



SIMULADOR DE CADEIRA DE RODAS MANUAL COM REALIDADE VIRTUAL: UMA PROPOSTA

Luan Maximiano de Oliveira da Costa^[0000-0001-5488-9392], IFFluminense / FEMEC-UFU, luan.costa@iff.edu.br
Cleudmar Amaral de Araújo^[0000-0002-1529-7172], FEMEC-UFU, cleudmar.araujo@ufu.br

Resumo. Os equipamentos de teste para cadeirantes, sejam eles ergômetros (de rolos ou integrados) ou a utilização de esteiras, onde o usuário realiza o mesmo gesto motor de propulsionar uma cadeira de rodas manual, geralmente não simulam situações de partida e manobra, sendo apropriados para a propulsão em estado estacionário. Dessa forma, por meio de revisão bibliográfica, são apresentados aspectos que justificam a necessidade de um equipamento estático para testes laboratoriais que represente com maior fidelidade uma cadeira de rodas manual real. A partir das dificuldades de projeto apresentadas em outros trabalhos e necessidades apontadas em testes com equipamentos em desenvolvimento, foi elaborada uma proposta de um simulador de cadeira de rodas manual utilizando realidade virtual. O fluxo de interação entre usuário, dispositivos mecânicos e realidade virtual é apresentado.

Palavras chave: Simulador. Cadeira de rodas manual. Realidade virtual. Treinamento. Reabilitação.

1. INTRODUÇÃO

As limitações para se instrumentar uma cadeira de rodas em movimento, com objetivo de medir e analisar parâmetros fisiológicos, biomecânicos e de desempenho de cadeirantes, limitam os cenários que podem ser estudados. Os testes laboratoriais são, então, geralmente realizados em ergômetros (de rolos ou integrados) ou com a utilização de esteiras, onde o usuário realiza o mesmo gesto motor de propulsionar uma cadeira de rodas manual. O equipamento estático permite o uso de aparelhos e instrumentos apropriados para a finalidade de avaliação e treinamento. Nas esteiras ou ergômetros de rolos, a própria cadeira de rodas pode ser instalada sobre a estrutura. Já nos simuladores ou ergômetros integrados, o próprio equipamento contém a estrutura semelhante a uma cadeira de rodas. Os equipamentos existentes, no entanto, são geralmente apropriados para propulsão contínua, uma vez que a grande maioria não simula situações de partida e manobra (DE KLERK *et al.*, 2020).

Foram destacados, no presente trabalho, alguns aspectos que justificam a necessidade de um equipamento estático para testes que represente com maior fidelidade uma cadeira de rodas manual real. O projeto do equipamento com tais características foi proposto, bem como o funcionamento da interação entre usuário, dispositivos mecânicos e realidade virtual.

2. JUSTIFICATIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE CADEIRA DE RODAS MANUAL

Conforme o estudo realizado por Koontz *et al.* (2005), no qual foi analisado a propulsão manual de cadeira de rodas a partir do repouso em diferentes superfícies, as forças e torques aplicados nas rodas durante a partida, para todas as superfícies testadas, foram consideravelmente maiores em comparação com a propulsão em estado estacionário. Segundo Koontz *et al.* (2005), deve-se ter mais atenção no movimento de propulsão durante a partida, que pode auxiliar na identificação de possíveis condições e mecanismos responsáveis por lesões dos membros superiores em cadeirantes. Na Fig. (1), para exemplificação, está apresentado o resultado obtido para o torque de propulsão aplicado na roda durante a partida em uma superfície plana de concreto.

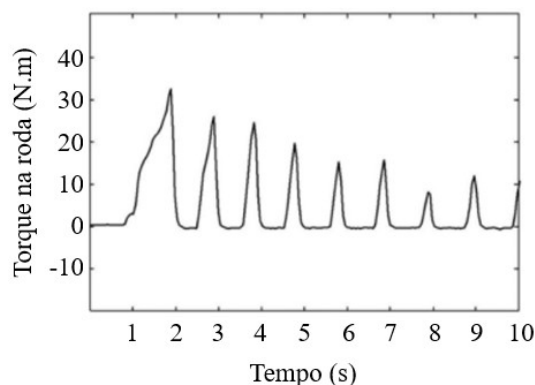


Figura 1. Torque na roda durante a partida em uma superfície plana de concreto, adaptado de Koontz *et al.* (2005).



