

Impact of Frame Rate in Augmented Reality for Mobile Devices

S. Sanches, C. Corrêa, C. Oliveira, and J. Nascimento

Abstract—Augmented Reality applications based on fiducial markers enable real-time interactions between users and virtual/real elements. Since these applications are computationally expensive, they must be carefully designed to run on mobile devices. Developers of applications for mobile platform must be concerned to deal with minimum limits for requirements such as the frame rate. The objective of this paper is to check whether there is a correlation between the frame rate and the ease-of-use of the system, in addition to finding the minimum limit for this requirement. The results showed, first, there is a correlation between these factors, and, second, the minimum limit varies according to the type of interaction.

Index Terms—Augmented Reality, Ease of use, Frame rate, Mobile devices.

I. INTRODUÇÃO

OS sistemas de Realidade Aumentada (RA) são aqueles que possuem as características de combinar algo real com algo virtual e de possibilitar a interação humano-computador em tempo real, bem como realizar o alinhamento tridimensional (3D) entre esses elementos (registro 3D). Ambos os tipos de elementos (reais e virtuais) devem ser exibidos ao usuário perfeitamente alinhados e sincronizados, de forma que pareçam existir no mesmo espaço [1]. Nesse ambiente misturado, utopicamente, o usuário não seria capaz de diferenciar o que é real do que é virtual [2]. Em ambientes de RA, normalmente os elementos reais são predominantes em relação aos elementos virtuais.

Os primeiros sistemas de RA eram conhecidos por utilizarem equipamentos sofisticados [3], como capacetes equipados com visores que permitiam visualizar o ambiente aumentado e rastrear a direção dos movimentos do pescoço para que a cena virtual fosse exibida corretamente, conforme o ponto de vista do usuário. Várias outras tecnologias que possibilitam uma experiência de RA utilizando equipamentos convencionais surgiram no decorrer dos anos e, como consequência, as aplicações tornaram-se mais populares [4].

Um exemplo dessas aplicações são as que se baseiam no uso de marcadores fiduciais [5]–[7], que são padrões impressos em uma superfície plana, e que auxiliam o alinhamento 3D dos elementos virtuais na cena. Técnicas de visão computacional reconhecem esses marcadores, calculam e mantêm a coerência de seus posicionamentos em relação ao visor da câmera [5]. Desse modo, a imagem final mostra o elemento virtual sobreposto ao marcador, que está posicionado no ambiente real, propiciando o alinhamento entre elementos virtuais e reais.

Silvio Sanches, Cléber Corrêa, Claiton Oliveira e Joana Nascimento pertencem ao Departamento Acadêmico de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Brasil email: silviosanches, clebergimenez, claitonoliveira@utfpr.edu.br, joananasascimento@alunos.utfpr.edu.br.

O fato das aplicações de RA exigirem interação humano-computador e registro 3D em tempo real tornam a taxa de atualização de quadros da cena aumentada um dos requisitos mais importantes do projeto. Como a qualidade gráfica dos objetos virtuais pode afetar o desempenho do sistema e algumas dessas aplicações podem ser executadas em plataformas de baixo poder computacional, a taxa de quadros deve ser mantida em níveis aceitáveis para garantir a satisfação do usuário em lidar com a aplicação. Essa satisfação pode estar associada com a facilidade de uso, mas não diretamente relacionada ao desempenho do usuário. Além disso, a dificuldade em utilizar uma aplicação em função da baixa taxa de atualização pode variar conforme o tipo de interação.

Inserido neste contexto, o presente trabalho objetiva mostrar, por meio do desenvolvimento de protótipos e da condução de experimentos subjetivos, que a facilidade de uso do sistema de RA em plataforma móvel está associada com a taxa de quadros por segundo (QPS) atingido pela aplicação. E que quando os valores dessa taxa atingem determinados limites, o engajamento do usuário com a aplicação pode ser comprometido, dificultando a interação humano-computador. Adicionalmente, os experimentos procuraram evidenciar que a tolerância da percepção dos usuários em relação aos limites mínimos da taxa de atualização pode variar em tais aplicações conforme o tipo de interação humano-computador.

Importa ressaltar que há pesquisas em contextos diferentes daquele no qual se insere o presente trabalho que evidenciam a importância da manutenção de uma taxa de QPS mínima. Um exemplo é a investigação da taxa de quadros ideal em renderizações hápticas (de sensações táteis) para sistemas de RA e Realidade Virtual (RV) [8]. Diversos canais sensoriais podem ser explorados em sistemas de RA e RV, como: visual, tátil e auditivo [2], configurando em diferentes possibilidades de estudo da percepção do ser humano, inclusive quando há a combinação de dois ou mais canais. No presente trabalho, somente o canal visual é o objeto de estudo.

Com relação à organização do artigo, além da introdução, na seção II são apresentados os trabalhos correlatos, na seção III são descritos os detalhes dos experimentos realizados, na seção IV, os resultados e discussões são apresentados, e finalmente na seção V, a conclusão do artigo.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Muitos estudos voltados ao entendimento de questões perceptuais em sistemas de RA podem ser encontrados na literatura [9]. Um exemplo são as pesquisas que investigam a influência do ângulo de visão da câmera durante as interações [10]. Outro exemplo de trabalhos na área são experimentos que

associam aspectos do perfil do usuário com sua capacidade de interagir com a aplicação [11].

O impacto da variação da taxa de quadros em um determinado intervalo de tempo na percepção dos usuários pode ser avaliada em relação a diferentes aspectos. Na exibição de um vídeo, por exemplo, incômodos relacionados ao QPS pode ser percebido facilmente quando níveis muito baixos são atingidos. Existem diversas pesquisas que buscam encontrar limites e quantificar o impacto dessa diminuição na percepção humana. No trabalho de Ou *et al.* [12], por exemplo, foram aplicadas avaliações subjetivas para obtenção de *feedback* do usuário em relação ao QPS, considerando, inclusive, a qualidade de vídeos de diferentes resoluções.

