Normalização e convertendo os valores SSQ para porcentagem temos o valor de aproximadamente 60% de intensidade nesse experimento. Ou seja, uma correspondência de apenas 65% para os valores médios avaliados no SSA. Ou seja, uma baixa

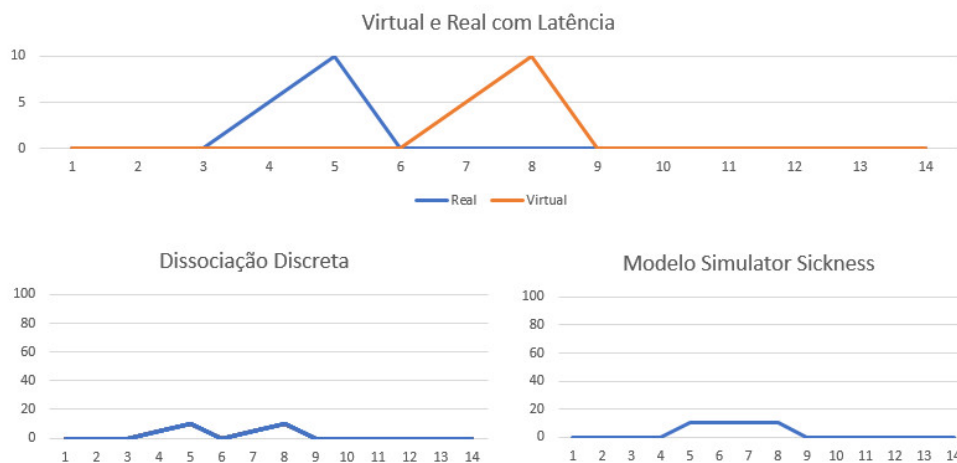
correspondência, mesmo com o aumento do nível de sensibilidade do sistema.

Esse resultado corrobora as indicações dos manuais de boas práticas, que indicam que altos valores de latência são uma das principais causas de *Simulator Sickness*. Entretanto é importante notar que todas as principais plataformas de realidade virtual comerciais (GearVR, Cardboard, Daydream, HTC Vive e Oculus Rift) trabalham abaixo da latência recomendada de 20ms. Nosso experimento introduziu artificialmente a latência no sistema com valores acima dos trabalhados por esses dispositivos. Então, estes resultados iniciais sugerem que, em situações normais de utilização para os usuários finais, a latência dos sistemas de realidade virtual não é uma das causas significativas de *Simulator Sickness*.

Este experimento, entretanto, também demonstrou que o SSA não é capaz de verificar com precisão a dissociação causada por latência geral, isso se deve a dois principais motivos:

Primeiro, a latência natural do sistema não implica em altos valores de aceleração. Isso fica claro em situações onde a aceleração geral do usuário e do avatar são baixos. Mesmo quando o usuário possui valores arbitrariamente altos de latência, isso não implica em valores altos no gráfico de dissociação, caso a aceleração do usuário e do avatar seja baixa. Um exemplo desse comportamento pode ser visto na Figura 41.

Figura 41 - Experimento Hit Target com Latência



Para compensar esse cenário, a solução adotada no experimento foi aumentar a sensibilidade geral do modelo com valores de normalização mais baixos do que os ideais. Isso resulta em outro problema, que é o aumento do nível de ruído geral aplicado na análise, levando a resultados que não possuem o mesmo nível de confiabilidade.

O segundo problema diz respeito à própria resolução dos dados enviados pelo SSA. Atualmente, estamos trabalhando com 40 verificações por segundo, ou seja, uma verificação a cada 25 milissegundos. Considerando ainda, o tempo de envio dos dados do

cliente para o servidor e outros processamentos realizados pelo SSA, percebeu-se que eventos que ocorrem em uma escala de tempo tão curta, como o fenômeno da latência, não podem ser corretamente averiguados pelo sistema.

