

Sistema para Reabilitação Sensoriomotora pós Acidente Vascular Encefálico

Gabriel Fernandes Cyrino
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0000-0001-7307-0171

Najara Nader Zago
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0000-0002-1712-4451

Roberta da Silva Aramaki
Faculdade de Engenharia Biomédica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0000-0002-8343-1046

Vinicius Teixeira da Costa
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0000-0002-1810-5068

Alexandre Cardoso
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0000-0002-2023-9647

Edgard Afonso Lamounier Jr.
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0000-0001-6293-9521

Alcimar Barbosa Soares
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0000-0003-1100-3533

Resumo—Os déficits sensoriomotores pós Acidente Vascular Encefálico (AVE) são comuns. Em geral, os indivíduos pós AVE precisam lidar com as diversas sequelas, como alterações motoras, sensoriais ou cognitivas, deficiências na mobilidade, no equilíbrio e na realização da marcha. Dentre os sistemas acometidos pós AVE, o sistema motor tende a ser o mais comprometido, entretanto, quando associado a déficits proprioceptivos, a recuperação funcional tende a ser ruim, resultando em um impacto negativo nas atividades da vida diária, principalmente do membro superior acometido. Apesar da grande quantidade de programas de reabilitação existentes, a recuperação completa da função motora e proprioceptiva, especialmente de membros superiores, por meio de terapias convencionais, ainda é um desafio. Dessa forma, este artigo aborda uma proposta de um sistema integrado, que tem por objetivo auxiliar na reabilitação proprioceptiva e motora de pacientes com hemiparesia nos membros superiores decorrente de um AVE. Além disso, pretende-se avaliar a adequação do sistema desenvolvido como ferramenta de apoio nos processos de reabilitação e auxílio ao terapeuta na definição de protocolos de reabilitação mais específicos para cada indivíduo. O sistema proposto no estudo foi composto por um ambiente virtual e um dispositivo robótico, altamente personalizáveis, que permitem ao terapeuta ajustar as condutas da reabilitação mediante a evolução clínica do paciente.

Palavras-Chave—Acidente Vascular Encefálico, Ambiente Virtual, Dispositivo Robótico, Reabilitação Neurológica, Fisioterapia.

I. INTRODUÇÃO

O Acidente Vascular Encefálico (AVE) é uma síndrome caracterizada pelo início súbito de sinais clínicos de déficit neurológico persistentes por mais de 24 horas e ocasionada por um distúrbio da circulação sanguínea encefálica que compromete a função do encéfalo de forma focal ou global

[1]. Segundo dados do Ministério da Saúde, o AVE representa a segunda principal causa de mortalidade e a primeira causa de incapacidade no Brasil, com incidência anual de 108 casos por 100 mil habitantes (mais de 216 mil casos anuais) em 2013 [2], [3]. Estima-se que no Brasil exista mais de 2.231.000 pessoas com AVE e 568.000 com incapacidade grave [4].

Os comprometimentos e sequelas após um AVE são determinados pelo local e extensão da lesão inicial e pela subsequente recuperação que ocorre após o evento. Em geral, após sua ocorrência, as pessoas precisam lidar com as diversas sequelas, como alterações motoras, sensoriais ou cognitivas, deficiências na mobilidade, no equilíbrio e na realização da marcha. Além de redução da independência funcional, que incluem dificuldades para realização de atividades de vida diária que lhes eram corriqueiras, principalmente pelo impacto potencial na utilização do membro superior [5].

Dentre os sistemas acometidos pós AVE, o sistema motor tende a ser o mais comprometido, resultando em perda ou limitação da função muscular, do controle do movimento e limitação da mobilidade. Os déficits neurológicos decorrentes do AVE comprometem a funcionalidade do indivíduo, podendo de acordo com [6], manifestar-se em 80% dos casos como hemiparesia, sendo esta, a manifestação mais comum pós AVE. A hemiparesia caracteriza-se pela inabilidade funcional do membro, devido a perda parcial de força, existindo mesmo que mínimo, algum grau de movimentação.