Em Ukhanova *et al.* [13] foi apresentada uma métrica para a avaliação da qualidade de vídeos, considerando a taxa de atualização de quadros como um aspecto relevante. Naquele trabalho foram realizados experimentos subjetivos que exibiam aos usuários vídeos de baixa e alta qualidade. Tais vídeos eram diferentes, entre outros aspectos, em suas taxas de atualização.

Nas aplicações que utilizam os serviços de comunicação de uma rede de computadores, em que larguras de banda variam consideravelmente entre os receptores, o tempo que um vídeo leva para ser codificado antes do envio deve ser pequeno o suficiente para manter a aplicação com uma taxa de atualização aceitável. Essa taxa, que pode variar conforme o tamanho do quadro, é um fator determinante para a satisfação do usuário. Segundo Ou *et al.* [12], a taxa de quadros é um fator que influencia a qualidade e, nessa situação, deve haver harmonia entre a qualidade da imagem e do movimento reproduzido no conteúdo do vídeo.

No estudo apresentado em Ou *et al.* [14] foi avaliado como a percepção da qualidade de um vídeo pode mudar conforme a variação da taxa de quadros. Foi demonstrado que a degradação da qualidade do vídeo está ligada a redução desse fator.

Entre os trabalhos que investigam a influência da variação da taxa de quadros na renderização do contexto de RA, pode ser destacado o estudo realizado em Perritaz *et al.* [15]. No trabalho, os autores implantaram sistemas de RA que se adaptam em tempo real, considerando alguns requisitos como: taxa de quadros, resolução da imagem e atrasos. O projeto tinha como foco a qualidade de experiência de usuários, procurando valores ideais para esses requisitos.

No trabalho de Li *et al.* [16] os autores realizaram experimentos para identificar o impacto da taxa de quadros em sistemas de RA. O trabalho, no entanto, teve como foco as aplicações executadas em dispositivos com telas maiores, onde o manuseio do dispositivo é diferente da pesquisa realizada neste trabalho. Além disso, a interação baseada na movimentação de marcadores não foi avaliada naquele trabalho.

Em Nascimento e Sanches [17] são apresentados resultados preliminares desta pesquisa. Naquele trabalho, apenas um protótipo foi utilizado e poucos voluntários foram recrutados. No entanto, a condução dos experimentos subjetivos daquele trabalho serviram como experiência importante para realização dos experimentos formais aqui aplicados.

Na tabela I é exibida uma comparação entre os principais trabalhos que investigam o efeito da taxa de QPS em apli-

cações de RA executadas em dispositivos móveis, incluindo o presente trabalho. São apresentados os objetivos e as conclusões obtidas dessas pesquisas.

III. DEFINIÇÃO E APLICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Com o objetivo de correlacionar a taxa de quadros mantida pela aplicação de RA em plataforma móvel com a facilidade de uso, bem como identificar limites mínimos para esse requisito tolerados pelos usuários, optou-se por realizar uma série de experimentos subjetivos.

Tais experimentos utilizaram quatro protótipos, que são aplicações de RA executadas em dispositivo móvel com diferentes formas de interação. A presente seção foi dividida em subseções para facilitar o entendimento dos experimentos conduzidos. Na subseção III-A são descritas as hipóteses a serem comprovadas por meio dos experimentos e na subseção III-B são apresentados os tipos de interação humano-computador. Os protótipos utilizados nos experimentos são apresentados na subseção III-C. Os dados dos voluntários, as tarefas envolvidas e as diretrizes para aplicação dos experimentos são apresentados nas subseções III-D, III-E e III-F, respectivamente.

A. Hipóteses

Com base nos objetivos para os experimentos, as hipóteses assumidas foram:

- 1) Há uma correlação entre taxa de atualização de quadros e facilidade de uso de aplicações de RA em plataformas móveis;
- 2) A facilidade de uso de uma aplicação de RA em função da taxa de atualização de quadros pode variar conforme o tipo de interação humano-computador.

B. Definição dos Tipos de Interação

A primeira parte no desenvolvimento dos protótipos envolveu a definição dos tipos de interação por eles proporcionadas. Para essa escolha, utilizou-se como critério os dados obtidos de um levantamento realizado nas mais importantes lojas virtuais que disponibilizam aplicativos para dispositivos móveis, a Apple Store [18] e a Play Store [19], além de aplicações apresentadas nas principais bases de dados científicas (*IEEE Xplore*, *ACM*, *ScienceDirect* e *Springer*). Foram analisadas as 10 primeiras aplicações obtidas das buscas em cada base citada (desconsiderando as aplicações repetidas). Um total de aplicações foram consideradas nesta pesquisa. Os dados obtidos desse levantamento são exibidos na Fig. 1, apresentando os tipos de interação em aplicações de RA para dispositivos móveis, bem como as plataformas principais.

Como pode ser observado, existem aplicações de RA desenvolvidas para um número grande de dispositivos móveis; e o tipo de interação mais comum é o toque na tela do dispositivo para permitir ações dentro da aplicação e fornecer respostas visuais aos usuários.

Existem ainda, aplicações em que a interação humano-computador ocorre por meio da movimentação de marcadores fiduciais. Nesse caso, a movimentação dos marcadores provoca uma movimentação semelhante nos objetos virtuais associados, em uma relação de um para um (1 : 1), isto é, uma

TABELA I
COMPARAÇÃO ENTRE OS TRABALHOS QUE INVESTIGAM A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TAXA DE QUADROS EM SISTEMAS DE RA.