De forma geral, a conclusão obtida é que no estágio atual de desenvolvimento, o SSA não é indicado para medição de latência de sistemas e a correta configuração dos valores de calibração torna-se tarefa imprescindível para uma análise confiável dos fenômenos a que se propõe verificar.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Dentre os diversos desafios para o desenvolvimento das tecnologias de realidade virtual o problema da *Simulator Sickness* se apresenta como um dos mais desafiadores, seja devido às suas origens biológicas, seja pela manifestação dos seus sintomas ser distinta para cada indivíduo. Os modelos atuais de avaliação da *Simulator Sickness* não suprem as necessidades dos desenvolvedores de forma que os testes e o controle de qualidade, quando empregados, são baseados em medições posteriores, como no questionário SSQ, ou requerem equipamentos e conhecimentos externos ao meio, como análises fisiológicas.

Esse trabalho apresentou uma proposta que visa ajudar a eliminar essas limitações, descrevendo um modelo computacional da *Simulator Sickness* baseado na teoria SRT, bem como os detalhes de sua implementação. O SSA (*Simulator Sickness Analyser*) pode ser considerado neste contexto, como uma ferramenta que pode ser utilizada por desenvolvedores para avaliar, em tempo real, aplicações de realidade virtual. Ela é baseada em um modelo matemático da *Simulator Sickness*, que identifica variáveis de aceleração linear e angular e variáveis de latência envolvidas no processo de navegação de usuários em ambientes virtuais tridimensionais.

Para avaliar essas funcionalidades foi realizado um experimento com 6 participantes, que utilizou um Samsung Galaxy S7 acoplado ao HMD BoboVRZ4 e um sistema Optitrack, disponibilizado pelo IMPA/VISGRAF. Para identificar a percepção de *Simulator Sickness* por parte de cada participante, foi utilizada uma adaptação do questionário SSQ (*Simulator Sickness Questionary*). Foram desenvolvidos 5 ambientes preparados para a realização dos testes com o objetivo de identificar a dissociação em modelos de locomoção usando três técnicas: teletransporte, *joystick* e *Positional tracking*; nível de dissociação sem locomoção; e a avaliação de latência.

Os resultados dos experimentos realizados no VISGRAF/IMPA apontaram um alto grau de correspondência entre as avaliações feitas pelo SSA e o Feedback dado pelos voluntários através do questionário SSQ (normalizado e convertido em percentagens de intensidade dos sintomas) com diferença média de 6,4 pontos percentuais (Em ambientes normais de utilização e correta calibração).

Também através dos experimentos pudemos confirmar analiticamente algumas predições da SRT. (i) Os experimentos com *Positional Tracking* apresentaram os menores valores de *Simulator Sickness* assim como previsto pela SRT; (ii) Experimentos com Teletransporte foram igualmente confortáveis apresentando valores baixos de *Simulator Sickness*; (iii) Experimentos com controle por *Joystick* com aceleração geraram níveis altos de *Simulator Sickness* no SSA. Nossos testes também apontaram que ambientes de realidade virtual que não utilizam nenhum tipo de locomoção possuem alto nível de conforto e baixo *Simulator Sickness* assim como apontado em manuais de boas práticas

dos HMDs.

Este trabalho também apresentou as limitações do modelo e da ferramenta proposta quanto à medição da latência de sistemas de realidade virtual em seu último experimento.

Como sugestão de trabalhos futuros apontamos alguns caminhos para melhorar a avaliação de latência: (i) Aumentar a taxa de transmissão de dados, (ii) Aumentar a taxa de avaliação por segundo do analisador. (iii) Estabelecer (através de metrônomo, *timestamp* ou outro tipo de marcador) uma correspondência entre os dados do acelerômetro/giroscópio e a posição/orientação do avatar virtual, permitindo a avaliação de latência sem necessidade de aceleração.

Também notamos que os resultados obtidos com o SSA ficaram sempre abaixo dos obtidos através do SSQ mesmo tendo utilizado o parâmetro $VRLeg = 0$. De posse dos dados obtidos nesse experimento podemos no futuro avaliar outras funções de transferência aliado com valores de $VRLeg$ diferentes de 0, bem como realizar experimentos com uma quantidade maior de voluntários para obter resultados ainda mais precisos.

