

## **Um estudo longitudinal do treinamento motor com o uso de realidade aumentada**

### **A longitudinal study of motor training using augmented reality**

### **Un estudio longitudinal del entrenamiento motor mediante realidad aumentada**

Gilda Aparecida de Assis<sup>1</sup>, Alexandre Fonseca Brandão<sup>3</sup>, Ana Grasielle Dionisio Corrêa<sup>4</sup>, Gabriela Castellano<sup>2,3</sup>

1 Professor Adjunto do Departamento de Computação e Sistemas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Minas Gerais (MG), Brasil.

2 Professor Associado do Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia, Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, Campinas (SP), Brasil

3 Pesquisador Associado do Instituto Brasileiro de Neurociência e Tecnologia - BRAINN, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, Campinas (SP), Brasil

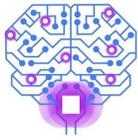
4 Professor Adjunto da Escola de Computação e Informática, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo (SP), Brasil

Autor correspondente: Gilda Aparecida de Assis  
E-mail: gildaadaa@ufop.edu.br

### **Resumo**

**Objetivo:** Apresentar a arquitetura e um protocolo de treinamento com um sistema de realidade aumentada, proposto para oferecer estímulos visuais para exercícios de ombro.

**Métodos:** Um sistema de realidade aumentada de baixo custo foi desenvolvido para fornecer imagem motora através de um braço virtual tridimensional que substitui a imagem do braço real do usuário na imagem espelhada na tela. Um protocolo foi proposto e três participantes com Acidente Vascular Cerebral (AVC) crônico com diferentes níveis de hemiparesia esquerda participaram do estudo longitudinal com o sistema. As medidas da amplitude de movimento foram obtidas no início e no final de cada sessão. **Resultados:** Foram observadas mudanças na faixa de movimento dos participantes com hemiparesia de nível leve e moderado. A faixa de movimento do participante com paralisia total (severo) não sofreu alterações. **Conclusão:** O sistema de realidade aumentada é



adequado para uso com participantes que apresentam diferentes níveis para paralisia do membro superior.

**Descritores:** Realidade Aumentada; Imageamento por Ressonância Magnética; Acidente Vascular Cerebral

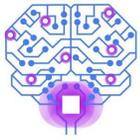
## Abstract

**Objective:** To present an augmented reality system's architecture and training protocol, designed to provide visual stimuli for shoulder exercises. **Methods:** A low-cost mixed reality system was developed to provide motor imagery through a three-dimensional virtual arm that replaces the image of the user's real arm in the mirror image on the computer screen. A protocol was proposed, and three participants with chronic stroke with different left hemiparesis levels participating the system's longitudinal study. Range of motion measurements was obtained at the beginning and end of each session. **Results:** Changes in participants' range of motion with mild and medium-level hemiparesis were observed. The participant's range of motion with total (severe) paralysis did not change. **Conclusion:** The augmented reality system is suitable for participants with different levels of upper limb paralysis.

**Keywords:** Augmented Reality; Magnetic Resonance Imaging; Stroke

## Resumen

**Objetivo:** Presentar la arquitectura y un protocolo de entrenamiento con un sistema de realidad aumentada, diseñado para proporcionar estímulos visuales para ejercicios de hombro. **Métodos:** Se desarrolló un sistema de realidad aumentada de bajo costo para proporcionar imágenes motoras mediante un brazo virtual tridimensional que reemplaza la imagen del brazo real en la imagen especular de la pantalla de la computadora. Se propuso un protocolo, y tres participantes con accidente cerebrovascular crónico con diferentes niveles de hemiparesia izquierda participaron en el estudio longitudinal. Las medidas del rango de movimiento se obtuvieron al principio y al final de cada sesión. **Resultados:** Se observaron cambios en el rango de movimiento de los participantes con hemiparesia leve y medio. El rango de movimiento del participante con parálisis total no



cambió. Conclusión: el sistema de realidad aumentada es adecuado para uso con participantes que tienen diferentes niveles de parálisis de las extremidades superiores.