Artigo	Objetivos	Conclusões
Perritaz <i>et al.</i> [15]	Adaptar em tempo real a taxa de QPS para maximizar a experiência do usuário	Uma taxa de QPS adaptativa é melhor que uma fixa
Li <i>et al.</i> [16]	Analisar o efeito da variação da QPS no desempenho do usuário	A variação da taxa de QPS povoca pouco impacto no desempenho do usuário
Nascimento e Sanches [17]	Analisar o efeito da baixa QPS no desempenho do usuário	Baixa taxa de atualização não está diretamente relacionado com a facilidade de realizar tarefas dentro ambiente de RA
Presente trabalho	Analisar o efeito da QPS no desempenho do usuário para tipos diferentes de interações	Uma taxa de QPS mínima é necessária para garantir bom desempenho do usuário. Essa limite varia conforme o tipo de interação

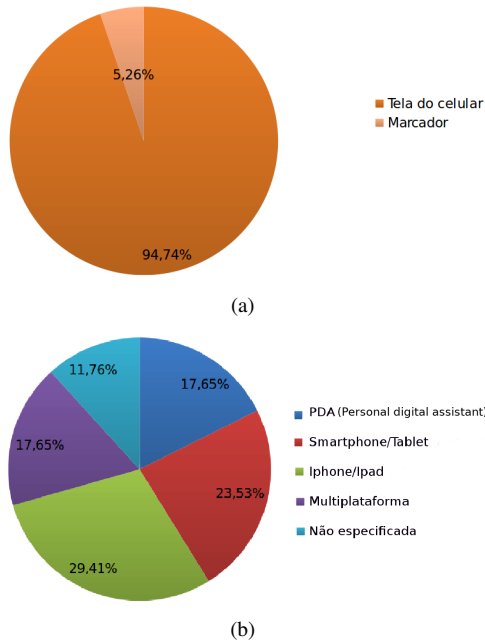


Fig. 1. Gráficos sobre interação humano-computador em aplicações de RA para dispositivos móveis: (a) Os tipos de interação mais usados em aplicações de RA; (b) Plataformas mais comuns.

alteração na posição do marcador fiducial indica uma alteração de posição do objeto virtual associado a tal marcador.

Com base nesse levantamento foram desenvolvidos os protótipos utilizados nos experimentos, nos quais a implementação dos dois tipos de interação citados foi realizada.

C. Protótipos Utilizados nos Experimentos

Conforme mencionado, quatro protótipos foram criados para a condução dos experimentos subjetivos. Dois dos protótipos desenvolvidos para realização dos experimentos reproduzem ambientes de RA baseados em marcadores fiduciais. Tais aplicações foram desenvolvidas usando o motor de jogos Unity3D [20], visto que a ferramenta disponibiliza uma série de recursos necessários aos protótipos, inclusive a possibilidade de sua utilização em conjunto com bibliotecas externas, que adicionam ao Unity3D diversas funcionalidades para produção de aplicações de RA.

A biblioteca Vuforia [21], que pode ser integrada ao Unity3D, também foi utilizada. A Vuforia possibilita o desenvolvimento de aplicações de RA que identificam marcadores

configurados no sistema e que estejam presentes na imagem capturada pela câmera do dispositivo. Os protótipos desenvolvidos neste trabalho foram compilados para execução no sistema operacional Android, instalado em um *smartphone* Moto Z Play (Android 7.0) com tela de 5,5 polegadas.

No primeiro protótipo, chamado de Protótipo A, a interação com o sistema é feita por meio da movimentação de marcadores fiduciais. O objetivo dos usuários na aplicação consiste em provocar a colisão entre dois objetos virtuais, uma esfera e um cubo, cada um deles associado à um marcador distinto, como exibido na Fig. 2(a).

Na cena, a esfera virtual possui um comportamento dinâmico previamente programado e permanece quicando durante todo o tempo de execução da aplicação. O cubo virtual, por sua vez, permanece fixo no marcador fiducial. Quando uma colisão é provocada, além da esfera virtual trocar de textura, o cubo virtual, que originalmente é branco (Fig. 2(a)), passa a exibir a cor vermelha.

Quando uma fase é concluída (a colisão é provocada), além da troca de textura, um botão com o rótulo “Próximo” é exibido para que uma nova fase seja iniciada. Nesse momento, o usuário deve mostrar a tela do dispositivo para o instrutor do teste, que verifica se a taxa de quadros calculada pela aplicação corresponde à que foi configurada previamente no sistema. Importa ressaltar que quando as taxas de quadros mais altas (10 e 18 QPS) são configuradas, pode ocorrer oscilações em torno desses valores. No entanto, essas oscilações não ultrapassavam a 2 QPS acima ou abaixo do valor configurado. Desse modo, não houve sobreposição de valores de QPS entre os experimentos. Em seguida, o usuário deve clicar no botão “Próximo” para que o cubo virtual receba a cor branca novamente.

Cada protótipo oferece cinco fases, sendo que cada uma delas mostra uma esfera que representa uma bola de um esporte diferente. Os esportes são: futebol, basquete, golfe, basebol e tênis.

Em cada fase, uma taxa de quadros diferente é mantida. A Tabela II mostra a média da taxa de QPS que a aplicação mantém para cada fase. O valor representa uma média porque, embora configurado previamente, existe certa oscilação em torno do valor definido. Quando o usuário toca a última esfera virtual, o sistema substitui a textura dessa esfera por uma nova textura de cor preta, indicando o final do experimento.