REFERÊNCIAS

- ARONSSON, A. *Simulator Sickness and VR Legs — A. Aronsson's WeBOLLog*. 2014. [Http://andreasaronsson.com/2014/08/18/simulator-sickness-and-vr-legs/](http://andreasaronsson.com/2014/08/18/simulator-sickness-and-vr-legs/). (Acessado em 01/05/2017).
- AZUMA, R. et al. Recent advances in augmented reality. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, IEEE, v. 21, n. 6, p. 34–47, 2001.
- BAÑOS, R. M. et al. Presence and emotions in virtual environments: The influence of stereoscopy. *CyberPsychology & Behavior*, Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801-5215 USA, v. 11, n. 1, p. 1–8, 2008.
- BARRETT, G. V.; THORNTON, C. L. Relationship between perceptual style and simulator sickness. *Journal of Applied Psychology*, American Psychological Association, v. 52, n. 4, p. 304, 1968.
- BBC. *BBC Brasil - Ciência & Saúde - Homem é capaz de correr a mais de 60 km/h, diz estudo*. 2010. (http://www.bbc.com/portuguese/ciencia/2010/01/100126_homemcorridaml.shtml). (Acessado em 01/05/2017).
- BLES, W. et al. Motion sickness: only one provocative conflict? *Brain research bulletin*, Elsevier, v. 47, n. 5, p. 481–487, 1998.
- BOS, J. E.; BLES, W.; GROEN, E. L. A theory on visually induced motion sickness. *Displays*, Elsevier, v. 29, n. 2, p. 47–57, 2008.
- CADDY, B. *Vomit Reality: Why VR makes some of us feel sick and how to make it stop*. 2016. (<http://www.wearable.com/vr/vr-headset-motion-sickness-solution-777>). (Acessado em 01/05/2017).
- CARBOTTE, K. *VR Locomotion Is A Problem That Has Many Half-Solutions*. 2016. (<http://www.tomshardware.com/news/vr-locomotion-developer-solution-roundup,33108.html>). (Acessado em 01/05/2017).
- CARVALHO¹, M. R. de; COSTA¹, R. T. da; NARDI¹, A. E. Simulator sickness questionnaire: tradução e adaptação transcultural. *J Bras Psiquiatr*, v. 60, n. 4, p. 247–52, 2011.
- DIEMER, J. et al. The impact of perception and presence on emotional reactions: a review of research in virtual reality. *Frontiers in psychology*, Frontiers Media SA, v. 6, 2015.
- DIGI-CAPITAL. *Augmented/Virtual Reality revenue forecast revised to hit \$120 billion by 2020 — NEWS* ðð *Digi-Capital*. 2016. (<http://www.digi-capital.com/news/2016/01/augmentedvirtual-reality-revenue-forecast-revised-to-hit-120-billion-by-2020/#.WHETdxsrKM8>). (Acessado em 01/05/2017).
- DREDGE, S. *Oculus warns Sony to solve motion sickness before launching a VR headset — Technology — The Guardian*. 2014. (<https://www.theguardian.com/technology/2014/nov/04/oculus-sony-motion-sickness-virtual-reality>). (Acessado em 01/05/2017).