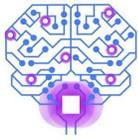
**Descriptor:** Realidad aumentada; Imagen de resonancia magnética; Accidente vascular cerebral

## Introdução

O Acidente Vascular Cerebral (AVC) é um problema de saúde pública grave e comum em todo o mundo, com altas taxas de mortalidade<sup>(1)</sup>. Uma das maneiras de melhorar as perspectivas de recuperação dos pacientes de AVC é através do engajamento do paciente com o seu tratamento, um processo que envolve tanto o paciente quanto sua família, cuidadores e profissionais de saúde, de modo a facilitar e apoiar o envolvimento ativo do paciente em seus próprios cuidados, o que inclui a sua participação ativa e comparecimento às consultas, exames e intervenções agendados pela equipe de saúde. Um estudo de caso mostrou que existe uma correlação entre o engajamento do paciente de AVC e o índice de desfecho desfavorável para pacientes na fase aguda do AVC<sup>(2)</sup>.

Nesse sentido, tecnologias como a realidade virtual e aumentada têm sido utilizadas como novas ferramentas terapêuticas para melhorar a reabilitação do AVC e oportunizar a promoção da prática repetitiva de atividades quando o desengajamento, o tédio e redução da aderência ameaçam o progresso na reabilitação, principalmente a longo prazo<sup>(3-4)</sup>. Alguns trabalhos têm explorado a realidade virtual na reabilitação do AVC, com visualização do ambiente virtual através de monitores de computador, como apresentado na revisão sistemática em <sup>(5)</sup>. Entretanto, apesar do potencial de uso da realidade virtual na reabilitação, poucos trabalhos foram publicados nessa área em período recente (2013 a 2022), o que sugere que muito ainda pode ser explorado na área de realidade virtual e reabilitação<sup>(5) (6)</sup>.

Realidade aumentada é uma tecnologia que combina o mundo real com objetos virtuais e pode ser manipulada pelo usuário e controlada por especialistas. Os sistemas de realidade aumentada proporcionam um ambiente seguro para os usuários<sup>(7)</sup> e esta ferramenta tem sido explorada com resultados promissores na reabilitação<sup>(7-9)</sup>.



Assim sendo, o presente estudo tem como objetivo apresentar um sistema de realidade aumentada com um protocolo de treinamento associado, com o intuito de melhorar o engajamento a longo prazo de pacientes crônicos de AVC com diferentes níveis de comprometimento de membro superior.

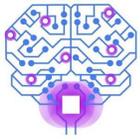
## **Métodos**

O estudo longitudinal foi realizado no Hospital de Clínicas da UNICAMP, Campinas, Brasil, tendo sido aprovado pelo Comitê de Ética da Universidade Estadual de Campinas (CAAE 49976315.5.0000.5404) e todos os procedimentos foram realizados de acordo com os princípios expressos na Declaração de Helsinque

### **Software de realidade aumentada**

O sistema de Realidade Aumentada (RA) foi projetado para proporcionar imagens motoras usando um braço virtual 3D que substitui o braço paralisado do participante em uma imagem espelhada em tempo real em uma tela de computador. O braço virtual 3D é um braço gerado por computador sobreposto na imagem capturada de um webcam em tempo real, que realiza animações de ombro acionadas pelo teclado ou eletromiografia<sup>(10)</sup>. Um fisioterapeuta instrui os participantes a realizar tarefas de membros superiores no ambiente RA, de modo que esses participantes possam se visualizar como em um espelho em frente à tela do computador. Adotou-se um ambiente projetado (não imersivo), que utiliza um monitor, TV ou projetor, para apresentar o ambiente gráfico ao usuário. As animações do braço virtual são realizadas de acordo com o lado paralisado escolhido na interface. O código fonte do sistema foi implementado na linguagem C++, usando Bibliotecas ARtoolKit e OpenGL e técnicas de processamento de imagem. Nesse estudo foi utilizada uma nova versão do sistema com atualização tecnológica para a biblioteca Vuforia.