Outro protótipo desenvolvido nesta pesquisa, chamado de Protótipo B, possui interação por meio do toque na tela do

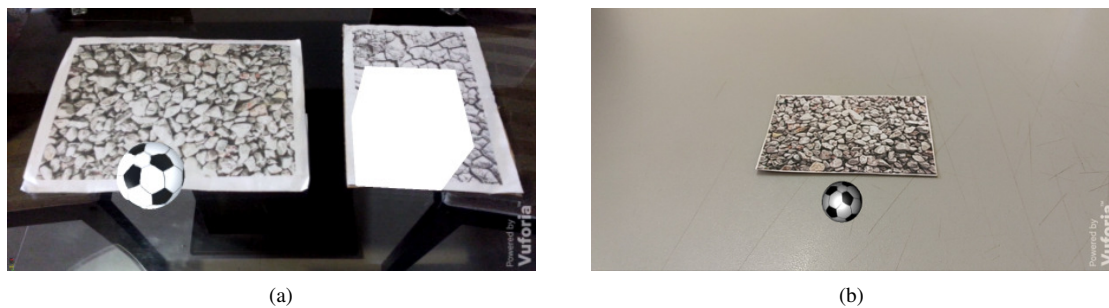


Fig. 2. Ambientes de RA renderizados pelos protótipos utilizados nos experimentos subjetivos. Em (a) podem ser visualizados os marcadores fiduciais sobre uma mesa real e os objetos virtuais associados a eles. Em (b), no qual a interação humano-computador se baseia em toque na tela, apenas um marcador é visualizado na cena.

TABELA II
OBJETOS VIRTUAIS EXIBIDOS DURANTE A INTERAÇÃO E AS RESPECTIVAS TAXAS DE ATUALIZAÇÃO CONFIGURADAS

Objeto Virtual- Esfera	QPS
Bola de Futebol	18
Bola de Basquete	10
Bola de Golfe	4
Bola de Beisebol	1,5
Bola de Tênis	1

dispositivo. A aplicação permite ao usuário tocar a esfera virtual, que também é gerada pelo sistema sobre um marcador real, que por sua vez, permanece estático sobre a mesa. Da mesma forma que ocorre no Protótipo A, a esfera virtual permanece quicando sobre o marcador durante todo o tempo de execução da aplicação (Fig. 2(b)). Quando a esfera virtual é tocada, a textura é alterada (mostrando a textura de uma nova bola) e o botão “Próximo” é exibido para que a próxima fase com uma nova taxa de quadros seja iniciada. Quando o usuário toca a última esfera, o sistema mostra uma textura preta, indicando o final do experimento.

Além dos protótipos A e B, foram desenvolvidos outros dois, denominados Protótipo C e Protótipo D. Esses dois últimos consistem em variações dos dois primeiros, nos quais todas as fases são exibidas com uma taxa fixa de atualização de quadros. O Protótipo C é uma variação do Protótipo A; o Protótipo D é uma variação do Protótipo B. Desse modo, uma vez configurada uma taxa de quadros nos Protótipos C ou D, ela não varia durante todas as fases da aplicação.

D. Voluntários

Para a realização dos experimentos foram recrutados 188 voluntários, que não possuíam experiência com aplicações de RA, executadas ou não em dispositivos móveis. Para evitar interferência nos experimentos, como aprendizagem de qualquer natureza ou uma aquisição de habilidade entre uma sessão e outra por parte de um mesmo voluntário, cada voluntário utilizou somente um protótipo, tendo uma única participação nos experimentos.

Os voluntários foram devidamente instruídos sobre a participação nos experimentos, envolvendo descrição dos objetivos, tarefas a serem desempenhadas, questões a serem respondidas

e possibilidade de desistência a qualquer momento, garantindo a integridade física e psicológica dos participantes.

E. Tarefas nas Aplicações

Nos protótipos A e C, o voluntário deve provocar em cada fase, uma colisão entre os objetos virtuais utilizando o marcador fiducial que permite movimentar o cubo virtual. Quando uma fase é concluída, o voluntário mostra a tela do dispositivo para o instrutor do teste verificar a taxa de quadros calculada pela aplicação. Em seguida, o voluntário deve clicar no botão “Próximo” para que o cubo virtual receba a cor branca novamente e uma nova fase seja iniciada, até a quinta fase, na qual o sistema mostrará uma textura preta para a esfera.

Nos protótipos B e D, o voluntário deve tocar a esfera virtual por meio da tela em cada fase. O voluntário também deve mostrar a tela do dispositivo para o instrutor verificar a taxa de quadros no final de cada fase e clicar no botão “Próximo”, que é exibido para que a próxima fase com uma nova taxa de quadros seja iniciada. Quando o voluntário tocar a última esfera virtual, a aplicação substituirá a textura da esfera com uma nova textura da cor preta, indicando o término do experimento.

F. Aplicação dos Experimentos

Os experimentos envolveram uma sequência de certas etapas, iniciada pela coleta das opiniões dos voluntários, a respeito da experiência na utilização dos protótipos. A estrutura do ambiente e alguns procedimentos adotados foram baseados em recomendações disponibilizadas por órgãos que regulamentam a aplicação de experimentos subjetivos voltados para avaliação de imagens e vídeos em aplicações multimídia [22], [23]. A postura dos participantes durante os experimentos pode ser visualizada na Fig. 3.

Cada voluntário foi instruído oralmente sobre seus objetivos e como proceder para interagir com o sistema, conforme mencionado anteriormente. Desse modo, as recomendações que foram adotadas com o objetivo de garantir uniformidade no ambiente e na forma de execução são:

- Os voluntários devem permanecer a uma distância de 20 a 30 centímetros do(s) marcador(es);

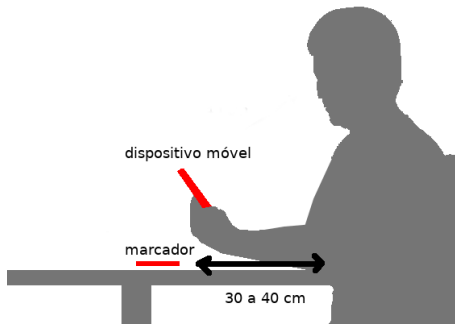


Fig. 3. Postura dos voluntários durante a participação nos experimentos.