Nos primeiros momentos após o evento (fase aguda), algumas funções podem ser recuperadas à medida que, por exemplo, o edema encefálico é reduzido, e graças ao processo de reestruturação neurológica precoce. No entanto, cerca

de 60% das pessoas acometidas por AVE permanecem com disfunções motoras permanentes após a lesão, associadas, principalmente, aos membros superiores. A maioria delas consegue recuperar a capacidade de deambular, mas apenas 30% a 66% irão conseguir utilizar seu membro superior acometido de forma funcional; ainda assim, em grande parte, com dificuldades para realização de tarefas mais complexas [7], [8].

Além dos déficits motores, os déficits somatossensoriais são sintomas frequentes nos pós ictus. A função somatossensorial desempenha um papel importante no aprendizado motor. Uma vez que, o aprendizado motor é um mecanismo chave para a recuperação do AVE, as deficiências somatossensoriais podem afetar o resultado motor [9], [10], [11]. Os déficits sensoriais e proprioceptivos são particularmente comuns após um AVE. A presença de déficits proprioceptivos prediz resultados funcionais ruins, tendo um impacto negativo nas atividades da vida diária, principalmente do membro superior acometido [12]. Aproximadamente 30 a 48% dos indivíduos com AVE apresentam déficits proprioceptivos [13].

Apesar da grande quantidade de programas de reabilitação existentes, a recuperação completa da função motora e proprioceptiva, especialmente de membros superiores, por meio de terapias convencionais, ainda é um desafio [14], [15]. Infelizmente, as terapias de neuroreabilitação possuem poucas opções de tratamento baseadas em evidências para aqueles com déficits proprioceptivos [16]. As estratégias convencionais para promover a recuperação sensorial pós AVE são direcionadas de forma implícita nas sessões de terapia. E em muitos casos, os déficits sensitivos são subtreinados ou até negligenciados, projetando melhoras motoras como recuperação sensitiva [17].

Diante disso, pesquisadores e terapeutas que atuam no processo de reabilitação neurológica junto a essas pessoas são instigados a desenvolver e aplicar novos métodos de intervenções ou combinações de terapias que promovam a motivação e adesão dos pacientes e sejam efetivos, principalmente na potencialização da recuperação da função proprioceptiva e motora do membro superior [15]. Dessa forma, novas abordagens terapêuticas cada vez mais têm se preocupado com o aprimoramento avaliativo sensoriomotor e de protocolos individualizados, que integram a reabilitação sensorial para uma maior recuperação funcional destes indivíduos.

As intervenções em um ambiente virtual promovem a neuroplasticidade ao fornecer um treinamento orientado a tarefa, com altas repetições e ajuste dos parâmetros, tais como tempo da terapia, intensidade e desafios. O ambiente virtual possibilita a reorganização das conexões cerebrais por meio da ativação adequada do córtex motor primário (M1), somestésico e do cerebelo [18]. A reabilitação por meio de ambientes virtuais potencializa a plasticidade cerebral quando associada a estímulos motores, sensoriais e visuais. As ações pretendidas por meio das metas motoras somadas ao *feedback* visual resultam em um aumento da taxa de recuperação do paciente [19]. Foi demonstrado que a ativação da área motora (M1) aumenta à medida que os usuários tentam conciliar a

discrepância entre *feedback* visual, tarefa pretendida e tarefa realizada [20]. Esta manipulação pode resultar em plasticidade sensoriomotora, repercutindo positivamente na funcionalidade de indivíduos pós AVE.

