

Exploring motor and sensory devices in a bicycle simulator

Explorando dispositivos motores e sensoriais em um simulador de bicicleta

Raphael de Souza e Almeida, Renato Cherullo, Daniel Radetic,
Greis Francy M. Silva-Calpa, Alberto Barbosa Raposo
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, Brasil
{rsalmeida, cherullo, radetic, greis, abraposo}@tecgraf.puc-rio.br

Abstract—This study presents the SimBike (Bicycle Simulator with Non-conventional Devices), a virtual reality simulator that uses motor and sensory devices to provide greater user involvement and comfort. The SimBike seeks to recreate the activity of riding a bicycle by taking full advantage of the efforts made in its execution, such as making curves with the handlebar or body weight, pedaling, braking, among others. It offers feedbacks commonly expected by the rider, such as the wind sensation depending on speed and the sensation of trepidation on uneven terrain. We evaluated the simulator with 16 users, obtaining satisfactory results regarding comfort, immersion, usability, and user experience. The results also suggest improvements to make the simulator suitable for all types of users, regardless of their characteristics such as weight and height, and also propose future studies.

Index Terms—Bicycle simulator, Virtual reality, Cyber sickness, Non-conventional devices, User experience

Resumo—Este estudo apresenta o SimBike (Simulador de Bicicleta com Dispositivos Não-convencionais), um simulador de bicicleta em realidade virtual que utiliza dispositivos motores e sensoriais visando prover maior envolvimento e conforto ao usuário. O SimBike busca recriar a atividade de andar de bicicleta assimilando ao máximo os esforços realizados na sua execução, tais como fazer curvas com o guidão ou o peso do corpo, pedalar, frear, entre outros. Ele oferece feedbacks comumente esperados pelo ciclista, como a sensação de vento dependendo da velocidade e a sensação de trepidação em terreno irregular. Avaliamos o simulador com 16 usuários, obtendo resultados satisfatórios no que diz respeito ao conforto, imersão, usabilidade e experiência do usuário. Os resultados sugerem também melhorias para que o simulador seja adequado para todo tipo de usuário independentemente das suas características, além de uma proposta de estudos futuros.

Palavras-chave—Simulador de bicicleta, Realidade virtual, Cyber sickness, Dispositivos não-convencionais, Experiência do usuário

I. INTRODUÇÃO

A indústria 4.0 ou quarta Revolução Industrial envolve um conjunto grande de inovações tecnológicas, impulsionando a criação de produtos e serviços cada vez melhores. Essa revolução tem a simulação como uma de suas nove principais tecnologias. A simulação utiliza a modelagem baseada em um sistema computacional para criar um programa, que representa o todo ou uma parte de um processo [1].

Nesse contexto, a simulação em realidade virtual é uma das ferramentas inovadoras que abre novos horizontes no desenvolvimento de diversos estudos nesse campo. Entre eles, os simuladores para recriar a atividade de andar de bicicleta, onde sua utilidade cresce a medida que podemos inseri-los em diversos contextos, tais como educação e segurança no trânsito, reabilitação física e treinamento esportivo.

Na literatura, os simuladores de bicicleta utilizam, geralmente, dispositivos motores para apoiar a simulação. Entre esses dispositivos estão os sensores para captar a movimentação com imãs simetricamente colocados nas rodas, bem como o uso do Microsoft Kinect para captar o movimento do usuário. Simuladores voltados para treinamento, usam vídeos com bicicletas ergométricas, soluções com *interactive rollers*, rampas variáveis e até sistemas online multi usuários com ambientes 3D.

No entanto, ainda são necessárias soluções que possam simular o ambiente virtual em movimento com todos os feedbacks necessários, fazendo com que a experiência do usuário seja mais confortável, imersiva e realista. Freina e Ott [2], destacam que para uma completa sensação de imersão, nossos cinco sentidos devem estar envolvidos. Apesar disso, a maioria dos dispositivos de imersão atuais como os Head-Mounted Displays (HMDs) estimulam apenas a visão e a audição.

O oferecimento desses feedbacks não é crucial, pois ao atentarmos para os movimentos básicos de um ciclista

num passeio de bicicleta cotidiano (pedalar, acionar os freios, manusear o guidão, etc.), bem como as respostas a esses movimentos (aceleração, vento, trepidações, entre outros), percebemos o quão complexo pode ser separar cada conjunto de sentidos para chegarmos a cada uma das sensações presenciadas. Buscamos, na realidade virtual, através de estudos de dispositivos sensoriais, motores e sensorimotores, simulações que possam atingir um patamar onde possamos atender às expectativas dos usuários [3]. Esta constante procura nos leva cada vez mais a novos estudos que têm como finalidade o desenvolvimento de simulações cada vez mais próximas à realidade.

No entanto, em nenhum dos estudos na literatura foram constatados dispositivos de entrada que abordem a utilização do equilíbrio como forma de prover alteração na direção da bicicleta por ocasião da movimentação dentro do ambiente sintético de simulação, nem de feedbacks que utilizem, entre outros, a utilização do vento como dispositivo sensorial produzido pela detecção de movimento.

Verificamos a importância da utilização desses dispositivos a partir do experimento realizado em uma primeira versão do nosso simulador. Essa versão consiste em uma bicicleta acoplada a um rolo de treino, tendo como dispositivos motores um mouse posicionado no quadro de forma a captar os movimentos do guidão apenas, 4 imãs posicionados simetricamente na roda traseira e um sensor capaz de detectar o momento destes, além da versão DK2 do Oculus Rift como HMD.

É importante considerar que no uso de uma bicicleta em um ambiente real, ao efetuarmos uma curva, executamos um movimento com o nosso corpo com a intenção de iniciar a mudança de direção, seguido de alteração do ângulo de ataque da roda dianteira (através do guidão). No experimento realizado, observamos que esse movimento do corpo não é captado e, com isso, pessoas que possuem experiência em andar de bicicleta normalmente sentem desconforto. Dependendo da sensibilidade do usuário, esse desconforto pode gerar sintomas que levam ao cyber sickness.