- O ambiente deve ser mantido iluminado, mas sem incidência de luz que provoque reflexos sobre o(s) marcador(es) (reflexos podem dificultar no reconhecimento do(s) marcador(es) pelos protótipos);
- Os voluntários foram instruídos a manter o dispositivo móvel na horizontal (modo paisagem);
- Nos protótipos que utilizam dois marcadores, o marcador associado a esfera virtual (que representa uma bola de um esporte a cada fase) deve permanecer na posição horizontal (modo paisagem), e o marcador associado ao cubo virtual, na vertical (modo retrato), conforme mostrado na Fig. 2(a);
- Nos protótipos que utilizam dois marcadores, assim que houver colisão entre os elementos virtuais, deve-se colocar o marcador associado ao cubo virtual no local inicial, especificado previamente (Ver Fig. 2(a));
- Não se deve movimentar o marcador associado a esfera virtual;
- Os voluntários devem permanecer sentados durante a execução da aplicação.

A Fig. 4 mostra o ambiente em que foram realizados os experimentos subjetivos, com a utilização do protótipo que se baseia em interação humano-computador por meio da movimentação de marcadores.

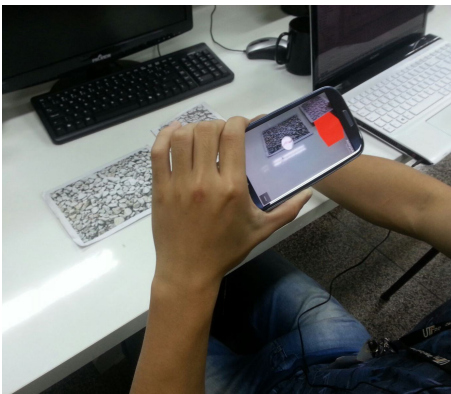


Fig. 4. Ambiente exibido pelo protótipo que utiliza interação humano-computador por meio da movimentação de marcadores.

Imediatamente antes do início do experimento foram exibidas aos voluntários todos os tipos de bolas que seriam mostradas, e foi explicado a quais esportes essas bolas pertenciam.

tenciam.

A condução dos experimentos foi dividida em duas etapas. Na primeira foram utilizados 48 voluntários, sendo que 24 utilizaram o Protótipo A e 24 utilizaram o Protótipo B. Nesta etapa, o voluntário era instruído a informar o esporte em que a bola visível naquele momento pertencia, quando uma ou ambas das situações ocorressem:

- houvesse maior dificuldade em realizar a tarefa do que na fase anterior do protótipo;
- ocorresse algum desconforto na visualização da cena, mesmo que esse desconforto não prejudicasse a realização da tarefa.

Ambas as informações foram solicitadas uma vez que pode não haver associação entre o desconforto causado pela baixa taxa de quadros e a dificuldade na realização da tarefa. Não houve preocupação em registrar o tempo gasto por cada voluntário, pois os objetivos desta pesquisa estão voltados a obtenção dos limites da taxa de quadros necessários para que se mantenha o engajamento durante a interação humano-computador, que pode estar associado com a facilidade de uso da aplicação de RA em plataforma móvel. Ainda que o tempo gasto seja alto, o usuário pode ter se mantido motivado durante todo o tempo que interagiu com a aplicação para completar as tarefas.

Na segunda etapa dos experimentos subjetivos foram utilizados 140 voluntários. Nessa etapa, os protótipos C e D foram configurados para realização de 10 experimentos, cada um deles representando a combinação de um protótipo com uma taxa de quadros. Um total de 14 voluntários emitiram opinião em um mesmo experimento. A Tabela III mostra todas essas combinações.

TABELA III
EXPERIMENTOS DA SEGUNDA ETAPA DIVIDIDOS EM COMBINAÇÕES DE UM PROTÓTIPO E UMA TAXA DE QUADROS ESPECÍFICA.

Exp.	Protótipo	QPS	Opiniões
1	Protótipo C (Marcador)	18	14
2	Protótipo C (Marcador)	10	14
3	Protótipo C (Marcador)	4	14
4	Protótipo C (Marcador)	1,5	14
5	Protótipo C (Marcador)	1	14
6	Protótipo D (Toque)	18	14
7	Protótipo D (Toque)	10	14
8	Protótipo D (Toque)	4	14
9	Protótipo D (Toque)	1,5	14
10	Protótipo D (Toque)	1	14

Nesta etapa, como todas as fases da aplicação possuíam a mesma taxa de quadros, era solicitado ao usuário que atribuísse uma nota que representasse sua satisfação geral com a aplicação após o final do experimento. Desse modo, foi possível realizar uma comparação das opiniões com o objetivo de verificar se os voluntários que utilizaram os protótipos com taxas de quadros mais limitadas avaliaram sua experiência de forma diferente daqueles que utilizaram as aplicações com taxas de quadro mais elevadas.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira análise, que trata da interpretação dos dados obtidos da primeira etapa dos experimentos, consistiu em

identificar, por meio das respostas dos voluntários, em que ponto houve maior dificuldade em realizar a tarefa, comparada com a dificuldade encontrada na etapa anterior. Conforme a hipótese 1 (subseção III-A), neste ponto, parte-se da premissa de que a dificuldade esteja associada com a diminuição da taxa de quadros, que pode influenciar negativamente na utilização do sistema. Os resultados obtidos dessa análise são exibidos na Fig. 5.

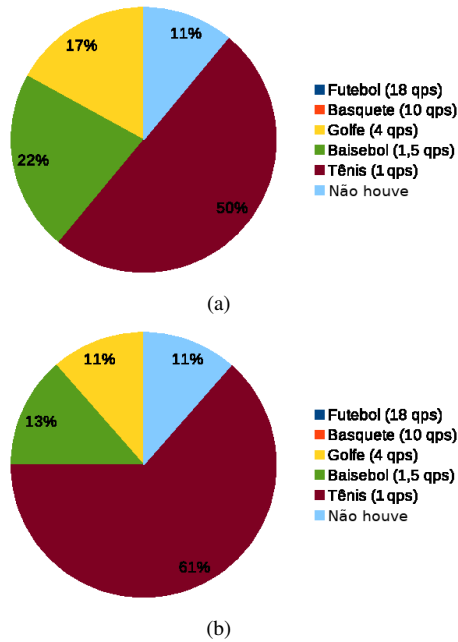


Fig. 5. Respostas dos voluntários ao questionamento de quando houve maior dificuldade em realizar a tarefa, considerando a fase anterior, referentes ao Protótipo A (a) e Protótipo B (b).

Como pode ser observado, em ambos os protótipos, a maioria dos usuários relataram dificuldade quando as variações dos quadros da aplicação estavam próximas de 1 quadro por segundo, situação na qual os quadros chegavam ao seu limite inferior. Nota-se, porém, que enquanto essa taxa se manteve em 1,5 quadros por segundo, o incômodo não era tão evidente, ainda que a atualização não fosse consideravelmente alta. Isso ocorre, provavelmente, devido a pequenos travamentos que ocorriam na aplicação quando a atualização de 1 quadro por segundo era atingida. Esse inconveniente ocorria de maneira bem mais sutil quando a taxa de 1,5 era mantida.

Nota-se também que, no Protótipo B, houve maior tolerância em relação às taxas de quadros menores (igual ou abaixo de 4 QPS) quando comparado ao Protótipo A. Em outras palavras, no Protótipo A, 17% dos voluntários relataram incômodo durante a interação com a bola de golfe (4 QPS) ao passo que, no Protótipo B, apenas 11% haviam relatado dificuldade durante a interação nessa mesma etapa do experimento.

A provável explicação para esse resultado é o fato da interação humano-computador realizada por meio de toque na tela ser mais usual que a movimentação de marcadores, ainda que os usuários não tenham tido experiência prévia com a aplicação específica.

Uma tarefa importante trata da análise os dados com o objetivo de encontrar o ponto em que ocorre algum de-

sconforto ao usuário na visualização da cena, mesmo que esse desconforto, do ponto de vista do próprio usuário, não prejudique a realização da tarefa. Os resultados obtidos dessa análise são exibidos na Fig 6.

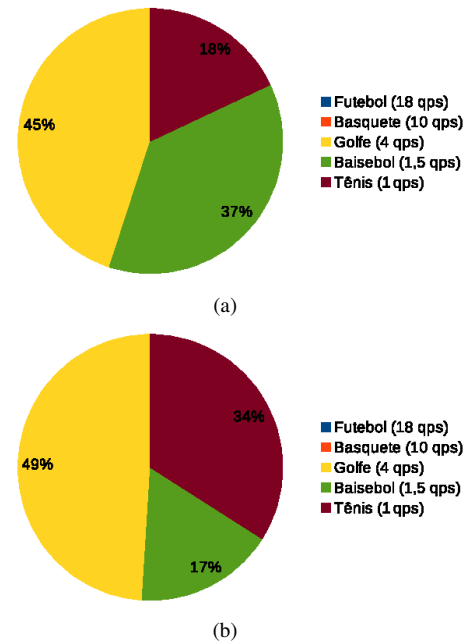


Fig. 6. Respostas dos voluntários ao questionamento de quando ocorre algum desconforto na visualização da cena, mesmo que esse desconforto não prejudique a realização da tarefa. Resultados referentes ao Protótipo A (a) e ao Protótipo B (b).

Como pode ser observado, a maioria dos usuários notou certo desconforto quando a taxa de atualização atingiu 4 quadros por segundos. Considerando também os resultados exibidos nos gráficos da Fig. 5, pode-se concluir que, de maneira geral, os usuários perceberam a redução da taxa de atualização, no entanto, não consideraram que essa ocorrência causou degradação do seu desempenho.

Na segunda etapa dos experimentos, foi solicitado a cada participante que atribuísse uma nota de 0 a 10 (em intervalos de 0,5), que representasse sua facilidade em realizar a tarefa que lhe foi atribuída. Os protótipos C e D foram configurados para serem executados com cada combinação protótipo-taxa de atualização, mostrada na Tabela III.

Quanto menor a dificuldade em reproduzir a tarefa, maior deveria ser a nota atribuída. Também foi explicado aos participantes que o tempo não seria importante e, por esse motivo, não seria estipulado um tempo limite. Cada participante avaliou uma única combinação protótipo-taxa de atualização, sendo que um total de 14 usuários avaliaram uma mesma combinação. As notas atribuídas foram calculadas de acordo com a Equação 1.

$$\bar{u}_{jk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{ijk} \quad (1)$$

onde u_{ijk} é o nível de facilidade atribuído pelo participante ou voluntário i para a utilização do protótipo j na taxa de quadros k . N representa o número de participantes daquele

experimento. Desse modo, a opinião média dos voluntários (*Mean Opinion Score* - MOS) em relação a cada combinação protótipo-taxa de atualização pode ser visualizada na Tabela IV.

TABELA IV
EXPERIMENTOS DA SEGUNDA ETAPA DIVIDIDOS EM COMBINAÇÕES DE UM PROTÓTIPO E UMA TAXA DE QUADROS ESPECÍFICA.

Exp.	Protótipo	QPS	MOS
1	Protótipo C (Marcador)	18	6,46
2	Protótipo C (Marcador)	10	7,03
3	Protótipo C (Marcador)	4	6,10
4	Protótipo C (Marcador)	1,5	4,21
5	Protótipo C (Marcador)	1	3,75
6	Protótipo D (Toque)	18	7,25
7	Protótipo D (Toque)	10	7,35
8	Protótipo D (Toque)	4	7,21
9	Protótipo D (Toque)	1,5	5,53
10	Protótipo D (Toque)	1	6,01

Os resultados mostram que os usuários não notaram dificuldade em realizar a tarefa enquanto a taxa de atualização se manteve acima de 4 quadros por segundo. Isso é mais evidente na utilização do protótipo que utiliza interação por meio de toque na tela. Mesmo quando a taxa de atualização atingiu seu limite (1 quadro por segundo), a facilidade de uso se manteve para muitos usuários quando a interação se fazia por meio de toque na tela.