Para tanto, o ambiente virtual mostra-se aliado na reabilitação, permitindo que os indivíduos realizem exercícios terapêuticos específicos de forma agradável e motivadora, possibilitando mais repetições e contribuindo para o aumento da intensidade da reabilitação [21], [22]. Sob tais perspectivas, este artigo aborda uma proposta de um sistema integrado, que tem por objetivo auxiliar na reabilitação proprioceptiva e motora de pacientes com hemiparesia nos membros superiores decorrente de um AVE. Além disso, pretende-se avaliar a adequação do sistema desenvolvido como ferramenta de apoio nos processos de reabilitação e auxílio ao terapeuta na definição de protocolos de reabilitação mais específicos para cada indivíduo.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema proposto no estudo é composto por um ambiente virtual e um dispositivo robótico, altamente personalizáveis, que permitirá ao terapeuta ajustar as condutas da reabilitação mediante a evolução clínica do paciente, destacando não necessariamente, os programas de reabilitação existentes, mas sim, a forma como esses serviços de assistência em saúde realiza ou não tais programas. A interface proposta oferece originalmente o mesmo estímulo e liberdade de movimento independentemente da capacidade motora e proprioceptiva dos indivíduos pós AVE. Desta maneira, como a resposta motora depende de características individuais e funcionais, o protocolo de reabilitação foi desenvolvido direcionado para estágios de recuperação e as sequências básicas de atividades que facilitam a reeducação e reaprendizado motor e proprioceptivo do membro acometido nestes estágios. Sendo assim, para que o ambiente proposto permanecesse estimulante e eficiente, o protocolo de reabilitação preconizou as mesmas atividades para todos os participantes, no entanto, os parâmetros que regulam os requisitos para cumprimento das tarefas poderão ser ajustados de forma individualizada.

A. Interface do Ambiente Virtual

Para a construção do ambiente 3D, interações de objetos e animações, o *software Unreal Engine 4* foi escolhido, sendo utilizada a linguagem de programação C++. Trata-se de um motor gráfico (*engine*) ou conjunto de ferramentas integradas, desenvolvido pela *Epic Games* e amplamente utilizado para a construção de projetos relacionados a áreas como jogos, artes, arquitetura e simulação [23]. Tal tecnologia foi utilizada com objetivo de gerar um ambiente virtual com alto poder de realismo e por manter um bom balanceamento em respeito ao custo computacional [24]. A modelagem dos objetos, tais como a vegetação e os outros animais presentes no ambiente foram feitos utilizando-se o *Blender 3D*, um *software* amplamente utilizado para modelagem, animação, texturização, composição e renderização [25]. Os animais foram modelados e texturizados com base em fotos reais de alta resolução, em

suas visões laterais, frontais e superiores, sendo criados os materiais e mapas de textura. O ambiente virtual pode ser visualizado na Figura 1.



Figura 1. Interface do ambiente virtual mostrando as três primeiras fases em execução.

O cenário foi composto por uma floresta virtual, na qual o paciente controla uma harpia, podendo mover-se livremente em diferentes direções e em graus adequados de liberdade, a depender dos objetivos e desafios a serem cumpridos pelo paciente. Inicialmente, foram desenvolvidas três fases no ambiente, bem como um tutorial interativo. Cada fase possui objetivos diferentes, trabalhando movimentos específicos, sendo elas [26]:

- Tutorial interativo: O paciente deve seguir a direção de algumas setas. Neste treinamento, a extensão do braço em quatro direções é treinada.
- Fase 1: O paciente deve passar por diversos anéis espalhados pelo ambiente. É necessário fazer movimentos suaves e firmes com o braço.
- Fase 2: O paciente deve capturar 5 peixes no lago. A captura deve ser rápida e precisa, trabalhando com flexão e extensão do cotovelo.
- Fase 3: O paciente deve capturar 5 pedaços de carne, enquanto foge de predadores. Esta fase trabalha a coordenação motora e visuoespacial, propriocepção e velocidade de reação.

O sistema também é composto por um painel de controle, onde o terapeuta pode cadastrar, alterar e consultar os dados do paciente, configurar os parâmetros gerais do ambiente virtual, selecionar as fases em cada sessão e configurar os desafios para cada uma delas [26], como demonstrado na Figura 2. Portanto, é possível criar um protocolo de execução customizado, configurando as sessões de acordo com a necessidade terapêutica de cada paciente.