- DUNN, M. *Understanding Easing (Explaining Penner's equations) – JavaScript and ActionScript — upshots*. 2011. <http://upshots.org/actionscript/jsas-understanding-easing>. (Acessado em 01/05/2017).
- FANG, Y. et al. Eye-head coordination for visual cognitive processing. *PloS one*, Public Library of Science, v. 10, n. 3, p. e0121035, 2015.
- FERREIRA, A. B. de H. Novo dicionário eletrônico aurélio. Editora Positivo, 2010.
- GOOGLE. *Tango*. 2017. <https://get.google.com/tango/>. (Acessado em 01/05/2017).
- HAYDEN, S. *7 Ways to Move Users Around in VR Without Making Them Sick – Road to VR*. 2016. <http://www.roadtovr.com/7-ways-move-users-around-vr-without-making-sick/>. (Acessado em 01/05/2017).
- KENNEDY, R. et al. Simulator sickness in us navy flight simulators. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, v. 60, n. 1, p. 10–16, 1989.
- KENNEDY, R. S. et al. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, Informa UK Limited, v. 3, n. 3, p. 203–220, jul 1993. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3.
- KIRYU, T.; SO, R. H. Sensation of presence and cybersickness in applications of virtual reality for advanced rehabilitation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, BioMed Central, v. 4, n. 1, p. 1, 2007.
- KIRYU, T. et al. Time-varying factors model with different time-scales for studying cybersickness. In: SPRINGER. *International Conference on Virtual Reality*. [S.l.], 2007. p. 262–269.
- LANG, D. J. *For virtual reality creators, motion sickness a real issue*. 2016. <http://phys.org/news/2016-03-virtual-reality-creators-motion-sickness.html>. (Acessado em 01/05/2017).
- LYROBOTICX. *NOLO Motion Tracking for VR*. 2017. <https://www.nolovr.com/>. (Acessado em 01/05/2017).
- LÉVY, P. *O que é Virtual?* 1996. http://www.mom.arq.ufmg.br/mom/arq_interface/6a_aula/o_que_e_o_virtual-_levy.pdf. (Acessado em 01/05/2017).
- MILGRAM, P.; COLQUHOUN, H. A taxonomy of real and virtual world display integration. *Mixed reality: Merging real and virtual worlds*, v. 1, p. 1–26, 1999.
- NATURALPOINT. *OptiTrack - Motion Capture Systems*. 2017. <http://optitrack.com/>. (Acessado em 01/05/2017).
- OCULUS. *Gear VR Powered by Oculus — Oculus*. 2017. <https://www.oculus.com/gear-vr/>. (Acessado em 01/05/2017).
- OCULUSVR. *Oculus Best Practices*. 310-30000-02. ed. [S.l.]: OculusVR, 2016. [Http://static.oculus.com/documentation/pdfs/intro-vr/latest/bp.pdf](http://static.oculus.com/documentation/pdfs/intro-vr/latest/bp.pdf). (Acessado em 01/05/2017).

PENNER, R. *Robert Penner's Programming Macromedia Flash MX*. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 2002.

REASON, J. T. Motion sickness adaptation: a neural mismatch model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, Royal Society of Medicine Press, v. 71, n. 11, p. 819, 1978.

REASON, J. T.; BRAND, J. J. *Motion sickness*. [S.l.]: Academic press, 1975.

REBENITSCH, L.; OWEN, C. Review on cybersickness in applications and visual displays. *Virtual Reality*, Springer, v. 20, n. 2, p. 101–125, 2016.

RHEINGOLD, H. *Virtual reality: Exploring the brave new technologies*. Simon & Schuster Adult Publishing Group, 1991.

ROBERTSON, A. *The ultimate VR headset buyer's guide*. 2016. <<http://www.theverge.com/a/best-vr-headset-oculus-rift-samsung-gear-htc-vive-virtual-reality>>. (Acessado em 01/05/2017).

SHERIDAN, T. B. Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, MIT Press, v. 1, n. 1, p. 120–126, 1992.

SILVA, V. et al. *Framework para Debug e Controle de Simulation Sickness em Sistemas de Realidade Virtual*. 2016. <<http://www.sbgames.org/sbgames2016/downloads/anais/157405.pdf/>>. (Acessado em 01/05/2017).

SKARREDGHOST. *Virtual reality locomotion choice in games is not an option – The ghost howls*. 2017. <<https://skarredghost.wordpress.com/2017/03/14/virtual-reality-locomotion-choice-in-games-is-not-an-option/>>. (Acessado em 01/05/2017).

SOLOMON, B. *Facebook buys oculus, virtual reality gaming startup, for 2 billion dollars*. *Forbes*. 2014. <<http://www.forbes.com/sites/briansolomon/2014/03/25/facebook-buys-oculus-virtual-reality-gaming-startup-for-2-billion/#67144fcb4222>>. (Acessado em 01/05/2017).

STEINICKE, F.; BRUDER, G. A self-experimentation report about long-term use of fully-immersive technology. In: ACM. *Proceedings of the 2nd ACM symposium on Spatial user interaction*. [S.l.], 2014. p. 66–69.