O sistema foi projetado a partir de requisitos levantados por uma equipe multidisciplinar (fisiatra, fisioterapeutas, cientista da computação), focado em participantes com sequelas motoras pós-AVC: (a) Os exercícios devem ser contrários ao padrão espástico do paciente, buscando inibir esse comportamento patológico, que consiste no ombro em retração, depressão e rotação interna, antebraço em flexão e



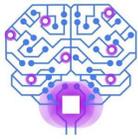
pronação e dedos em flexão e adução. (b) Flexão de cotovelo e exercícios de cotovelo não devem ser usados porque são exercícios que podem reforçar o padrão patológico do paciente de AVC. (c) O sistema deve incluir exercícios para estender a membro superior com sequelas. (d) A imagem virtual do paciente no cenário de RA não deve ter descontinuidades, de forma que o engajamento do braço virtual com o corpo do paciente deve ser mantido. (d) Baixo requisito cognitivo para evitar o agravamento do comprometimento cognitivo.

Além disso, os seguintes critérios de aceitação foram definidos para o sistema de RA. Primeiro, o braço virtual 3D não pode desaparecer durante o treinamento, mesmo que o marcador físico não seja mais detectado na imagem capturada. Esta condição foi obtida armazenando as últimas coordenadas do marcador identificado na imagem capturada pela webcam. Se o marcador não for detectado no quadro atual, o sistema exibe o braço virtual nas coordenadas previamente armazenadas, explorando a coerência temporal da cena. Segundo, a imagem deve se parecer com uma imagem espelhada do participante e seu entorno. Este critério foi cumprido através de uma inversão horizontal dos pixels do quadro capturado em tempo real. Terceiro, coerência visual entre o braço virtual e o braço paralisado deve ser satisfeita. A Figura 1 apresenta o fluxograma do sistema de realidade aumentada utilizado no estudo.

O ambiente para treinamento com o sistema de RA, portanto, consiste em uma webcam acoplada a um tripé, um projetor multimídia, uma luva de tecido com padrão de cores pré-estabelecido pelo sistema e um marcador físico fixado no ombro do participante. As imagens misturando o braço virtual e o vídeo capturado pela webcam em tempo real são projetadas em uma parede branca na frente do participante. O layout da sala deve ser organizado previamente de modo que nenhum objeto obstrua a visão da imagem do participante na tela. O ambiente não necessita de iluminação extra. Uma resolução de 640 x 480 pixels foi adotada para todos os frames de vídeo e eles foram gerados em um notebook com taxa de atualização de 60 Hz.

### **Protocolo de recrutamento, treinamento e avaliação**

Os critérios de inclusão foram indivíduos crônicos com diagnóstico clínico de AVC isquêmico, com sequelas motoras do membro superior, já estabilizados clinicamente e



que já haviam participado de tratamento de reabilitação motora de membro superior anteriormente, mas não participavam de qualquer terapia de reabilitação há pelo menos três meses. Os critérios de exclusão foram indivíduos com diagnóstico de AVC, que estavam confusos e desorientados ou com afasia de compreensão. Dado o desenho do estudo proposto, foram recrutados um participante de cada nível de gravidade do comprometimento motor do membro superior, nomeados aqui em leve, moderado e severo (totalmente paralisado). Os três participantes que foram admitidos no estudo sofreram um AVC isquêmico na artéria cerebral média direita pelo menos dois anos antes do estudo.