Nesse sentido propomos o SimBike, um simulador de bicicleta que utiliza dispositivos motores e sensoriais não convencionais, de baixo custo, em vez dos dispositivos motores comumente utilizados (direção empregando o guidão). O objetivo deste estudo é avaliar se o uso dos diferentes dispositivos incluídos no SimBike contribuem na usabilidade, conforto e imersão dos usuários.

Desenvolvemos o SimBike e o avaliamos com 16 usuários. Avaliamos duas versões do simulador, divergindo apenas no modo de controle da bicicleta. Na primeira versão a trajetória é controlada somente pelo guidão (modo guidão) e na segunda o efeito do guidão é ponderado por uma taxa variável em função da distribuição de peso aplicada pelo usuário (modo equilíbrio). Os resultados sugerem que, usando o SimBike com a nova possibilidade, pessoas interessadas em treinamentos indoor poderão utilizar, de maneira geral, o simulador empregando técnicas normalmente utilizadas para pedalar com liberdade de

movimentação, aproximando-se da atividade normal de forma agradável.

A próxima seção apresenta os trabalhos relacionados com este estudo. Em seguida, descrevemos o simulador proposto. A seção seguinte detalha o processo de avaliação do simulador, incluindo os participantes, procedimento e método de avaliação. Os resultados encontrados são apresentados na seção adiante. Posteriormente, apresentamos a discussão de nosso estudo e as conclusões finais.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Segundo Carlos Sun e Zhu Qing [4], a literatura existente sobre simulação de ciclismo pode ser classificada em três categorias gerais: uma categoria envolvendo a replicação exata do momento do piloto, a geração de movimento e o feedback tátil, uma segunda categoria envolvendo a aplicação da reabilitação médica e uma terceira categoria envolvendo a investigação de fatores humanos no ciclismo. Além disso, os autores mencionam a existência de sistemas comerciais voltados para fitness e treinamento, incluindo a incorporação de vídeos reais de corridas ou rotas famosas, como o Tour de France. Eles também destacam que existe uma escassa literatura voltada para o desenvolvimento e uso de simuladores de ciclismo para fins de engenharia de tráfego e segurança.

Dos diferentes estudos na literatura, destacamos aqueles onde encontramos dados que, em linhas gerais, se relacionam e servem de comparativo com aspectos do nosso estudo.

Bolton et al. [5] desenvolveram uma bicicleta onde são captadas a aceleração e os movimentos, buscando contato com os obstáculos e tarefas ao redor do usuário. Os autores destacam que se bem essa interação proporciona grande imersão, a alta latência ocasionada pelo uso da câmera do Microsoft Kinect, pode ocasionar riscos de queda dos jogadores. Além disso, o fato de restringir os movimentos a um itinerário pode comprometer a imersão ao prejudicar a interação, um dos pilares utilizados em realidade virtual. Outro fator, a falta de sensação de velocidade, por vezes pode provocar desconforto e quebra de imersão.

Kiran Ijaz et al. [6] utilizam no seu simulador o *Google Street View imagery* e um triciclo. A detecção de movimento ocorre fruto de um sensor posicionado na roda traseira, já a alteração da direção ocorre por meio de um controle de HMD atrelado ao guidão. A sensação de imersão é transmitida a partir da detecção de movimento através das imagens. Esse tipo de direção, a certas velocidades, pode gerar um desconforto muito grande oriundo da pouca suavização proporcionada pelo controle ao ser acionado, bem como a divergência entre sensação física e sua percepção por ocasião da mudança. Uma outra observação do texto foi o fato das imagens obtidas possuírem objetos aparentemente em movimento, porém aparecem estáticos, fruto do momento em que foram fotografados.

Ruslan Rakhmatov et al. [7] buscaram em seu trabalho captar vibrações induzidas ao guidão e velocidade do

ciclista por ocasião de um trajeto em diversos tipos de terreno reais, gerando modelos de textura a serem identificados em um percurso de realidade virtual. Aspecto destacado pelos participantes desse experimento foi a falta de um feedback de forma macro relativo às características da superfície que pudesse ser perceptível, tendo um impacto negativo no realismo, sendo necessário usar atuadores capazes de mover toda a estrutura da bicicleta.

Carlos Sun e Zhu Qing [4] exploraram dispositivos motores não convencionais para o desenvolvimento tanto de inputs como feedbacks. Em seu experimento um dínamo foi utilizado para obter a velocidade e a aceleração através de sua variação de voltagem, além de potenciômetro para obter a frenagem, na roda traseira. Para a direção foram testados quatro sistemas: vídeo (através do Microsoft Kinect Sensor), mecânico (utilizando uma base que possibilita rotação), giroscópico e ótico, sendo este último o utilizado. Os autores observaram que a centralização de software da bicicleta pode ser útil para combater a deriva da direção e problemas relacionados. Além disso, erros na posição do guidão podem se acumular ao longo do tempo com um sistema de laser e, neste caso, a centralização da bicicleta pode ser feita automaticamente quando a bicicleta está andando reta ou manualmente pelo pesquisador. Um gerador de vibração pode ser facilmente adicionado para simular o movimento devido às imperfeições da estrada e à interação pneu e pavimento; no entanto, isso pode não ser necessário devido à quantidade de movimento que é gerada pela pedalada e a resistência do contador da roda traseira.

Pierre Boulanger et al. [8], desenvolveram o MedBike, um simulador de bicicleta de baixo custo para apoiar a reabilitação de pessoas com problemas cardíacos utilizando componentes não convencionais para a atividade. No MedBike, os pacientes pedalam em uma bicicleta estática enquanto sua saúde é monitorada. Os autores utilizaram um potenciômetro linear para os freios, um ventilador para o paciente perceber a velocidade, sensores de força posicionados no guidão para captar a tentativa de mudar a direção e um sensor posicionado na roda dianteira para captar a aceleração. Um aspecto a destacar seria o fato da bicicleta utilizada não possibilitar a liberdade de movimento no guidão ou até mesmo feedback háptico, o que pode prejudicar a imersão. Apesar dos resultados positivos obtidos com experimentos iniciais, este ainda será submetido a experimentos para comprovar suas hipóteses.