STEUER, J. *Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence*. 1993. <<http://www.cybertherapy.info/pages/telepresence.pdf>>. (Acessado em 01/05/2017).

TREISMAN, M. Motion sickness: an evolutionary hypothesis. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 197, n. 4302, p. 493–495, 1977.

VICOVR. *VicoVR - Full-Motion Gaming in Virtual Reality! — Indiegogo*. 2017. <<https://www.indiegogo.com/projects/vicovr-full-motion-gaming-in-virtual-reality-vr-technology#/>>. (Acessado em 01/05/2017).

VIRTUIX. *Virtuix Omni first of its kind active virtual reality motion platform*. 2017. <<http://www.virtuix.com/>>. (Acessado em 01/05/2017).

XINREALITY. *VR legs - Virtual Reality and Augmented Reality Wiki*. 2017. [⟨https://xinreality.com/wiki/VR_legs⟩](https://xinreality.com/wiki/VR_legs). (Acessado em 01/05/2017).

ANEXO A - Formulário de Coleta de Dados

1. Nº de Identificação _____

2. Caracterização Do Participante:

- Idade:
- Sexo:
- Ocupação Profissional:
- Qualificação profissional:

3. Experiências Prévias:

- De 1 a 5 qual seu grau de experiência com a utilização de equipamentos de Realidade Virtual?
(1 –Nunca Utilizei, 2 –Utilizei Uma vez, 3 –Utilizei algumas vezes, 4 –Uso Semanalmente, 5 - Uso Diariamente)

1	2	3	4	5

- De 1 a 5 como você classifica a sua resistência em relação a sintomas associados ao uso dos equipamentos imersivos em experiências anteriores?
(1 –Sinto Muitos sintomas que me impedem de utilizar o equipamento, 2 – Sinto muitos sintomas mas consigo utilizar por alguns minutos, 3 Sinto sintomas regulares mas consigo utilizar por bastante tempo, 4 – Sinto Poucos sintomas; 5 – Não sinto nenhum sintoma.)

1	2	3	4	5

4. Questionário de Simulator Sickness

Questionário de *Simulator Sickness* (Posteriori)

Segundo a Classificação: (1 - Nenhum, 2 - Pouco, 3 - Moderado, 4 - Severo) como você classifica a sua experiência em cada um dos seguintes pontos:

	Experimento 1				Experimento 2				Experimento 3				Experimento 4				Experimento 5			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Desconforto Geral																				
Fadiga																				
Cansaço Visual																				
Dificuldade de Foco																				
Salivação																				
Náuseas																				
Dificuldade de Concentração																				
Visão Borrada																				
Tontura																				
Desorientação Espacial																				

ANEXO B – Termo De Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE)

O Sr(a) está sendo convidado(a) para participar da pesquisa de caráter voluntário intitulada: **Uma Abordagem para Análise e Monitoramento de Simulator Sickness em Ambientes de Realidade Virtual** conduzida por Vitor Balbio da Silva, Alexandre da Costa Sena, Rosa Maria E. Moreira da Costa e Luiz Velho.

Apesar dos recentes avanços dos equipamentos imersivos de Realidade Virtual - Head Mounted Displays (HMDs)- e o lançamento de diversos desses dispositivos no mercado internacional, muitos desafios ainda persistem para disponibilizar essa tecnologia ao público em geral de forma segura, principalmente, devido aos efeitos fisiológicos adversos que a utilização desses dispositivos podem causar como: desconforto, vertigem, fadiga visual e mais comumente náuseas, sintomas de um efeito conhecido como *Simulator Sickness*. Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas de análise e monitoramento para minimizar esses efeitos nas experiências imersivas.

Esta pesquisa tem por objetivos: Validar uma ferramenta de análise de Simulator Sickness bem como o modelo matemático de estimação que baliza o seu funcionamento.