Novamente, como na primeira etapa dos experimentos, a provável explicação para a diferença constatada nas médias dos dois protótipos, quando a taxa de atualização é baixa, deve-se a familiaridade de usuários com aplicações que suportam esse tipo de interação. Em outras palavras, a maior parte dos usuários costuma utilizar aplicações cuja interação é feita por meio de toque na tela, o que contribui para seu desempenho ao lidar com aplicações de RA com esse tipo de interação. Por outro lado, a interação por meio da movimentação de marcadores é menos usual e, portanto, mais influenciada pela taxa de atualização baixa. Dessa forma, há evidências para corroborar a hipótese 2 (subseção III-A, visto que o tipo de interação humano-computador pode influenciar na facilidade de uso de aplicações de RA em plataformas móveis com variações da taxa de atualização de quadros. Isso ocorre porque determinadas formas de interação estão mais presentes nas aplicações em geral do que outras, fazendo que o usuário se torne habituado com elas.

A análise final consistiu em verificar o grau de correlação entre a taxa de atualização e a facilidade de uso da aplicação avaliada pelos usuários. Para isso, foram calculados o coeficiente de Pearson, que mede o grau da correlação linear entre essas variáveis (taxa de atualização e facilidade de uso/opinião dos usuários), e o coeficiente de Spearman, que mede o grau da correlação não linear. A Fig. 7 mostra os resultados dessa análise.

Como pode ser observado, os coeficientes de Pearson e Spearman apresentaram os valores 0,61 e 0,79, respectivamente. Dessa forma, demonstra-se que a facilidade de uso tem certa relação com a capacidade do sistema de manter a fluência dos quadros, de modo que esse requisito deve ser mantido em

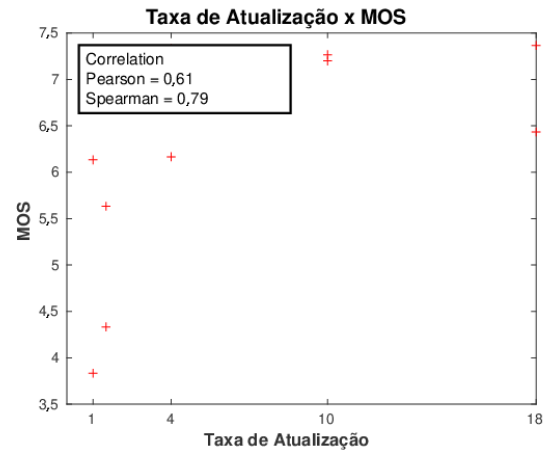


Fig. 7. Coeficientes de Pearson e Spearman para verificar a correlação entre a taxa de atualização e a MOS obtida na segunda fase dos experimentos.

limites mínimos para que a utilização da aplicação não seja comprometida.

V. CONCLUSÃO

Um dos requisitos importantes em sistemas de RA executados em dispositivos móveis é a manutenção de uma taxa de atualização de quadros, de modo a preservar a naturalidade visual da cena e não prejudicar as ações que o usuário pratica nas aplicações durante a interação humano-computador.

Estudos sobre os limites mínimos de taxa de atualização têm sua relevância em função das aplicações de RA possuírem normalmente custo computacional elevado. Por outro lado, os dispositivos móveis, apesar de sofisticados, possuem poder de processamento menor quando comparados aos *desktops* e aos *laptops*. Inserido neste contexto, este trabalho analisou a correlação entre a taxa de atualização de quadros e a facilidade de uso de aplicações de RA em plataformas móveis. Além disso, a facilidade de uso também foi analisada no sentido de identificar uma possível variação conforme o tipo de interação utilizada pela aplicação.

Por meio da condução de experimentos subjetivos, foi demonstrado que a facilidade de uso está relacionada com a manutenção de uma taxa de atualização mínima de quadros na renderização do ambiente visualizado pelos usuários. Adicionalmente, concluiu-se que limites mínimos tolerados pelos usuários para essas taxas de atualização são diferentes para os dois tipos de interação aqui analisados. Desse modo, pode-se observar que a percepção humana da taxa de atualização de aplicações de RA em plataformas móveis depende do tipo de interação.

Como perspectivas de trabalhos futuros, pretende-se analisar outros aspectos envolvidos na interação, que podem influenciar a facilidade de uso. Entre esses aspectos estão a identificação de limites para o tempo de resposta, a facilidade ou dificuldade de interagir em função do tamanho da tela e questões ergonômicas relacionadas com o peso dos dispositivos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem todos os voluntários que participaram dos experimentos, contribuindo para a realização da presente pesquisa.