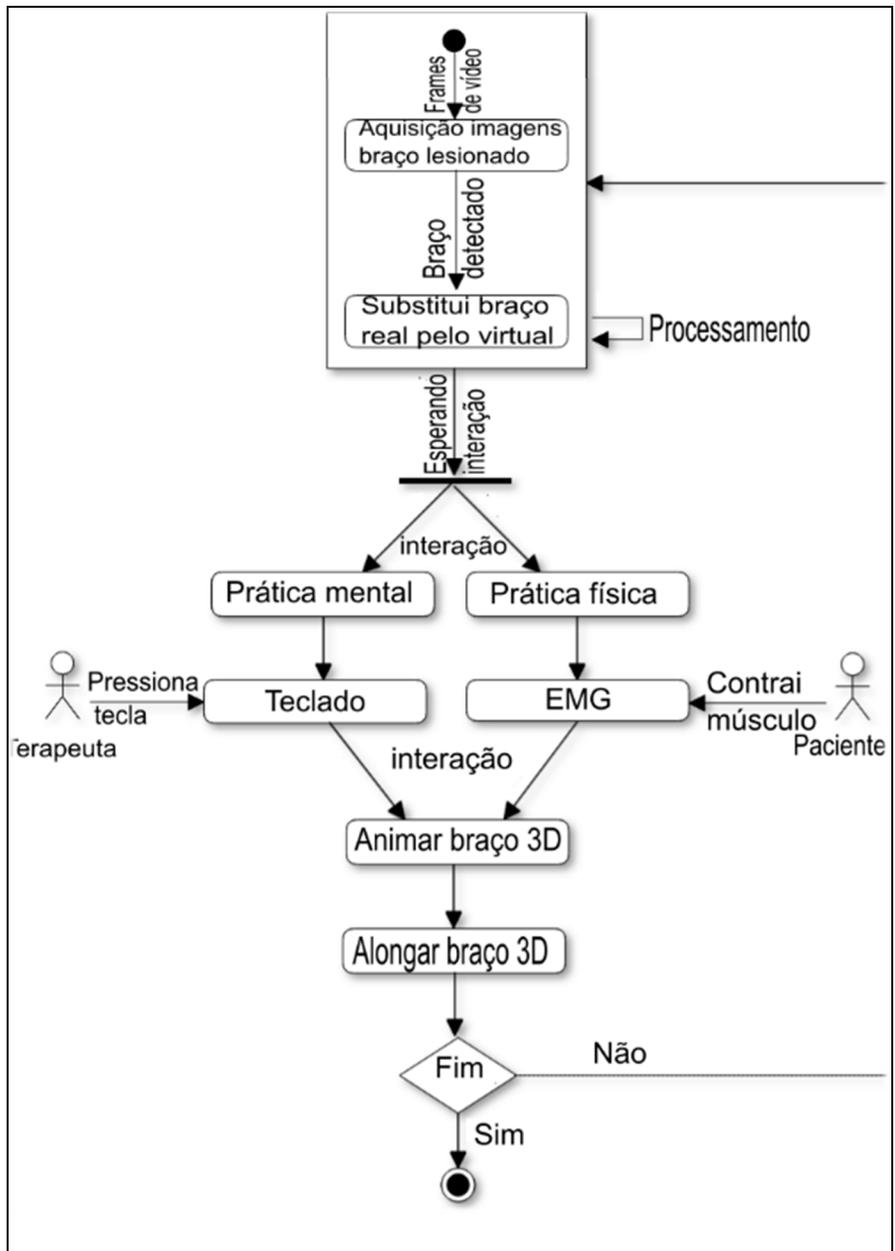
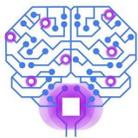
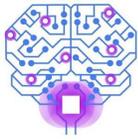


Figura 1 – Fluxograma do sistema de realidade aumentada

Todos os participantes realizaram uma hora de treinamento de exercícios de ombro com o sistema de RA, duas vezes por semana durante quatro semanas consecutivas (totalizando oito intervenções), em um ambulatório de reabilitação hospitalar. As intervenções foram realizadas individualmente. No início de cada sessão, o fisioterapeuta mostrou aos participantes como fazer os exercícios de ombro seguindo o braço virtual. Foram realizadas no mínimo duas séries de dez repetições das atividades



a cada sessão de treinamento (~160 repetições). Os exercícios selecionados foram abdução, flexão de ombro (Figura 2) e alongamento (Figura 3) com o braço lesionado, com os participantes permanecendo sentados.



**Figura 2** – Sequência de frames extraídos do vídeo visualizado pelo participante durante a flexão de ombro com o sistema de RA



**Figura 3** – Frame extraído do vídeo visualizado pelo participante durante o alongamento com o sistema de RA

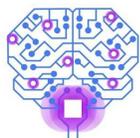
Ângulos da abdução/adução e flexão/extensão do ombro foram medidos com goniômetro mecânico antes e ao término de cada sessão de treinamento de RA para determinar a amplitude de movimento (ADM) do ombro lesionado (Figura 4).



**Figura 4** – Medida da ADM por goniometria da articulação do ombro, no plano sagital, evidenciando o movimento de flexão/extensão.

## Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta os dados de ADM para os participantes. Dados para P2 são iguais a ângulos zero para todas as sessões, uma vez que este participante tinha o grau

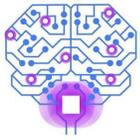


mais grave de hemiparesia; enquanto P3 era considerado leve por ter ADM de flexão inicial maior que a ADM de flexão de P2 (severo) e P1 (moderado). P1 e P3 tiveram o mesmo valor de ADM de abdução de ombro no início do estudo. Para o paciente P1 foram válidas as coletas (dados goniométricos) referentes as sessões 1, 3, 4, 5, 7 e 8, e para o P3 as sessões 3, 5, 7 e 8.

**Tabela 1** – Dados de ADM de ombro, medidos em graus. “Início” e “Fim” representam o início e o fim de uma determinada sessão de treinamento, respectivamente.

Sessão	Participante	Início da Sessão abdução	Fim da Sessão abdução	Início da Sessão flexão	Fim da Sessão flexão
1	P1	60	70	40	40
3	P1	70	70	50	50
3	P3	60	60	70	50
4	P1	70	75	45	40
5	P1	60	70	50	40
5	P3	80	70	65	70
7	P1	75	75	55	45
7	P3	70	60	80	70
8	P1	75	70	50	50
8	P3	60	70	60	60

As medidas de ADM sugeriram tendência de melhora para dois dos participantes (P1 e P3), e embora o participante com grau mais grave de hemiparesia permanecesse em ângulo zero (P2), foi observada uma sugestão de contração muscular. Com base nessa observação, propomos que, no próximo estudo, a escala de força muscular seja utilizada como instrumento de avaliação e não a goniométrica. Por outro lado, P3 mostrou uma diminuição do ângulo para abdução e flexão do ombro após as sessões em comparação com antes das sessões para metade das sessões, possivelmente devido à fadiga do participante. Geralmente, na presença de um evento de fadiga durante uma sessão de reabilitação, ou os objetivos não são alcançados ou a sessão de reabilitação é abandonada<sup>(11)</sup>. Portanto, um esquema de controle para reduzir os efeitos da fadiga muscular deve ser planejado. Em nosso estudo, adotamos um descanso adequado entre



as sessões de repetição para reduzir a fadiga durante o treinamento de RA, mas pode não ter sido suficiente para esse paciente.

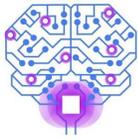
Em relação aos resultados de ADM para P2, é interessante notar que, de acordo com Su e Xu<sup>(12)</sup>, várias intervenções pós-AVC buscam promover a plasticidade do circuito neural remanescente. No entanto, fatores como o tempo decorrido desde o AVC, localização e tamanho da lesão e fatores biológicos, como o envelhecimento, podem reduzir os efeitos da neuroplasticidade. Em nosso estudo, as medidas clínicas mostraram que P2 (84 anos), que era muito mais idoso que P1 (49 anos) e P3 (45 anos), permaneceu sem ganho de flexão e extensão no membro lesionado após treinamento de RA, ou seja, o treino não se traduziu em melhora motora para este paciente.

Outra questão a ser analisada diz respeito ao realismo do braço virtual. Em um estudo anterior com um sistema de RA<sup>(13)</sup> com quatro participantes, três relataram perceber uma “combinação” do braço virtual com seu braço físico. Apenas um participante que sofreu lesão no tálamo e núcleos da base negligenciou a relação entre seu braço físico e o braço virtual. Os autores argumentam que há evidências de que participantes com lesões na formação reticular ou em outras partes do tronco encefálico podem ter dificuldades em estimular neurônios motores a partir de estímulos visuais, afetando seu desempenho no treinamento baseado em RA, entretanto este não foi o caso dos participantes do presente estudo. Não obstante, melhorias no aspecto realista do braço virtual devem ser exploradas quanto a mudanças na ADM.

## **Conclusão**

O sistema de realidade aumentada se mostrou adequado para o treinamento dos participantes com sequelas motoras de membro superior pós-AVC, nos três níveis de comprometimento dos movimentos do ombro (leve, moderado e severo).