Um estudo realizado com uma amostra de 28 adultos, com idade entre 22 e 67 anos, procurou descrever como as pessoas se movem durante a vida cotidiana em cadeira de rodas manual. A cadeira de rodas de cada participante foi equipada com um sistema de aquisição e registro de dados. Os histogramas com os resultados obtidos para os episódios de movimentação são apresentados nas Fig. (2) e Fig. (3), para a duração e distância, respectivamente. A mediana das movimentações registradas durou 21 segundos e percorreu 8,6 m a 0,43 m/s, sendo que aproximadamente 63% movimentos registrados duraram menos de 30 segundos, percorreram menos de 13 m e mais lentos que 0,5 m/s (SONENBLUM; SPRIGLE; LOPEZ, 2012). Segundo Sonenblum, Sprigle e Lopez (2012), como as sessões curtas e lentas dominam o uso da cadeira de rodas, avaliações clínicas e pesquisas biomecânicas devem refletir isso, concentrando-se em iniciar o movimento, manobrar cadeiras de rodas e parar a mesma. Devido às acelerações exigirem mais força do que a manutenção da velocidade, pesquisas sobre propulsão em cadeiras de rodas devem levar em consideração características inerciais para obter um quadro mais completo da eficiência da propulsão.

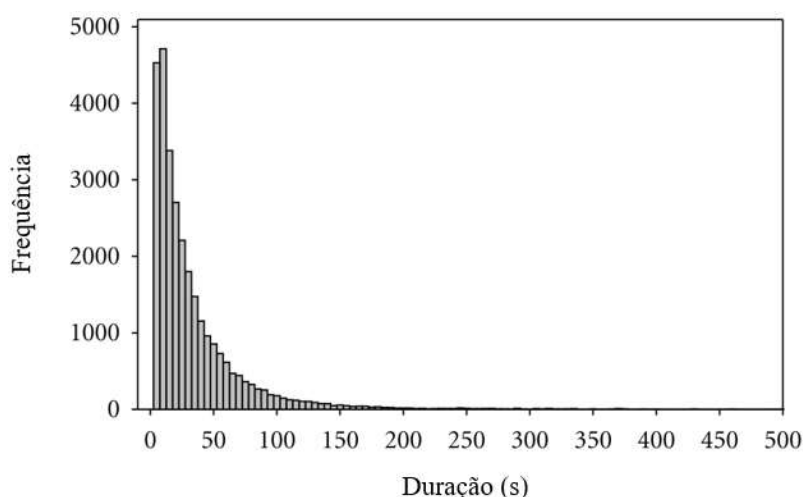


Figura 2. Histograma das sessões de movimentação referente à duração, Sonenblum, Sprigle e Lopez (2012).

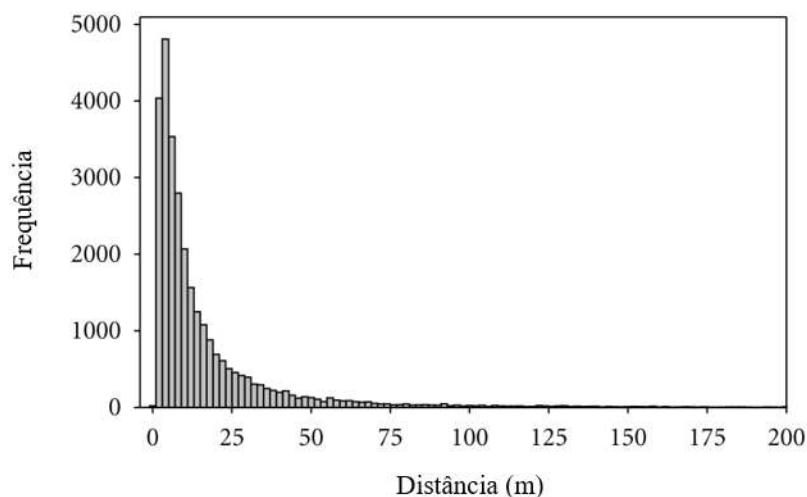


Figura 3. Histograma das sessões de movimentação referente à distância percorrida, Sonenblum, Sprigle e Lopez (2012).