No protocolo de treinamento definido, a dificuldade é aumentada gradativamente pelo terapeuta, sem desestimular o paciente. Assim, a medida que o participante evolui, concluindo os desafios com maior facilidade, o terapeuta modifica

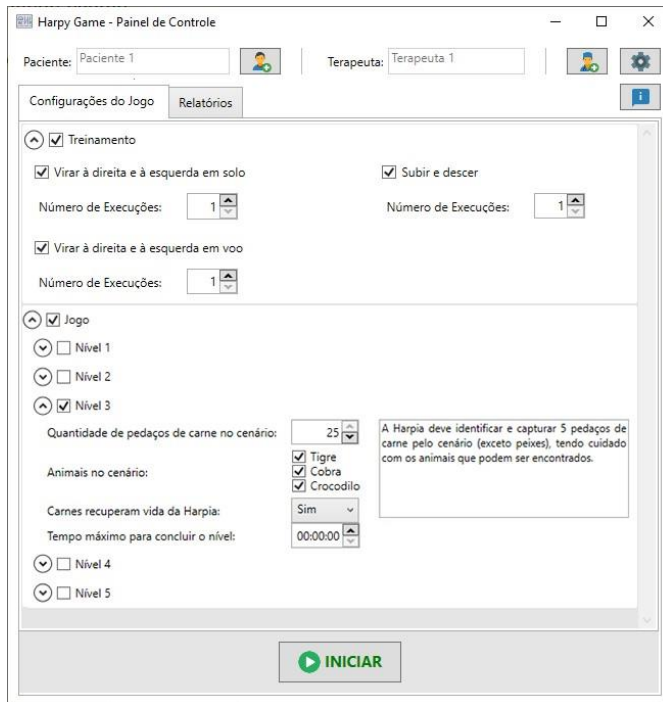


Figura 2. Interface do painel de controle, exemplificando uma sessão sendo configurada.

os parâmetros de cada fase para as próximas execuções, consequentemente, ajustando as condutas da reabilitação mediante a evolução clínica.

Diversos parâmetros podem ser alterados ao longo das execuções, sendo eles:

- 1) Número de fases do ambiente virtual que podem ser disponibilizadas.
- 2) Prazo para execução de cada fase.
- 3) Forma dos desafios: tamanho dos objetos, número de objetos no cenário, indicação de dano e recuperação da harpia.
- 4) Velocidade da harpia (deslocamento da harpia em relação ao cenário).
- 5) Precisão do movimento (deslocamento da harpia em relação à rotação no próprio eixo).

A modificação de cada parâmetro está correlacionada com o nível de dificuldade definido pelo terapeuta, que depende diretamente da condição do paciente. Todos os desafios foram elaborados levando-se em consideração a potencialização da recuperação da função motora e proprioceptiva do membro superior hemiparético. O quadro I demonstra cada variável de ajuste e seus respectivos parâmetros, bem como sua relação com as metas terapêuticas da reabilitação pós AVE do membro superior afetado.

B. Sistema de Controle

Para a interface de controle, foi construído um protótipo de uma plataforma para suporte assistido, sob o registro número BR 10 2020 012414 5. Baseada no modelo *H-Man* de [27], a

QUADRO I

VARIÁVEIS DE AJUSTE E SEUS RESPECTIVOS PARÂMETROS, ASSOCIADOS AS FASES E SUAS POSSÍVEIS CORRELAÇÕES COM AS METAS TERAPÊUTICAS DA REABILITAÇÃO.