A análise das medidas de goniometria mostrou aumento do ângulo tanto de flexão quanto de abdução do ombro para dois dos três participantes (P1 e P3), comparando o primeiro e o último dia. P2, o participante com grau mais grave de hemiparesia, permaneceu sem ganho de flexão e extensão no membro lesionado. Nesse sentido, pretende-se explorar outros protocolos específicos para participantes com grau severo



de hemiparesia, como, por exemplo, a combinação do sistema de realidade aumentada com a estimulação elétrica funcional para provocar a contração dos músculos sincronizada ao movimento do braço virtual.

A pesquisa ainda está muito limitada pelo número reduzido de participantes e outras pesquisas com mais participantes devem ser realizadas.

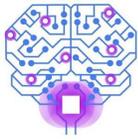
## Agradecimentos

Esta pesquisa foi apoiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Finanças 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Brasil (FAPESP) - Bolsa nº 2013/07559-3, e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - nº 304008/2021-4.

Gostaríamos de agradecer também a todos os participantes do estudo, e às fisioterapeutas Thais de Paulo e Corina Aparecida Fernandes pelas discussões.

## Referências

1. Whitehead S, Baalbergen E. Post-stroke rehabilitation. *S Afr Med J*. 2019 Jan 31;109(2):81.
2. Riz G, Bruno TE, Miura DY, Barra CMCM, Santos EAP, Moro CHC, Safanelli J. Análise do Engajamento de Pacientes com AVC Isquêmico Utilizando Mineração de Processos. *J. Health Inform*. 2020 Dezembro; 12:307-12.
3. Tsoupikova D, Stoykov NS, Corrigan M, Thielbar K, Vick R, Li Y, et al. Virtual Immersion for Post-Stroke Hand Rehabilitation Therapy. *Annals of Biomedical Engineering*. 2015 Jan 6;43(2):467–77.
4. Magna TS, Brandão AF, Fernandes PT. Intervenção por realidade virtual e exercício físico em idosos. *J. Health Inform*. 2020 Julho-Setembro; 12(3):77-82.
5. Feitosa JA, Fernandes CA, Casseb RF, Castellano G. Effects of virtual reality-based motor rehabilitation: a systematic review of fMRI studies. *J Neural Eng*. 2022 Jan 24;19(1). doi: 10.1088/1741-2552/ac456e. PMID: 34933281.
6. Campos Filho AS, Lemos WB, Souza RC, Lima LLB. Realidade virtual como ferramenta educacional e assistencial na saúde: uma revisão integrativa. *J. Health Inform*. 2020 Abril-Junho; 12(2):58-63.
7. Peters TM. Overview of Mixed and Augmented Reality in Medicine. *Mixed and Augmented Reality in Medicine*. 2018 Oct 26;1–13.



8. Escalada-Hernández P, Soto Ruiz N, San Martín-Rodríguez L. Design and evaluation of a prototype of augmented reality applied to medical devices. *International Journal of Medical Informatics*. 2019 Aug;128:87–92.
9. John B, Wickramasinghe N. A Review of Mixed Reality in Health Care. *Healthcare Delivery in the Information Age*. 2019 Nov 28;375–82.
10. Assis G, Brandao A, Correa AGD, Castellano G. Evaluation of a Protocol for fMRI Assessment Associated with Augmented Reality Rehabilitation of Stroke Subjects. *Journal on Interactive Systems*. 2019 Dec 13;10(1):1.
11. Xu W, Chu B, Rogers E. Iterative learning control for robotic-assisted upper limb stroke rehabilitation in the presence of muscle fatigue. *Control Engineering Practice*. 2014 Oct;31:63–72.
12. Su F, Xu W. Enhancing Brain Plasticity to Promote Stroke Recovery. *Frontiers in Neurology*. 2020 Oct 30;11.
13. Assis GA de, Corrêa AGD, Martins MBR, Pedrozo WG, Lopes R de D. An augmented reality system for upper-limb post-stroke motor rehabilitation: a feasibility study. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. 2014 Nov 4;1–8.