Baseado nos resultados desses estudos constatamos que, em linhas gerais, eles se complementam e poderiam prover uma experiência agradável se condensados. Com a finalidade de conceber uma simulação que contemplasse soluções para o problema proposto, nós exploramos outras formas de dispositivos no SimBike, conforme apresentado a seguir.

III. SIMBIKE - SIMULADOR DE BICICLETA COM DISPOSITIVOS NÃO-CONVENCIONAIS

O SimBike oferece os seguintes recursos: vento para contribuir na sensação de velocidade, trepidação fruto do contato com o terreno, a informação de impacto na forma de resposta háptica, redução de velocidade proporcional à pressão exercida em ambos os freios, aumento de velocidade com latência reduzida e alteração de direção conforme constatamos ao andar de bicicleta (movimentando o corpo na direção que queremos seguir e, posteriormente, alterando o guidão para a direção desejada).

A descrição e implementação desses recursos no SimBike são detalhados a seguir.

A. Descrição

Utilizamos dispositivos de entrada (motores), de saída (sensoriais) ou ambos (sensorimotores) a fim de fornecer ao usuário um ambiente imersivo e confortável no simulador proposto. Os dispositivos utilizados permitem converter as entradas (movimentos do usuário) em sentidos a serem percebidos no simulador, bem como possibilitar feedbacks necessários para suprir vazios causados propensos a *cyber sickness*. Cabe ressaltar que, por meio de fórmulas matemáticas, buscamos a adaptação desses dispositivos e sua aproximação às demandas advindas desta interação. Por meio de dispositivos motores, podemos detectar os esforços e suas intensidades aplicados pelo usuário adaptando componentes que possam perceber movimentos normalmente executados na bicicleta. Em se tratando do objeto de estudo, nem toda a física é passível de ser detectada (como exemplo a inércia fruto da tentativa do início de um deslocamento ou frenagem, dependendo do peso do usuário), porém, nesses casos, é possível detectar resultantes de movimentos, tendo como exemplo o esforço realizado para pedalar, onde aplicando um determinado torque aos pedais obtemos a velocidade. Demandaria um estudo mais profundo e maiores investimentos para captar a força executada para empurrar o pedal de forma precisa a fim de se obter a velocidade, porém é possível captar a rotação da coroa entre outros componentes presos ao pedal e obter uma velocidade linear e, juntamente com o valor do raio, realizando conversões entre velocidade linear e angular, obter a velocidade em relação às rodas da bicicleta [9].

Os feedbacks recebidos, fruto da demanda do usuário, são transmitidos por meio de dispositivos sensoriais. Sua baixa latência e sincronismo são fatores importantes que devem sempre ser priorizados, sob pena de quebra de imersão bem como grande causa de *cyber sickness*. Em alguns casos, como no movimento de pedalar, facilmente recebemos um feedback através da observação da animação do pedal girando, além da percepção da câmera do HMD mudando de posição na direção apontada pelo guidão, denotando movimento. Em outros casos são necessários o auxílio de componentes específicos, como a percepção de contato com o solo, onde precisamos de uma resposta

háptica que proporcione uma vibração à bicicleta de forma proporcional ao contato estabelecido entre a roda e o solo.

Considerando esses aspectos, propomos o SimBike. Este simulador consiste em uma bicicleta presa a um rolo de treinamento da marca ALTMAYER Sport [10], onde sua base foi reforçada por duas barras de metal de 1.5 metros presas uma em cada base. Na extremidade de cada barra foi posicionada uma (1) célula de carga para medir o deslocamento do peso do ciclista. Estes dispositivos captam a diferença de peso por ocasião do deslocamento do corpo do usuário em cima da bicicleta a medida que este estiver executando uma curva. Juntamente com o controle do HMD, é feita alteração da direção da bicicleta. Além disso foram posicionados no quadro dois potenciômetros lineares com a finalidade de medir a intensidade com que os freios são aplicados, 2 motores de 5V para prover uma resposta háptica por ocasião de impactos e aumento da velocidade para proporcionar uma percepção de contato com o solo. Adaptamos também um mouse com o objetivo de captar o movimento dos pedais. Finalmente, utilizamos um HTC Vive Pro como HMD para a visualização do ambiente de realidade virtual [11].

B. Implementação

Inserimos à bicicleta diversos dispositivos com a finalidade de detectar os movimentos realizados pelo usuário e produzir os retornos esperados. Os dispositivos ditos como motores são responsáveis por captar os movimentos do ciclista e, no SimBike, captam a aceleração da bicicleta, sua frenagem e mudanças de direção. Já os dispositivos sensoriais, responsáveis pelo feedback percebido pelo usuário, são percebidos através do vento dando noção de velocidade, vibração para transmitir a noção de contato com o solo e resposta a impactos. Estes dispositivos são descritos a seguir.

1) *Aceleração*: A aceleração é conseguida a partir da aplicação de uma força aos pedais da bicicleta, portanto ela deve ser proporcional. Para captar esse movimento, o sensor deve perceber o vetor de movimentação e sua intensidade sem limitação de hardware, além de captá-lo com pouca latência. Nesse sentido, optamos por adaptar um mouse à proteção do pedal, pela sua característica de captar diferentes direções independente da distância percorrida. Seu uso mostrou-se satisfatório a medida que o adaptamos à uma superfície que foi presa ao quadro da bicicleta, de forma a captar os movimentos do pedal (“Fig. 1”). Verificamos que a perda pelo deslocamento desta proteção pelo mouse pôde ser corrigida por meio de algoritmos. Um aspecto positivo da implementação dos componentes foi a criação de um SDK capaz de gerenciar portas de arduino conectadas ao hardware da simulação, de forma a permitir a utilização de mais de uma placa deste tipo, possibilitando a utilização dos dispositivos desejados.

2) *Frenagem*: A frenagem demanda uma precisão tão acurada quanto a aceleração, exigindo ainda diferentes níveis de intensidade pelas diferentes necessidades de se



Figure 1. Mouse inserido de forma a captar a movimentação do pedal da bicicleta.

aplicar o freio durante a detecção de velocidade. Portanto, optou-se pelo uso de potenciômetros lineares. Utilizamos dois módulos de 10k, sendo um para o freio traseiro e o outro para o dianteiro. Podemos observar esses módulos implementados na bicicleta indicados pela letra e na “Fig. 2” e, na “Fig. 3”, seus módulos adaptados às peças impressas digitalmente.



Figure 2. Bicicleta disposta no dispositivo de uso onde podemos observar os sensores: “a” indicando o ventilador usado para sensação de velocidade, “b” indicando as células de carga que medem a intensidade com que o usuário projeta seu corpo para os lados da bicicleta, “c” indicando o controle do HMD para obter a direção, “d” indicando os motores de 1.5V que fornecem a resposta háptica e “e” indicando os potenciômetros que captam a intensidade da frenagem.

3) *Mudança de direção*: Um detalhe importante constatado com tempo de uso e dados obtidos por ciclistas



Figure 3. Potenciômetros utilizados na implementação dos freios.

experientes é que, com o aumento da velocidade, a direção da bicicleta é melhor estabelecida com a aplicação do peso do usuário na direção desejada (direita ou esquerda). Já em baixas velocidades, o peso do ciclista busca obter o equilíbrio da bicicleta e o guidão se torna uma opção mais viável. Com a finalidade de captar esse tipo de movimento, quatro células de carga (com capacidade de aguentar até 50 kg cada) foram distribuídas entre as extremidades das barras de metal presas ao rolo de treino. Todas as células foram conectadas ao módulo amplificador HX711, configurados para leitura de dados a 80Hz de frequência. Para o guidão foi utilizado o controle do HMD, neste caso o HTC Vive. As células de carga e o controle podem ser observados, respectivamente, nas letras *b* e *c* da Figura 2, em círculos coloridos da mesma cor da letra.

4) *Vento*: Empregamos um ventilador buscando suprir tanto a quebra da inércia gerada pela alteração da intensidade da velocidade bem como incrementar os sentidos na tentativa de aproximar cada vez mais da sensação de velocidade que deve ser sentida pelo ciclista. A energia fornecida pelo ventilador é controlada com a finalidade de ser proporcional à velocidade detectada. A letra *a* da “Fig. 2” mostra como o ventilador é posicionado no SimBike.

5) *Contato com o solo e impactos*: Uma das respostas onde se deve chamar a atenção para outros tipos de feedback está relacionada às colisões. Tentativas de buscar o máximo de experiência podem gerar contusões sérias, ao passo que pouca informação recebida sobre o assunto pode vir a gerar desconforto, especialmente em casos onde o usuário está esperando um contato que não acontece. Neste caso constatamos o impacto da bicicleta quando escutamos um som característico e sentimos o contato com outro objeto, o que pode ser seguido de algo mais sério ou não.

A fim de auxiliar na transmissão da sensação de re-

torno referente à impactos, foram utilizados dois motores DC 1.5-5V contendo pesos em suas extremidades. Posicionamos estes motores embaixo do banco e no guidão (letra *d* na “Fig. 2”). Outra demanda advinda desse tipo de sensor háptico foi a percepção, conforme a velocidade detectada, das irregularidades do terreno provocadas pelo contato do pneu da bicicleta com o solo.

IV. AVALIAÇÃO

Realizamos uma avaliação empírica do SimBike a fim de identificar a capacidade de imersão da simulação utilizando os dispositivos citados anteriormente. Avaliamos dois cenários do SimBike. Num primeiro cenário, chamado de “guidão”, utilizamos o controle do HMD fixo ao guidão como forma de dar a direção da bicicleta isoladamente. No segundo cenário, chamado de “equilíbrio”, utilizamos o modo guidão ponderado por uma taxa variável em função da distribuição de peso aplicada pelo usuário na bicicleta.

Os participantes do estudo foram convidados a percorrer um mesmo circuito que foi criado para ambos os cenários, onde uma metade dos usuários realizou primeiro o cenário “equilíbrio” e, posteriormente, o cenário “guidão”, e a outra metade iniciou com o cenário “guidão”, terminando com o cenário “equilíbrio”.

A. Participantes

17 pessoas (15 homens e 2 mulheres) participaram dos testes. Suas idades variam entre 19 e 43 anos. Eles têm experiências diferentes tanto em VR como em andar de bicicleta, bem como pesos e alturas diferentes, como apresenta a Tabela I.

Table I
RELAÇÃO DE IDADE, PESO, ALTURA DOS PARTICIPANTES

	Idade	Peso	Altura
P1	37	92	1.76
P2	29	80	1.74
P3	30	70.8	1.69
P4	24	85	1.78
P5	43	105	1.84
P6	19	79	1.95
P7	32	72	1.83
P8	31	110	1.85
P9	29	90	1.74
P10	24	49	1.58
P11	23	58	1.70
P12	38	69	1.65
P13	35	97	1.84
P14	29	90	1.83
P15	29	119	1.75
P16	21	57	1.68

Essas variações permitiram identificar padrões na captação de dados baseados na experiências de determinados subgrupos como pessoas mais pesadas (P1, P5, P8, P9, P13, P14 e P15) ou mais leves (P10, P11, P16), pessoas com experiência em VR (P4, P6, P8 e P14) ou experiência em andar de bicicleta (P1, P2, P3, P4 e P15). cabe ressaltar que do total de participantes, um deles (P16) estava aprendendo a andar de bicicleta.

B. Procedimento

Os testes foram realizados no Laboratório de Realidade Virtual do Instituto Tecgraf da PUC-Rio, em um horário diferente para cada participante. Durante cada teste esteve presente um participante, bem como o pesquisador no papel de avaliador. Os testes foram gravados em duas câmeras GoPro para obter informação, principalmente, das reações dos usuários durante o uso da bicicleta em cada trecho do trajeto. Os participantes assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido.

Em cada teste, o usuário teve a tarefa de navegar por um circuito único previamente preparado. O circuito consiste em uma pista em formato semelhante a uma letra “B”, contendo um estreitamento em sua última curva, como mostra a “Fig. 4”. O circuito exige a movimentação em ambas as direções (direita e esquerda) e outras formas de explorar os recursos existentes no hardware da bicicleta, devendo o participante passar por pontos determinados e pré localizados no trajeto. O estreitamento da pista, localizado na última curva, objetiva forçar o participante a reduzir a velocidade empregando os freios e posicionar-se de maneira correta no circuito. Caso ele não consiga e acabe colidindo, o impacto por meio da vibração na bicicleta deve ser percebido. Um cronômetro foi exibido para motivar os ciclistas a terminar a pista em um curto período de tempo.

Antes dos testes, cada participante recebeu a explicação sobre o conceito e a cinemática do simulador. Eles foram convidados a preencher um questionário que aborda aspectos como frequência que utiliza bicicleta, uso de equipamentos de realidade virtual, idade, altura e peso. Para o teste, o participante ocupou seu lugar na bicicleta, colocou o HMD na cabeça e aguardou orientações. Tanto o HMD como a posição do participante na bicicleta foram calibrados no início do teste, tendo em vista a diferença de altura e peso de cada um. O pesquisador esteve atento para auxiliar em detalhes na simulação, caso necessário.

O tempo total da atividade, incluindo a explicação, o teste e o preenchimento dos questionários teve uma duração máxima de 15 minutos. A qualquer momento a atividade poderia ser interrompida a pedido do participante, sendo registrado o motivo da interrupção.



Figure 4. Circuito preparado para o experimento.

C. Método de avaliação

Avaliamos o simulador a partir de observações dos usuários com o protocolo *think aloud*, além de informação obtida em três diferentes questionários, bem como de dados obtidos no log do sistema.

Seguindo o protocolo *think aloud*, pedimos aos participantes que relatassem suas sensações (boas e ruins) e tudo o que esteja ocorrendo ao seu redor enquanto usam o simulador. Seus relatos permitiram orientar a busca por dados, bem como esclarecimento de dúvidas.

Após o teste, cada participante respondeu três questionários: um questionário da SimBike, o *Igroup Presence Questionnaire* (IPQ) e o *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ).

O questionário da SimBike avalia aspectos específicos do simulador proposto numa escala de 1 a 7, tais como usabilidade, experiência do usuário, imersão e realismo.

A imersão dos participantes foi medida por meio da adaptação do IPQ, originalmente desenvolvido por Schubert et al. [12]. Este questionário utiliza o conceito de presença física para identificar o sentimento de presença do usuário no ambiente virtual. Usamos uma escala de 1 a 7, sendo 1 a pior e 7 a melhor pontuação. O IPQ avalia três eixos: Presença Espacial (a sensação de estar fisicamente presente no ambiente virtual), Envolvimento (medir a atenção dedicada ao ambiente virtual e ao envolvimento com o experimento), e Realismo (medindo a experiência subjetiva do realismo no ambiente virtual).

Finalmente, aplicamos o questionário SSQ, utilizado para medir o mal-estar ou sensações próprias do *cyber sickness* que por ventura tenha sido reportado, ou não, pelo usuário durante a simulação. Cabe notar que usamos uma versão adaptada do SSQ, proposta por Carvalho et al. [13], originalmente desenvolvido por Kennedy et al. [14]. O questionário é graduado com notas de 0 a 3, contendo, respectivamente, as legendas “nenhum”, “levemente”, “moderado” e “severo”.

Os dados coletados nos questionários foram analisados e comparados com a informação obtida no *think aloud*, bem como com os dados do trajeto realizado pelo usuário. Os resultados são descritos a seguir.

V. RESULTADOS

Os resultados obtidos nos dois cenários avaliados (modo guidão e modo equilíbrio) sugerem que o simulador proposto possui características que contribuem para o conforto e imersão do ciclista no ambiente virtual. No entanto, identificamos que a configuração do simulador favoreceu aos usuários de baixa estatura e foi menos favorável para aqueles com altura acima de 1,80 m.

No que diz respeito à sensação de mal-estar decorrente do uso do simulador identificamos que, a partir do questionário SSQ, houve um pequeno aumento de intensidade e sintomas no modo equilíbrio “Fig. 5”. Constatamos também que esse aumento ocorreu principalmente nos seis participantes com altura acima de 1,80m (P5, P6, P7, P8,

P13 e P14). Eles apresentaram 3 ou mais sintomas no grau moderado, principalmente “dificuldade de manter o foco”, “tontura com olhos abertos” e “tontura com olhos fechados”. Destacamos ainda que o resto dos participantes tiveram menos sintomas de mal-estar no modo equilíbrio comparado ao modo guidão. Cabe notar que a maioria dos sintomas apresentados nos participantes foram de grau leve nos dois cenários.

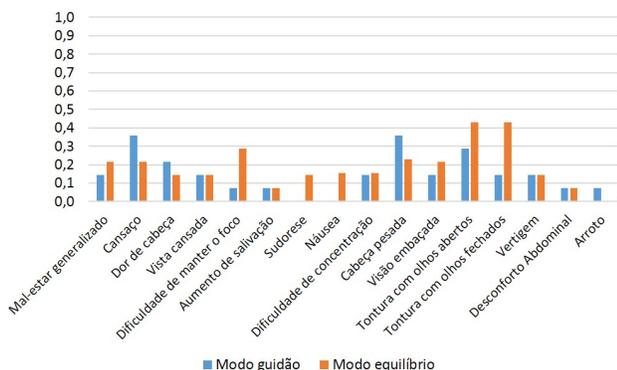


Figure 5. Média dos sintomas no SSQ nos dois modos avaliados.

Em relação aos resultados obtidos no questionário IPQ, que mede o sentimento de presença dos participantes no ambiente virtual, identificamos valores muito similares nos dois modos (guidão e equilíbrio) (“Fig. 6”). O quesito presença espacial foi o melhor valorado, já o fator realismo foi o que teve a valoração mais baixa. Isto pode ter ocorrido principalmente porque alguns objetos na cena, tais como algumas casas, somente apareciam quando o participante estava muito próximo a elas.

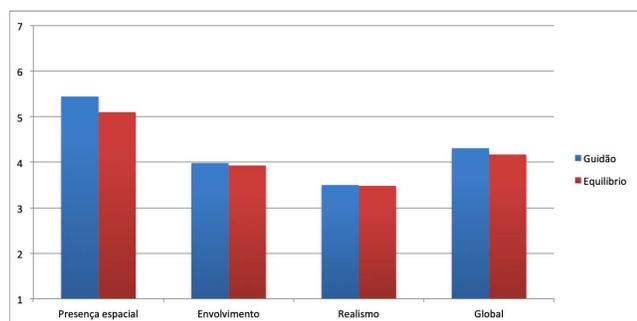


Figure 6. Média dos fatores IPQ nos modos guidão e equilíbrio.

A média dos valores obtidos no fator que avalia a sensação global de estar no ambiente virtual (Global na “Fig. 6”) foi de 4.3 e 4.2, para os modos guidão e equilíbrio, respectivamente. Destacamos que os participantes com estatura abaixo de 1,65m, reportaram valores mais altos de imersão global.

A média dos itens relacionados à presença espacial resultou em 5.4 no modo guidão e 5.1 no modo equilíbrio.

A média dos itens sobre envolvimento e realismo foram 3.9 e 3.5, respectivamente, porém as avaliações sobre a percepção dos participantes frente às situações geradas pelos dispositivos no simulador (ventilador para geração de vento e motores de 1.5-5V para sensação de contato com o solo), foram melhores que as obtidas no IPQ.

A “Fig. 7” revela que o simulador proposto com os diferentes dispositivos motores e sensoriais contribuiu favoravelmente no uso, imersão e experiência do usuário. Porém ainda é necessário melhorar aspectos relacionados ao realismo no ambiente, em que pese o fato de não terem valorações negativas, o que irá contribuir sobremaneira na imersão do ambiente de forma geral.

No que diz respeito à experiência do usuário e facilidade de uso, identificamos que a maioria dos participantes destacaram o andar de bicicleta no simulador como sendo “muito prazeroso” e fácil de usar. Apenas um participante indicou a experiência como sendo “ruim”, o que provavelmente ocorreu pois ele não se adaptou à mudança de direção no modo “guidão”, fato comentado pelo participante em seus relatos durante os experimentos.

A maioria dos participantes manifestaram terem sentido o vento, principalmente nos trechos com velocidade, o qual contribuiu na sua imersão no ambiente. Segundo a análise de velocidade do trajeto de cada participante e o *think aloud*, constatamos que a não percepção do vento por alguns participantes está relacionada à baixa velocidade ou ao stress em manobrar, em alguns casos.

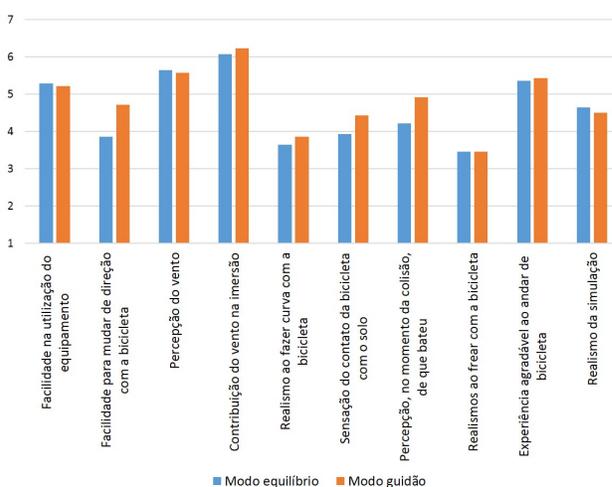


Figure 7. Média das avaliações nos questionários nos modos guidão e equilíbrio.

Um fato foi observado nos testes do modo equilíbrio com os participantes P1, P5, P8, P9, P13, P14 e P15, todos com peso acima de 90 kg. Nas situações onde as velocidades são maiores, onde a taxa variável em função da distribuição de peso aplicada pelo usuário é grande, o gráfico da velocidade possui picos mais acentuados.

Observamos abaixo 2 gráficos do participante P15, sendo o primeiro gráfico relacionado com a velocidade em função do tempo (“Fig. 8”), onde percebemos apenas uma variação positiva em y, e o segundo gráfico, que mostra as variações de ângulos do guidão em função do tempo (“Fig. 9”), onde percebemos uma escala positiva (quando o usuário vira o guidão para a direita) e negativa (quando o usuário vira o guidão para a esquerda) em função de y. Cada ponto colorido representam um mesmo instante em ambos os gráficos.

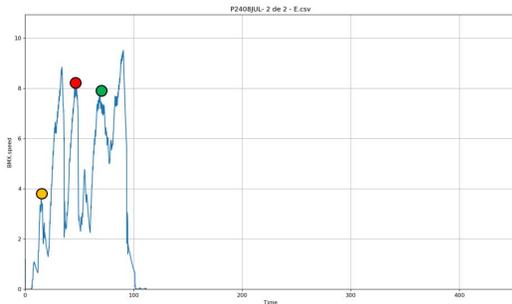


Figure 8. Gráfico da velocidade do participante P15 no cenário equilíbrio.

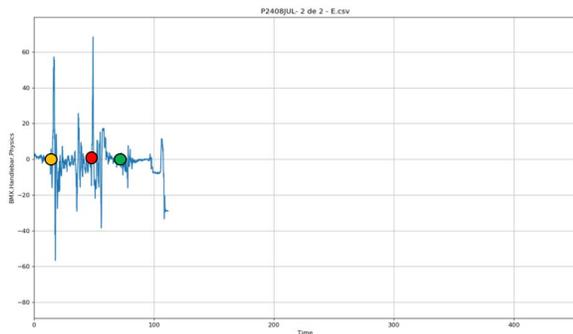


Figure 9. Gráfico da variação angular do guidão do participante P15 no cenário equilíbrio.

Além dos gráficos podemos observar também a pista utilizada, bem como o trajeto executado pelo usuário (“Fig. 10”). Nela observamos os mesmos pontos coloridos dos gráficos, representando, da mesma forma, seus instantes.

A análise dos fatos observados será detalhada na subseção “Sensibilidade do cenário equilíbrio” da próxima seção.

VI. DISCUSSÃO

Analisando nosso simulador, de maneira geral, em que pesem os dois cenários avaliados e que a maioria dos sintomas apresentados nos participantes foram de grau leve em ambos, obtivemos dados que sugerem que o simulador proposto possui características que contribuem no conforto

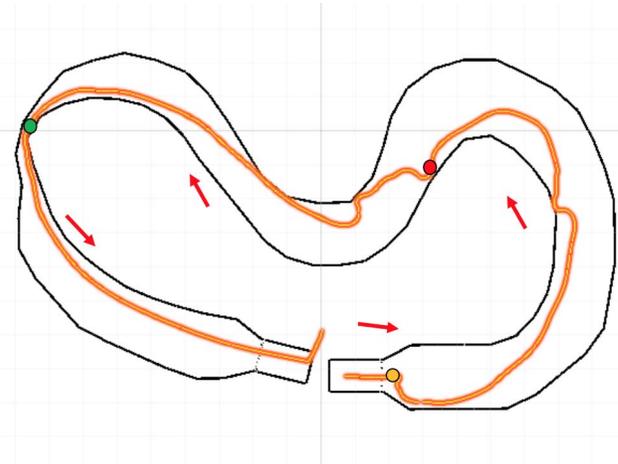


Figure 10. Circuito realizado pelo participante P15 no cenário equilíbrio.

e imersão do ciclista no ambiente virtual. Sua facilidade de aprendizagem pôde ser constatada ao percebermos que a maioria dos participantes atribuíram notas mais altas à utilização do equipamento no segundo percurso, independente de qual cenário tenha sido aplicado. As avaliações relativas à experiência do usuário e facilidade de uso destacaram o andar de bicicleta no simulador como sendo “muito prazeroso” e “fácil de usar”.

A. SSQ

Destacamos que os participantes tiveram menos sintomas de mal-estar no cenário equilíbrio se comparado ao cenário guidão, o que pode ter ocorrido fruto do esforço do usuário em efetuar a curva com o peso do corpo para a direção desejada, correspondendo, em parte, às expectativas de seu sistema vestibular. Relatos do participante P4 corroboram essa observação. P4 relata que mudar de direção no modo guidão é estranho, pois está acostumado a jogar o peso do corpo para fazer a curva. Ele está entre os participantes com experiência em VR que apresentaram dois ou mais sintomas no modo guidão.

B. Simulação e sua imersão

Analisando o questionário IPQ constatamos valores muito similares nos dois cenários (guidão e equilíbrio) (“Fig. 6”). Um fato observado que pode estar associado ao posicionamento confortável do usuário na bicicleta foi que os participantes com estatura abaixo de 1,65m reportaram valores mais altos de imersão, onde podemos entender a melhor adaptação de pessoas com menores estaturas.

Outro fato importante se deve ao simulador proposto, contendo os diferentes dispositivos motores e sensoriais, contribuir favoravelmente no uso, imersão e experiência do usuário. Fato observado com a maioria dos participantes, pois estes manifestaram terem sentido o vento, principalmente nos trechos com velocidade, o qual contribuiu na sua imersão no ambiente. Com a finalidade de melhorar

os resultados, mais dispositivos devem ser estudados, como por exemplo uma resistência maior ao iniciar a pedalada com a finalidade de quebrar a inércia.

C. Sensibilidade do cenário equilíbrio

Analisando o exemplo citado na seção anterior referente aos participantes acima de 90kg, tendo como informação o peso de 119kg do participante P15, podemos observar que, por ocasião do início do deslocamento, ao tentar aumentar sua velocidade e ajustar o guidão para a direção correta, P15 obtém uma grande amplitude no gráfico de angulação do guidão, seguida de uma grande perda de velocidade no gráfico de velocidade.

Observando os vídeos e comparando com o desenho do traçado do circuito, podemos entender que os picos são os pontos onde o participante perde o controle da bicicleta fruto da tentativa de ajustar o guidão e utilizar o peso para fazer a curva. Isso ocorre pela sensibilidade gerada pelos valores estabelecidos na aplicação do fator do peso. Pontos onde podemos facilmente identificar esse tipo de comportamento são no início da primeira curva para a esquerda e no afunilamento.

Nos casos onde os usuários possuíam pesos abaixo de 60kg, tanto o gráfico do cenário guidão como o do cenário equilíbrio não apresentaram diferenças significativas entre si. Com isso podemos concluir a necessidade de inclusão, por ocasião da calibração do posicionamento da câmera, de informação referente ao peso do usuário no sistema com a finalidade de ajuste de sensibilidade. Isto tendo em vista que pessoas acima do peso dos pesquisadores que estabeleceram a taxa variável tiveram maiores dificuldades relacionadas à sensibilidade das células de carga do que as pessoas mais leves.

VII. CONCLUSÕES

Neste estudo apresentamos um experimento que envolve a utilização de uma bicicleta como dispositivo sensorimotor em um passeio virtual capaz de prover uma experiência agradável ao usuário. Elaboramos o SimBike, um simulador virtual de bicicleta com os equipamentos de baixo custo, em vez dos dispositivos motores comumente utilizados (direção empregando o guidão). Seus conceitos buscaram proporcionar maior conforto ao usuário e maior envolvimento no simulador.