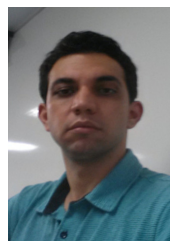
REFERÊNCIAS

- [1] R. T. Azuma, "A survey of augmented reality," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355–385, 1997.
- [2] R. Tori, C. Kirner, and R. Siscouto, Eds., *Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada*, 1st ed. Porto Alegre: Editora SBC, 2006.
- [3] B. Furht, Ed., *handbook of Augmented Reality*. Springer, 2011.
- [4] S. R. R. Sanches, D. M. Tokunaga, V. F. Silva, A. C. Sementille, and R. Tori, "Mutual occlusion between real and virtual elements in augmented reality based on fiducial markers," in *Proceedings of IEEE Workshop on Applications of Computer Vision – WACV 2012*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, jan 2012, pp. 49–54.
- [5] H. Kato and M. Billinghurst, "Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system," in *IWAR '99: Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1999, pp. 85–94.
- [6] K. Shabalina, A. Sagitov, H. Li, and E. Magid, "Comparing fiducial marker systems on stiffness perception through a robot eye," in *2017 10th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, June 2017, pp. 273–278.
- [7] D. Khan, S. Ullah, D. M. Yan, I. Rabbi, P. Richard, T. Hoang, M. Billinghurst, and X. Zhang, "Robust tracking through the design of high quality fiducial markers: An optimization tool for artoolkit," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 22421–22433, 2018.
- [8] B. Knorlein, M. Di Luca, and M. Harders, "Influence of visual and haptic delays on stiffness perception in augmented reality," in *Mixed and Augmented Reality, 2009. ISMAR 2009. 8th IEEE International Symposium on*, 19–22 2009, pp. 49–52.
- [9] E. Kruijff, J. E. Swan, and S. Feiner, "Perceptual issues in augmented reality revisited," in *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Oct 2010, pp. 3–12.
- [10] G. M. N. Taira, A. C. Sementille, and S. R. R. Sanches, "Influence of the camera viewpoint on augmented reality interaction," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 1, pp. 260–264, Jan 2018.
- [11] S. R. R. Sanches, M. Oizumi, C. Oliveira, E. F. Damasceno, and A. C. Sementille, "Aspects of user profiles that can improve mobile augmented reality usage," in *2017 19th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, Nov 2017, pp. 236–242.
- [12] Y.-F. Ou, T. Liu, Z. Zhao, Z. Ma, and Y. Wang, "Modeling the impact of frame rate on perceptual quality of video," in *Image Processing, 2008. ICIP 2008. 15th IEEE International Conference on*, Oct 2008, pp. 689–692.
- [13] A. Ukhanova, J. Korhonen, and S. Forchhammer, "Objective assessment of the impact of frame rate on video quality," in *Image Processing (ICIP), 2012 19th IEEE International Conference on*, Sept 2012, pp. 1513–1516.
- [14] Y.-F. Ou, Z. Ma, and Y. Wang, "Modeling the impact of frame rate and quantization stepsizes and their temporal variations on perceptual video quality: A review of recent works," in *Information Sciences and Systems (CISS), 2010 44th Annual Conference on*, March 2010, pp. 1–6.
- [15] D. Perritaz, C. Salzmann, and D. Gillet, "Quality of experience for adaptation in augmented reality," in *Proceedings of the 2009 IEEE international conference on Systems, Man and Cybernetics*, ser. SMC'09. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2009, pp. 888–893.
- [16] M. Li, K. Arning, L. Vervier, M. Ziefle, and L. Kobbelt, "Influence of temporal delay and display update rate in an augmented reality application scenario," in *Proceedings of the 14th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, ser. MUM '15. New York, NY, USA: ACM, 2015, pp. 278–286. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2836041.2836070>
- [17] J. S. Nascimento and S. R. R. Sanches, "A influência da taxa de quadros no desempenho de tarefas em sistemas de realidade aumentada," in *XII Workshop de Realidade Virtual e Aumentada*. Presidente Prudente, SP, Brasil: Cultura Acadêmica, 2015, pp. 108–112.
- [18] Apple Store, "itunes," 2017, acessado em maio. 2017, <https://itunes.apple.com>.

- [19] Google Inc., "Google play," 2017, acessado em maio. 2017, <https://play.google.com/store>.
- [20] Unity Technologies. (2017) Unity®. Acesso: Mai. 2018. [Online]. Available: <https://unity3d.com>
- [21] PTC Inc., "Vuforia engine," 2018, acessado em junho. 2018, <https://www.vuforia.com/>.
- [22] ITU-R, "Recommendation ITU-R BT.500-12 – methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures," International Telecommunications Union, Geneva, Switzerland, BT Series Broadcasting service (television) BT.500-12, 2009.
- [23] ITU-T, "Recommendation ITU-T BT.P.910 – subjective video quality assessment methods for multimedia applications," International Telecommunications Union, Series P: Telephone Transmission Quality, Telephone Installations, Local Line Networks (Audiovisual quality in multimedia services) P.910, 2008.



Silvio Ricardo Rodrigues Sanches é bacharel (2003) e mestre (2007) em Ciência da Computação pelo Centro Universitário Eurípides de Marília. Em 2013, Recebeu o título de doutor em Engenharia Elétrica (Sistemas Digitais) pela Universidade de São Paulo. Atualmente é professor na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus de Cornélio Procópio. Tem experiência nas áreas de Realidade Aumentada e Visão Computacional.



Cléber Gimenez Correa possui graduação em Tecnologia em Processamento de Dados pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC) - Extensão Ourinhos (2002), mestrado em Ciência da Computação pelo Centro Universitário Eurípides de Marília (UNIVEM), mantido pela Fundação de Ensino Eurípides Soares da Rocha (2008) e doutorado em Engenharia de Computação pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2015). Atualmente é professor na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus de Cornélio Procópio. Tem experiência nas áreas de: Interação Humano-Computador (incluindo interação háptica) e Realidade Virtual.



Claiton Oliveira possui graduação em Ciência da Computação pela Universidade Estadual de Londrina (2005), Mestrado e Doutorado pela Universidade de São Paulo em 2008 e 2012, respectivamente. Atualmente é professor na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus de Cornélio Procópio. Tem experiência na área de Processamento de Imagens e Visão Computacional.



Joana da Silva do Nascimento é graduada (2016) em Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), onde desenvolveu projeto de iniciação científica, entre os anos de 2015 e 2016, no Campus de Cornélio Procópio. Possui experiência na área de Programação para Jogos e Realidade Aumentada com foco em aplicação de experimentos subjetivos para obtenção de medidas de percepção do usuário.