Variável	Parâmetro	Fase	Correlação Terapêutica
Tempo	0 a 30 minutos	Todas	O ajuste do tempo máximo para cada paciente pode ser utilizado para verificar a medida de habilidade, que é determinada pela relação da velocidade e desempenho da tarefa no tempo, dessa forma é possível determinar a taxa de aprendizado e acurácia do movimento em cada fase. Assim, quanto menor o tempo e melhor o desempenho na fase, maior é o impacto positivo na reabilitação.
Tamanho dos anéis	Grande/Médio/Pequeno	1	O tamanho dos anéis está relacionado à precisão do movimento executado pelo paciente na fase. Quanto menor o diâmetro do anel, maior é a precisão exigida.
Velocidade da harpia	0 a 25 m/s	Todas	A velocidade da harpia está fortemente relacionada com a dinâmica de execução do movimento e o tempo direcionado para execução dos objetivos da fase. Com a velocidade mais rápida, a precisão dos movimentos tende a diminuir e, por isso, na fase inicial da reabilitação é indicado uma velocidade média para baixa, como 10m/s (levando em consideração que o tamanho total do cenário é de 1000m ²).
Desafios a superar	44/33/22 anéis	1	Durante as três fases, quanto maior a quantidade de objetivos maior o tempo gasto e, consequentemente, maior o número de repetições de movimentos que o indivíduo deverá realizar, que incluem a repetição, intensidade e especificidade da tarefa.
	5 peixes	2	
	5 carnes	3	
Dano	Sim/Não	2 e 3	Ao se aproximar de predadores ou encostar em obstáculos, tais como as árvores, o paciente receberá um <i>feedback</i> de dano na harpia, que poderá ou não ser ativado pelo terapeuta. Da mesma forma, ao capturar alimentos será possível ativar a recuperação de vida da harpia. Esses <i>feedbacks</i> são importantes para estimular o paciente a realizar o movimento de forma assertiva e coordenada. Isso se deve a maior ativação de receptores sensoriais tendinosos e musculares, que tem como objetivo aumentar a consciência de posição, adequar o tempo de reação e coordenação do movimento pelo membro.
Recuperação de vida	Sim/Não	2 e 3	
Animais no cenário	Sim/Não	2 e 3	
Precisão dos controles	1 a 10	Todas	A precisão de manipulação dos controles está relacionada com o ângulo mínimo e máximo de flexão e extensão do braço. Essa opção pode ser personalizada de acordo com a resposta motora de cada paciente. Dessa forma, o terapeuta pode configurar a dosagem de assistência ou resistência ao movimento, ou seja, quanto maior a assistência fornecida pelo dispositivo robótico, menor será a ativação muscular.

plataforma possui um mecanismo composto por dois motores acionados por cabos que atuam em um plano cartesiano. Nesse mecanismo o paciente executa um movimento por meio de uma haste fixada em um trilho ligado aos cabos, o que aciona os motores, fornecendo um *feedback* de assistência. O terapeuta poderá configurar essa assistência de modo a gerar uma força elástica no braço do paciente, auxiliando-o na execução do movimento, ou restringir os movimentos de modo a exigir maior ativação muscular.

O acionamento dinâmico dos motores é feito por meio de um *Arduino*, que controla a movimentação dos eixos X e Y, podendo, inclusive, gerar movimentos na diagonal, aumentando seu alcance. O algoritmo desenvolvido no *Arduino* gera um pacote de saída contendo o posicionamento X e Y atual e as correntes de força geradas pelos dois motores, enviando esses dados para o computador, através de uma porta serial COM [28]. A Figura 3 exibe uma representação de comunicação da interface com a plataforma.

A terapia robótica incentiva a alta repetição de movimentos com supervisão mínima em um ambiente altamente motivacional [29]. Dessa forma, o dispositivo robótico desenvolvido para este estudo se caracteriza como uma interface háptica muito importante para a reabilitação somatossensorial, possuindo relevância no processo terapêutico dos pacientes, uma vez que está em conformidade com os princípios da terapia convencio-

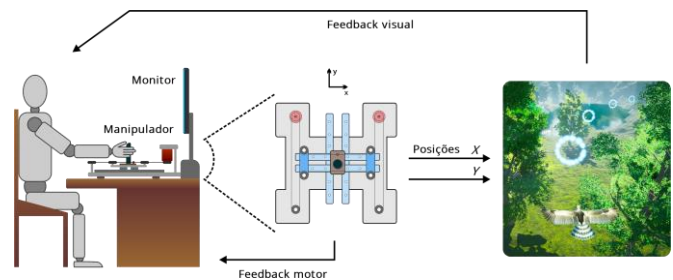


Figura 3. Representação do sistema de comunicação da interface com a plataforma de força.

nal. O dispositivo é de fácil configuração, permite movimentos em diferentes graus de liberdade e exige supervisão mínima do terapeuta, além de ser capaz de avaliar o desempenho motor e configurar a dosagem de assistência ou resistência ao movimento.

III. RESULTADOS

Como resultados preliminares, o ambiente virtual foi integrado à plataforma de força utilizando a interface de comunicação desenvolvida. O primeiro teste foi realizado com um voluntário hígido, sendo posicionado em frente a plataforma, observando-se o ângulo inicial de 90° do cotovelo.

A movimentação do manipulador nos eixos X e Y resultou na movimentação da harpia no cenário, como mostra a Figura 4.



Figura 4. Execução dos desafios utilizando a plataforma de força.

Neste teste inicial, a Fase 1 está sendo executada, onde é trabalhada a flexão e extensão do cotovelo enquanto são capturados anéis espalhados pelo cenário. No protocolo de teste, foram configuradas, por meio do painel de controle desenvolvido, todas as variáveis detalhadas no Quadro I, além de uma boa precisão do manipulador, levando em consideração sua amplitude máxima alcançada. Observou-se uma boa adesão do indivíduo durante o uso da plataforma, dispondo de controles agradáveis e suaves, e possibilitando mais repetições de movimentos.

A. Resultados Esperados

A partir do uso da terapia robótica e do ambiente virtual propostos, para a continuidade dos experimentos, espera-se os seguintes resultados:

- 1) Potencializar o controle proprioceptivo do membro hemiparético, acelerando o processo de reabilitação e ganho funcional após o AVE.
- 2) Induzir e acelerar o processo de reorganização cortical que influencia diretamente na recuperação sensoriomotora pós AVE.
- 3) Proporcionar a prescrição de protocolos de tratamento fisioterapêutico individualizado, que aumentem a motivação, interação e aderência destes à reabilitação.

IV. CONCLUSÃO

O uso de um sistema integrado pode ser de grande valia para o processo de reabilitação neurológica, principalmente quando ela é realizada utilizando-se de ambientes altamente ajustáveis e que respeitem as limitações individuais, oferecendo ao fisioterapeuta ferramentas de análise de evolução e resultados para tratamento. O dispositivo robótico e o ambiente virtual também permitem acompanhar a evolução clínica dos voluntários, por meio de uma avaliação do membro superior acometido em comparação ao saudável.

Almeja-se a utilização desse sistema como método de reabilitação futura, uma vez que tanto o dispositivo robótico quanto o ambiente virtual oferecem uma prática de exercícios mais eficientes frente a indivíduos mais engajados. Desse modo, a aplicação clínica do protocolo descrito será realizada no processo de reabilitação sensoriomotora pós AVE, sendo sua eficácia comparada com a fisioterapia convencional.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro. Os agradecimentos aos professores Dr. Alcimar Barbosa Soares, Dr. Edgard Lamounier e Dr. Alexandre Cardoso, do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pelas contribuições. Ao Laboratório de Engenharia Biomédica (BioLab) e ao Laboratório de Computação Gráfica, Grupo de Realidade Virtual e Aumentada (GRVA), pelo amparo tecnológico e estrutural.

REFERÊNCIAS

- [1] D. A. Greenberg, M. J. Aminoff, and R. P. Simon, *Neurologia Clínica*, 8rd ed. Porto Alegre: Artmed, 2014, pp. 488.
- [2] G. M. M. de Oliveira, L. C. C. Brant, C. A. Polanczyk, A. Biolo, B. R. Nascimento, D. C. Malta, M. de Fatima Marinho de Souza, G. P. Soares, G. F. Xavier, M. J. Machline-Carrion, M. S. Bittencourt, O. M. Pontes, O. M. Silvestre, R. A. Teixeira, R. O. Sampaio, T. A. Gaziano, G. A. Roth, and A. L. P. Ribeiro, "Estatística cardiovascular – brasil 2020," *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, vol. 115, no. 3, pp. 308–439, Sep. 2020, doi: 10.36660/abc.20200812.
- [3] M. da Saúde (BR), "Diretrizes de atenção à reabilitação da pessoa com acidente vascular cerebral," 2013. [Online]. Available: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/diretrizes_atencao_reabilitacao_acidente_vascular_cerebral.pdf
- [4] I. M. Bensenor, A. C. Goulart, C. L. Szwarcwald, M. L. F. P. Vieira, D. C. Malta, and P. A. Lotufo, "Prevalence of stroke and associated disability in brazil: National health survey - 2013," *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, vol. 73, no. 9, pp. 746–750, Sep. 2015, doi: 10.1590/0004-282x20150115.
- [5] N. E. Mayo, S. Wood-Dauphinee, S. Ahmed, G. Carron, J. Higgins, S. Mcewen, and N. Salbach, "Disablement following stroke," *Disability and Rehabilitation*, vol. 21, no. 5-6, pp. 258–268, Jan. 1999, doi: 10.1080/096382899297684.
- [6] D. T. Wade, "Measurement in neurological rehabilitation." *Current opinion in neurology and neurosurgery*, vol. 5, no. 5, pp. 682–686, 1992.
- [7] S. B. O'sullivan, T. J. Schmitz, and G. D. Fulk, *Fisioterapia: avaliação e tratamento*, 6rd ed. Editora Manole, 2017, pp. 1688.
- [8] I. N. D. O. Teixeira, "O envelhecimento cortical e a reorganização neural após o acidente vascular encefálico (AVE): implicações para a reabilitação," *Ciência & Saúde Coletiva*, vol. 13, no. suppl 2, pp. 2171–2178, Dec. 2008, doi: 10.1590/S1413-81232008000900022.
- [9] S. Meyer, A. H. Karttunen, V. Thijs, H. Feys, and G. Verheyden, "How do somatosensory deficits in the arm and hand relate to upper limb impairment, activity, and participation problems after stroke? a systematic review," *Physical Therapy*, vol. 94, no. 9, pp. 1220–1231, Sep. 2014, doi: 10.2522/pj.20130271.
- [10] L. L. Edwards, E. M. King, C. M. Buetefisch, and M. R. Borich, "Putting the "sensory" into sensorimotor control: The role of sensorimotor integration in goal-directed hand movements after stroke," *Frontiers in Integrative Neuroscience*, vol. 13, May 2019, doi: 10.3389/fnint.2019.00016.
- [11] T. Kitago and J. W. Krakauer, "Motor learning principles for neurorehabilitation," in *Neurological Rehabilitation*. Elsevier, 2013, pp. 93–103, doi: 10.1016/b978-0-444-52901-5.00008-3.
- [12] W. W. Campbell and R. J. Barohn, *Dejong's The Neurological Examination*, 8rd ed. Wolters Kluwer Health, 2019.
- [13] S. S. Kessner, U. Bingel, and G. Thomalla, "Somatosensory deficits after stroke: a scoping review," *Topics in Stroke Rehabilitation*, vol. 23, no. 2, pp. 136–146, Jan. 2016, doi: 10.1080/10749357.2015.1116822.

- [14] J. Higgins, N. E. Mayo, J. Desrosiers, N. M. Salbach, and S. Ahmed, "Upper-limb function and recovery in the acute phase poststroke," *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 42, no. 1, p. 65, 2005, doi: 10.1682/jrrd.2003.10.0156.
- [15] P. Langhorne, R. Wagenaar, and C. Partridge, "Physiotherapy after stroke: more is better?" *Physiotherapy Research International*, vol. 1, no. 2, pp. 75–88, 1996.
- [16] S. E. Findlater and S. P. Dukelow, "Upper extremity proprioception after stroke: bridging the gap between neuroscience and rehabilitation," *Journal of motor behavior*, vol. 49, no. 1, pp. 27–34, 2017.
- [17] N. Bolognini, C. Russo, and D. J. Edwards, "The sensory side of post-stroke motor rehabilitation," *Restorative Neurology and Neuroscience*, vol. 34, no. 4, p. 571–586, Aug. 2016, doi: 10.3233/RNN-150606.
- [18] S. Machado, M. Cunha, B. Velasques, D. Minc, S. Teixeira, C. A. Domingues, J. G. Silva, V. H. Bastos, H. Budde, M. Cagy *et al.*, "Sensorimotor integration: basic concepts, abnormalities related to movement disorders and sensorimotor training-induced cortical reorganization," *Revista de Neurologia*, vol. 51, no. 7, pp. 427–436, 2010.
- [19] M. Heenan, R. A. Scheidt, D. Woo, and S. A. Beardsley, "Intention tremor and deficits of sensory feedback control in multiple sclerosis: a pilot study," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 11, no. 1, p. 170, 2014, doi: 10.1186/1743-0003-11-170.
- [20] E. Tunik, S. Saleh, and S. V. Adamovich, "Visuomotor discordance during visually-guided hand movement in virtual reality modulates sensorimotor cortical activity in healthy and hemiparetic subjects," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 198–207, Mar. 2013, doi: 10.1109/tnsre.2013.2238250.
- [21] M. Thornton, S. Marshall, J. McComas, H. Finestone, A. McCormick, and H. Sveistrup, "Benefits of activity and virtual reality based balance exercise programmes for adults with traumatic brain injury: Perceptions of participants and their caregivers," *Brain Injury*, vol. 19, no. 12, pp. 989–1000, Jan. 2005, doi: 10.1080/02699050500109944.
- [22] K. Laver, S. George, S. Thomas, J. E. Deutsch, and M. Crotty, "Virtual reality for stroke rehabilitation," *Stroke*, vol. 43, no. 2, Feb. 2012, doi: 10.1161/strokeaha.111.642439.
- [23] E. Games, "Unreal engine 4," 2014. [Online]. Available: <https://www.unrealengine.com/en-US/unreal>
- [24] J. Ratcliffe and A. Simons, "How can 3d game engines create photo-realistic interactive architectural visualizations?" in *E-Learning and Games*. Springer International Publishing, 2017, pp. 164–172, doi: 10.1007/978-3-319-65849-0_17.
- [25] B. Foundation, "Blender 3d," 2018. [Online]. Available: <https://www.blender.org/>
- [26] G. F. Cyrino, "HarpyGame: um jogo sério customizável com interface multimodal para reabilitação de indivíduos pós-AVE," Master's thesis, (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2019.1286>
- [27] D. Campolo, P. Tommasino, K. Gamage, J. Klein, C. M. Hughes, and L. Masia, "H-man: A planar, h-shape cabled differential robotic manipulandum for experiments on human motor control," *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 235, pp. 285–297, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.jneumeth.2014.07.003.
- [28] V. T. da Costa, "A influência de pistas visuais em processos de adaptação sensório-motora," Master's thesis, (Pós-Graduação em Engenharia Biomédica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2019.2336>
- [29] T. J. D. Tomić, A. M. Savić, A. S. Vidaković, S. Z. Rodić, M. S. Isaković, C. R. de Pablo, T. Keller, and L. M. Konstantinović, "ArmAssist robotic system versus matched conventional therapy for poststroke upper limb rehabilitation: A randomized clinical trial," *BioMed Research International*, vol. 2017, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1155/2017/7659893.