Para nosso experimento foi criado um circuito com a finalidade de permitir ao usuário explorar as implementações realizadas, analisando sua interação com o equipamento. Para isso foram criados dois cenários, ambos divergindo apenas no modo de controle da bicicleta. Num cenário a trajetória é controlada somente pelo guidão (modo guidão) e no outro o efeito do guidão era ponderado por uma taxa variável em função da distribuição de peso aplicada pelo usuário (modo equilíbrio). Criados os cenários, avaliamos o simulador por meio de observação dos testes e aplicação de três questionários. Abordamos aspectos relativos ao uso dos dispositivos inseridos, à

imersão no simulador, e ao mal-estar gerado por ocasião de sua utilização.

Como resultados constatamos que a configuração do simulador proposto resultou mais favorável para os usuários de baixa estatura, que reportaram valores mais altos de imersão, bem como identificamos que, a partir do questionário SSQ, houve um pequeno aumento de intensidade e sintomas no modo equilíbrio (“Fig. 5”). Um fato observado foi que esse aumento ocorreu principalmente nos seis participantes com altura acima de 1,80m.

Em relação aos resultados obtidos no questionário IPQ identificamos valores muito similares nos dois modos, porém as avaliações sobre a percepção dos participantes frente às situações geradas pelos dispositivos no simulador foram melhores que as obtidas no IPQ. No que diz respeito à experiência do usuário e facilidade de uso, os usuários com pesos acima dos 90kg perceberam uma maior sensibilidade no cenário equilíbrio fruto de leituras maiores nos fatores a serem majorados no guidão, porém identificamos que a maioria dos participantes destacaram o fato de andar de bicicleta no simulador como sendo “muito prazeroso” e fácil de usar.

Nossa solução é adequada a medida que o deslocamento do corpo é percebido pelo simulador, provocando a alteração esperada pelo participante, amenizando possíveis frustrações, reduzindo vazios que afastam a percepção do sistema vestibular daquilo que estamos efetivamente enxergando. Os resultados obtidos nos levam a refletir sobre melhoras a serem feitas e, a partir destas, novos testes com a finalidade de avaliar a utilização do peso como taxa para ser aplicada ao guidão em função da velocidade.

Baseado nessa reflexão, existe a possibilidade dos seguintes trabalhos futuros:

- Uso do LeapMotion, que capta os movimentos das mãos do usuário, atrelado às mãos de um avatar, com o intuito de aumentar a imersão.
- Implementação de resistência para pedalar, a fim de tornar possível a percepção de esforço para a quebra de inércia.
- Melhorias na resposta háptica, reduzindo latência e transmitindo melhor a sensação de contato com o solo.
- Melhorias no áudio, como inserção do som da corrente da bicicleta.
- Melhorias na observação da bicicleta, como alterar o movimento dos pedais para apenas quando estiver efetivamente pedalando, com a finalidade de transmitir maior realismo.

Outros projetos com destaque são a adaptação do trabalho para reabilitação bem como o emprego em simuladores de ciclismo para fins de engenharia de tráfego e segurança.

REFERENCES

- [1] C. E. M. Abreu, D. R. B. Gonzaga, F. J. Santos, G. A. S. Gonçalves, J. F. Oliveira, K. D. M. Oliveira, L. M. Figueiredo, M. P. Nascimento, P. G. Oliveira, S. T. S. Yoshinaga, T. T.

- Oliveira, V. S. Mat, em "Indústria 4.0 : Como as Empresas Estão Utilizando a Simulação para se Preparar para o Futuro", in *Rev. Cienc. Exatas Tecnol.*, v. 12, n. 12, 2017, pp 49-53
- [2] L. Freina, and M. Ott, "A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education State Of The Art and Perspectives", in '15 Conference paper at Proceedings of The 11th International Scientific Conference eLearning and Software for Education (eLSE), 2015, pp 133-141
- [3] <https://www.roadtovr.com/mountain-biking-in-virtual-reality-oculus-rift-activetainment-ebove-b01-bike/>, retrieved 2019-06-26
- [4] C. Sun, and Z. Qing, "Design and Construction of a Virtual Bicycle Simulator for Evaluating Sustainable Facilities Design", in *Hindawi Advances in Civil Engineering '18 Research Article*, 2018, pp 01-10
- [5] J. Bolton, D. Lirette, M. Lambert, and B. Unsworth, "PaperDude: A Virtual Reality Cycling Exergame", in *CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2014, pp. 475-478
- [6] K. Ijaz, Y. Wang, N. Ahmadpour, and R. A. Calvo, "Physical Activity Enjoyment on an Immersive VR Exergaming Platform", in *IEEE Life Sciences Conference '17 Extended Abstracts on Multi-Society Perspectives on Personalized Healthcare and Wearables*, 2017, pp. 13-15
- [7] R. Rakhmatov, A. Abdulali, W. Hassan, M. Kim, and S. Jeon, "Virtual Reality Bicycle with Data-Driven Vibrotactile Responses from Road Surface Textures", in *IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM) '18 Extended Abstracts*, 2018, pp. 496-500
- [8] P. Boulanger, A. Pournajib, W. Mott, e S. Schaeffer, "A Low-cost Virtual Reality Bike for Remote Cardiac Rehabilitation", in *Lecture Notes in Computer Science*, v. 2, 2017, pp 6 · December 2017
- [9] LaValle, Steven M., *Virtual Reality*, Cambridge University Press, 2019, pp. 426
- [10] <https://www.altmayer.com.br/produtos/ver/40/al04-alt-ciclo-rola-de-treinamento>, retrieved 2019-07-05
- [11] <https://www.vive.com/us/#>, retrieved 2019-07-15
- [12] <http://www.igroup.org/pq/ipq/construction.php>, retrieved 2019-07-14
- [13] M. R. Carvalho, R. T. da Costa, e A. E. Nardi, "Simulator Sickness Questionnaire: Tradução e Adaptação Transcultural". in '11 *Jornal Brasileiro de Psiquiatria*, v. 60(4), 2011, pp. 247-252.
- [14] R. S. Kennedy e L. H. Frank, "A Review of Motion Sickness with Special Reference to Simulator Sickness" (Report No. NAV-TRAEQUIPCEN 81-C-0105-16). Orlando, FL: Naval Training Equipment Center, 1985.