Goosey-Tolfrey *et al.* (2018) detectaram, em seu trabalho, outra limitação para a avaliação do desempenho de cadeirantes em ergômetros de rolos tradicionais, devido à ausência da necessidade de coordenação para manter a cadeira em linha reta, como ocorre no mundo real. Conforme os testes realizados com atletas paralímpicos de rúgbi, utilizando ergômetro de rolos independentes, verificou-se uma elevada assimetria de propulsão entre o braço direito e esquerdo dos atletas de alto desempenho (Fig. (4)). Assim, os autores apontam para a necessidade de se levar em consideração essas assimetrias durante a classificação de atletas paralímpicos, já que o desempenho é limitado pelo membro com mobilidade mais reduzida. Não haveria assimetria de propulsão, no entanto, se houvesse feedback visual e necessidade de controle da cadeira em linha reta.

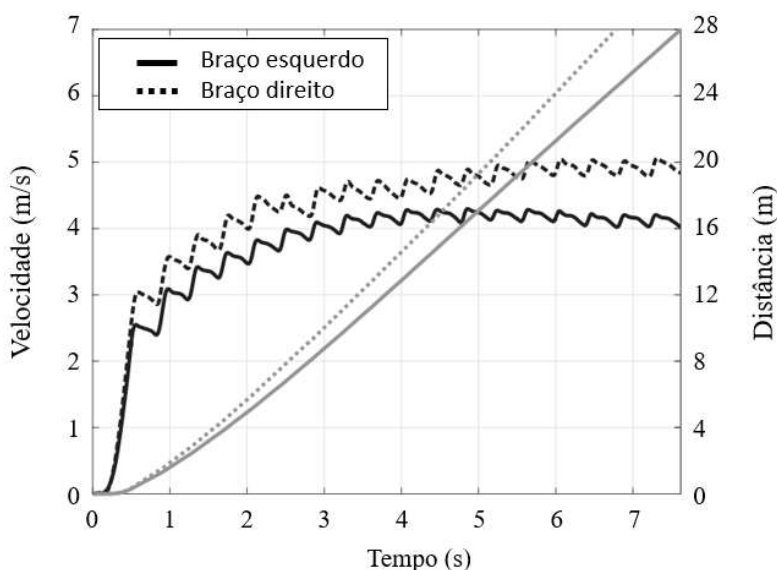


Figura 4. Exemplo de desempenho e de assimetria entre os braços de atletas, adaptado de Goosey-Tolfrey *et al.* (2018).

A realidade virtual (RV) destaca-se como uma alternativa para tentar imitar o mundo real e proporcionar um ambiente seguro e independente do clima, permitindo tornar os estudos controláveis, repetíveis e de alta precisão para a realização de avaliação, reabilitação e treinamento (HOWARD, 2017).

Há anos que a RV vem sendo apontada como uma tecnologia com potenciais benefícios para muitos aspectos de treinamento, avaliação e pesquisas de reabilitação. Segundo Schultheis e Rizzo (2001), a RV mostra-se útil e eficaz no campo da saúde devido às suas possibilidades de personalização, interatividade e capacidade de influenciar o comprometimento por meio de tarefas envolventes. Existem vários recursos de RV com potencial a serem explorados na assistência médica. A realidade virtual tem sido proposta para aumentar a força muscular e melhorar as habilidades de mobilidade e equilíbrio para idosos (KIM *et al.*, 2013; NERI *et al.*, 2017) e na reabilitação assistiva para indivíduos que sofreram acidente vascular cerebral (AVC) (AMINOV *et al.*, 2018; LEE; PARK; PARK, 2019), paralisia cerebral (DINOMAS *et al.*, 2013), doença de Parkinson (MAGGIO *et al.*, 2018), esclerose múltipla (CALABRÒ *et al.*, 2017; MASSETTI *et al.*, 2016), queimadura grave e síndrome de Guillain-Barré, dentre outras (ROSE; NAM; CHEN, 2018).

Existem muitos esforços para facilitar e/ou melhorar a reabilitação e o treinamento de indivíduos cadeirantes nos últimos anos. Muitas dessas pesquisas utilizam realidade virtual, mas a maioria dos equipamentos encontrados na literatura utilizam tecnologia não imersiva e são para cadeiras motorizadas, com o objetivo de proporcionar a aprendizagem de controlar a cadeira de rodas, havendo maior deficiência de equipamentos que simulam cadeira de rodas manual (ARLATI *et al.*, 2020; SALIMI; FERGUSON-PELL, 2018).

3. CARACTERÍSTICAS NECESSÁRIAS PARA UM SIMULADOR DE CADEIRA DE RODAS MANUAL

Para que um equipamento para cadeirantes esteja apto para simular com maior precisão situações do mundo real, especialmente quando o giro está envolvido, requer-se modelos de equipamento mais avançados, que incluam propriedades inerciais e friccionais, principalmente quando se tem por objetivo estudar aspectos biomecânicos (DE KLERK *et al.*, 2020; SALIMI; FERGUSON-PELL, 2018). Por meio de variação da resistência ao rolamento pode-se aumentar ou diminuir o esforço necessário do usuário, simulando diferentes terrenos, por exemplo. A inércia é responsável por dificultar o início do movimento e por manter rotação das rodas e aros após o movimento já iniciado, necessitando, assim, de uma força aro para frear a cadeira de rodas. Caso não haja um sistema que proporcione essa inércia, por exemplo, as rodas cessam o movimento rapidamente após serem impulsionadas, além de saírem do repouso com mais facilidade. Se considerada a integração com a RV, a falta de propriedades inerciais provocaria uma sensação que a cadeira estivesse sendo freada a todo instante durante a propulsão.

Salimi e Ferguson-Pell (2018) desenvolveram três versões de ergômetro com RV para cadeirantes (VR_sysI, VR_sysII e VR_sysIII). Todas as três versões consistem em ergômetros de rolos. Os desenvolvedores se atentaram para a necessidade de simular a inércia referente à cadeira de rodas e ao cadeirante. Foram implementados, então, sistemas de inércia para propulsão em linha reta e de resistência ao rolamento para as 3 versões. Cada uma delas, no entanto, com uma abordagem diferente para simular a inércia de rotação em torno do centro de massa da cadeira e usuário juntos.

A VR_sysI considera apenas a inércia para propulsão em linha reta, além da resistência ao rolamento. Na Fig. (5) é possível visualizar o sistema de inércia ajustado para dois cadeirantes com massa corporal diferente, assim como a cinta utilizada para ajustar o efeito de resistência ao rolamento por meio de seu atrito com os rolos. Somente os rolos já



proporcionam a inércia de uma pessoa com cerca de 38 kg. Para indivíduos com maior massa corporal, foi projetado um sistema com quatro massas para cada rolo, as quais são montadas em barras roscadas. As barras roscadas permitem o ajuste da distância entre as massas e seu centro de rotação, o que, por sua vez, torna o sistema ajustável para indivíduos de massas diferentes. Não foi informado, no entanto, sobre a necessidade de calibração e balanceamento das massas a cada mudança de usuário.



Figura 5. Sistema de inércia para propulsão em linha reta e sistema de resistência ao rolamento, Salimi e Ferguson-Pell (2018).

A VR_sysII foi projetado fornecer um feedback de força ao tentar girar e/ou manobrar a cadeira de rodas. Para compensar a inércia rotacional em tempo real, no entanto, Salimi e Ferguson-Pell (2018) não conseguiram desenvolver um sistema puramente mecânico de inércia. Assim, um sistema de controle foi criado para adicionar ou remover a resistência ao rolamento de forma independente para cada roda ao girar. O funcionamento se dá com as cintas sobre os rolos (conforme mostrada na Fig. (5)) sendo tensionadas por um sistema pneumático em resposta ao giro, aumentando o atrito e tornando, assim, mais difícil a rotação em torno do centro de massa do usuário e cadeira de rodas. No entanto, houve problemas quanto ao tempo de resposta do sistema pneumático, dificultando a resposta em tempo real e não permitindo, também, que o sistema fosse contínuo e suave.

Deve-se destacar que a baixa latência geral do sistema – que pode ser entendida como o intervalo de tempo entre as informações percebidas pelo corpo e as informações de vídeo percebidas pelos olhos do usuário – é fundamental para uma boa experiência em RV, assim como para permitir que o usuário consiga permanecer imerso por um tempo maior no ambiente virtual sem que tenha enjoo ou tontura (GERŠAK; LU; GUNA, 2018).

A VR_sysIII utilizou-se de uma compensação no campo visual do usuário para simular o momento de inércia rotacional. Assim, faz-se no software de RV uma desaceleração no feedback visual para o tornar proporcional à percepção de curvar no mundo real. Para isso, foi necessário descobrir qual rotação, em graus, ocorreria no mundo real se as mesmas forças fossem aplicadas nas rodas. De posse dessa informação, foi possível corrigir o ângulo de rotação da cadeira de rodas no ambiente virtual (SALIMI; FERGUSON-PELL, 2018).

As três versões de ergômetro para cadeira de rodas com RV foram testadas e comparadas entre elas e entre uma cadeira de rodas mundo real. Quando se comparou com a execução de uma tarefa no mundo real, as 3 versões apresentaram resultados satisfatórios, sendo que a VR_sysII (sistema eletromecânico para inércia rotacional) apresentou as maiores pontuações e VR_sysIII (compensação no campo visual para a inércia rotacional) as menores. Os testes demonstraram que as forças aplicadas na cadeira de rodas em RV sempre foram maiores ou próximas às forças aplicadas no mundo real, sendo que o VR_sysI apresentou a maior proximidade entre a magnitude de força no mundo real e no virtual. Houve mais toques e os participantes demoraram mais para concluir os testes em ambiente de RV. Segundo Salimi e Ferguson-Pell (2019), isso pode ser consequência de não se sentirem totalmente confortáveis na RV, não ter sensação de movimento na RV e também devido a algum grau de dificuldade no controle cadeira de rodas, principalmente para a versão VR_sysII.

Apesar da versão VR_sysII ter se demonstrado mais próxima do comportamento de uma cadeira de rodas real, os participantes dos testes não apreciaram a experiência de manobrar na versão VR_sysII. O sistema de feedback de força



não é rápido o suficiente, tornando o seu controle incômodo e de maior dificuldade. Foi relatado que os usuários não se sentiram confortáveis com nenhum dos dois sistemas propostos para simular o momento de inércia em torno do centro de massa, preferindo a versão do equipamento sem esta função (SALIMI; FERGUSON-PELL, 2019).

4. PROPOSTA DE UM SIMULADOR DE CADEIRA DE RODAS MANUAL UTILIZANDO REALIDADE VIRTUAL

Na Fig. (6) apresenta-se o fluxo de interação e informação entre os principais sistemas e componentes do simulador de cadeira de rodas manual com realidade virtual em desenvolvimento. O usuário propuliona a cadeira rodas no ambiente virtual por meio dos aros. Além de sentir de forma tátil os aros (feedback passivo), o usuário recebe um feedback de força. O movimento das rodas, então, é ditado tanto pela interação com o usuário quanto pela interação mecânica com o sistema de inércia e resistência ao rolamento (RR). A velocidade das rodas é obtida por meio da leitura e processamento, pelo microcontrolador da placa compatível com Arduino, dos pulsos elétricos gerados por encoders rotativos. Estes dados são transmitidos ao computador por uma comunicação serial realizada com a placa. O motor de jogo Unity foi utilizado para criação da RV. Assim, foi realizada uma integração do Unity com o Arduino, e os dados recebidos pela porta serial são gerenciados pelo motor de jogo, permitindo, dessa forma, por meio da programação da física do problema, realizar o mapeamento da cadeira de rodas no ambiente virtual. O ambiente virtual criado no Unity é visualizado pelo usuário por meio de um sistema de exibição, podendo ser um monitor montado na cabeça ou uma tela LCD, por exemplo, a depender das atividades e testes a serem realizados. Recursos sonoros também são utilizados. De acordo com o feedback visual, o usuário movimenta novamente os aros de propulsão para controlar a cadeira de rodas, dando origem a um novo ciclo de interação.

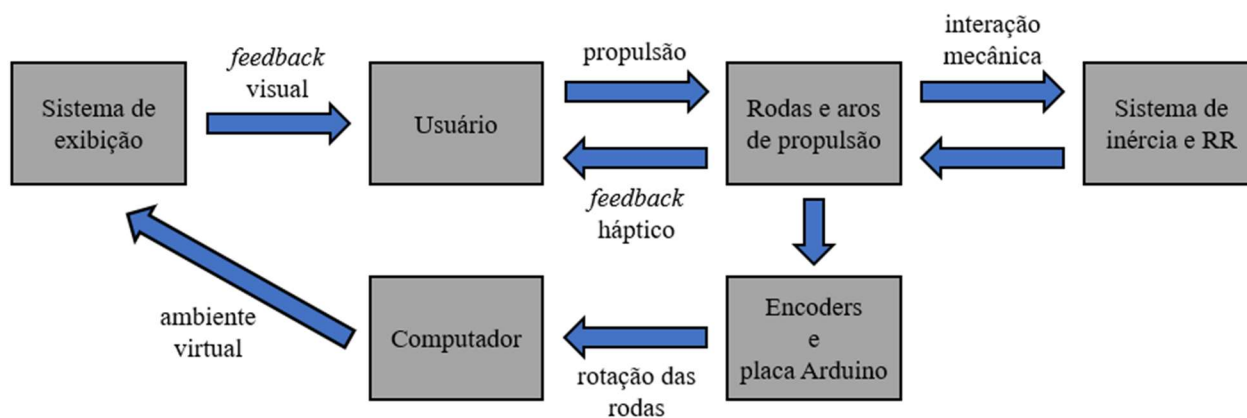


Figura 6. Fluxo de interação entre o usuário e os principais componentes e sistemas do simulador de RV.

O simulador de cadeira de rodas manual proposto no presente trabalho é do tipo integrado, já contendo todos os elementos existentes em uma cadeira de rodas manual, necessitando apenas realizar transferência do usuário para o equipamento. O equipamento possui, também, ajustes para a melhor ergonomia e performance dos cadeirantes, sejam eles atletas ou não.

Os equipamentos já disponíveis, mesmo que de rolos, não conseguiram simular satisfatoriamente uma cadeira de rodas no mundo real. A maior dificuldade apontada está em simular a inércia que atua quando o cadeirante faz uma trajetória curva. Ao fazer uma curva fechada para a esquerda, por exemplo, o cadeirante deve impulsionar o aro da direita e fazer uma força para trás sobre o aro esquerdo para manter a roda esquerda parada. Necessita-se, então, além de um mecanismo suave, que haja interação entre as duas rodas, assim como ocorre em uma cadeira de rodas real devido à inércia corporal somada à inércia da cadeira de rodas. Propomos utilizar um sistema de feedback passivo, composto de elementos puramente mecânicos, de forma a não possui atrasos na resposta, como ocorre em sistemas ativos envolvendo sensores e atuadores.

5. CONCLUSÃO

Propõe-se, no presente trabalho, desenvolver e avaliar um simulador integrado que imite com maior fidelidade as propriedades inerciais envolvidas durante o movimento em uma cadeira de rodas manual, com o objetivo de permitir a reabilitação e treinamento de cadeirantes para diversas tarefas. O equipamento permitirá, também, o estudo controlado dos efeitos inerciais e de ajuste de posição na biomecânica de propulsão, assim como a medição de parâmetros fisiológicos do cadeirante durante a realização de atividades em realidade virtual, sejam as atividades com finalidade esportiva ou não.



6. REFERÊNCIAS

- AMINOV, Anna et al. What do randomized controlled trials say about virtual rehabilitation in stroke? A systematic literature review and meta-analysis of upper-limb and cognitive outcomes. **Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation**, v. 15, n. 1, p. 1–24, 2018.
- ARLATI, Sara et al. Virtual reality-based wheelchair simulators: A scoping review. **Assistive Technology**, v. 32, n. 6, p. 294–305, 2020.
- CALABRÒ, Rocco Salvatore et al. Robotic gait training in multiple sclerosis rehabilitation: Can virtual reality make the difference? Findings from a randomized controlled trial. **Journal of the Neurological Sciences**, v. 377, p. 25–30, 2017.
- DE KLERK, Rick et al. Measuring handrim wheelchair propulsion in the lab: A critical analysis of stationary ergometers. **IEEE Reviews in Biomedical Engineering**, v. 13, p. 199–211, 2020.
- DINOMAS, Mickaël et al. A new virtual reality tool for unilateral cerebral palsy rehabilitation: Two single-case studies. **Developmental Neurorehabilitation**, v. 16, n. 6, p. 418–422, 2013.
- GERŠAK, Gregor; LU, Huimin; GUNA, Jože. Effect of VR technology maturity on VR sickness. **Multimedia Tools and Applications**, 2018.
- GOOSEY-TOLFREY, V. L. et al. Sprint performance and propulsion asymmetries on an ergometer in trained high- and low-point wheelchair rugby players. **Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports**, v. 28, n. 5, p. 1586–1593, 2018.
- HOWARD, Matt C. A meta-analysis and systematic literature review of virtual reality rehabilitation programs. **Computers in Human Behavior**, v. 70, p. 317–327, 2017.
- KIM, Jungjin et al. Unsupervised Virtual Reality-Based Exercise Program Improves Hip Muscle Strength and Balance Control in Older Adults: A Pilot Study. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, v. 94, p. 937–943, 2013.
- KOONTZ, Alicia M. et al. A kinetic analysis of manual wheelchair propulsion during start-up on select indoor and outdoor surfaces. **Journal of Rehabilitation Research and Development**, v. 42, n. 4, p. 447–458, 2005.
- LEE, Han Suk; PARK, Yoo Junk; PARK, Sun Wook. The Effects of Virtual Reality Training on Function in Chronic Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. **BioMed Research International**, v. 2019, p. 81–89, 2019.
- MAGGIO, Maria Grazia et al. What About the Role of Virtual Reality in Parkinson Disease's Cognitive Rehabilitation? Preliminary Findings From a Randomized Clinical Trial. **Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology**, v. 31, n. 6, p. 312–318, 2018.
- MASSETTI, Thais et al. Virtual reality in multiple sclerosis - A systematic review. **Multiple Sclerosis and Related Disorders**, v. 8, p. 107–112, 2016.
- NERI, Silvia G.R. et al. Do virtual reality games improve mobility skills and balance measurements in community-dwelling older adults? Systematic review and meta-analysis. **Clinical Rehabilitation**, v. 31, n. 10, p. 1292–1304, 2017.
- ROSE, Tyler; NAM, Chang S.; CHEN, Karen B. Immersion of virtual reality for rehabilitation - Review. **Applied Ergonomics**, v. 69, n. February 2017, p. 153–161, 2018.
- SALIMI, Zohreh; FERGUSON-PELL, Martin. Development of Three Versions of a Wheelchair Ergometer for Curvilinear Manual Wheelchair Propulsion Using Virtual Reality. **IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering**, v. 26, n. 6, p. 1215–1222, 2018.
- SALIMI, Zohreh; FERGUSON-PELL, Martin. Investigating the Reliability and Validity of Three Novel Virtual Reality Environments with Different Approaches to Simulate Wheelchair Maneuvers. **IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering**, v. 27, n. 3, p. 514–522, 2019.
- SCHULTHEIS, Maria T.; RIZZO, Albert A. The application of virtual reality technology in rehabilitation. **Rehabilitation Psychology**, v. 46, n. 3, p. 296–311, 2001.
- SONENBLUM, Sharon Eve; SPRIGLE, Stephen; LOPEZ, Ricardo A. Manual Wheelchair Use: Bouts of Mobility in Everyday Life. **Rehabilitation Research and Practice**, v. 2012, p. 1–7, 2012.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos às agências FAPEMIG, CNPq e CAPES, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, ao Centro Brasileiro de Referência em Inovações Tecnológicas para o Esporte Paralímpico e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, pelo apoio e financiamento do projeto.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.