Sua participação nesta pesquisa consistirá em utilizar o equipamento imersivo e navegar em três ambientes virtuais tridimensionais. Durante a navegação você executará ações pré-definidas, como: se locomover no ambiente, interagir com elementos virtuais e clicar em objetos virtuais. Em alguns momentos você irá fornecer informações sobre suas sensações na realização dessas atividades. Você só será submetido a uma única sessão de coleta de dados (com os 3 ambientes simulados) com tempo máximo estimado de 10 minutos cada um e pausa de 10 minutos entre cada interação. O sistema irá capturar dados automaticamente, tais como o tempo utilizado para realizar cada atividade e o número de erros/acertos. Esse experimento será realizado em um ambiente controlado e seguro, nas dependências do laboratório VISGRAF do Instituto de Matemática Pura e Aplicada – IMPA e será apoiado pelos pesquisadores. No final, você irá preencher um formulário informando se sentiu algum desconforto durante o experimento.

A sua participação no experimento não é obrigatória. A qualquer momento você poderá desistir de participar e retirar seu consentimento. Sua recusa, desistência ou retirada de consentimento não acarretará prejuízo. A sua participação é voluntária, isto é não prevê nenhum tipo de despesas ou retorno financeiro para você.

Os riscos relacionados com sua participação são reconhecidos como efeitos fisiológicos momentâneos e podem ser categorizados em 3 áreas: Náuseas, Oculomotores e Desorientação. Mais especificamente, podemos citar: Fadiga mental, Cansaço Visual, Dificuldade de Foco, Aumento de Salivação, Sudorese, Náuseas, Dificuldade de Concentração, Desorientação e Vertigem. Apesar da literatura apontar que esses sintomas podem se estender por alguns minutos após exposição, raramente foram citados problemas com longo tempo de duração após o uso dos equipamentos. Entretanto, o experimento será suspenso imediatamente, se você apresentar algum desses desconfortos.

Os benefícios desse estudo se relacionam com o desenvolvimento de aplicações de realidade virtual imersivas mais seguras e ergonômicas permitindo assim, que sejam utilizadas por uma maior parcela da sociedade.

As informações colhidas ficarão sob guarda da equipe de pesquisa por cinco anos e serão destruídas após esse período. Suas respostas serão tratadas de forma anônima e confidencial, isto é, em nenhum momento será divulgado o seu nome, preservando o seu anonimato, não havendo qualquer identificação de indivíduos, logo seu depoimento e os dados coletados automaticamente pelo sistema serão identificados por um número de identificação. Apenas os pesquisadores autorizados terão acesso aos dados individuais. Além disso, os dados

Rubrica do Pesquisador:

Rubrica do Participante:

coletados serão utilizados apenas nesta pesquisa e os resultados poderão ser divulgados em dissertações, relatórios técnicos, eventos e/ou revistas científicas.

Este protocolo de pesquisa foi submetido ao Comitê de Ética em pesquisa da UERJ (CEP), tendo sido aprovado de forma a assegurar o direito à liberdade e ao anonimato dos sujeitos de pesquisa, preservando a dignidade dos mesmos.

Você receberá uma via deste termo onde consta o telefone/e-mail e endereço institucional do pesquisador responsável, e demais membros da equipe, podendo tirar as suas dúvidas sobre o projeto e sua participação, agora ou a qualquer momento.

Contatos do Pesquisador Responsável: Vitor Balbio da Silva, número do celular (21) 97983-4681

Caso você tenha dificuldade em entrar em contato com o pesquisador responsável, comunique o fato à Comissão de Ética em Pesquisa da UERJ: Rua São Francisco Xavier, 524, sala 3018, bloco E, 3º andar, - Maracanã - Rio de Janeiro, RJ, e-mail: etica@uerj.br - Telefone: (021) 2334-2180.

Declaro não ter nenhum distúrbio psiquiátrico ou ter labirintite. Estou ciente do inteiro teor deste TERMO DE CONSENTIMENTO e entendi os objetivos, riscos e benefícios, estando de acordo em participar do estudo proposto, sabendo que dele poderei desistir a qualquer momento, sem sofrer qualquer punição ou constrangimento.

Nome do participante da Pesquisa:

Pesquisador Responsável: