



Uma visão geral dos dispositivos robóticos para reabilitação do cotovelo

An overview of the robotic devices for elbow rehabilitation

Una descripción general de los dispositivos robóticos para la rehabilitación del codo

Marcello Francisco dos Santos^{1*}, Bruno Medina Pedroso², Silvia Cristina Martini¹, Silvia Regina Matos da Silva Boschi¹, Alessandro Pereira da Silva¹, Terigi Augusto Scardovelli¹.

RESUMO

Objetivo: Identificar desenvolvimentos relacionados a dispositivos robóticos para reabilitação de cotovelo e disponibilizá-los à comunidade científica para possíveis desenvolvimentos futuros. Levantamento bibliográfico. **Métodos:** A revisão integrativa foi realizada nas bases de dados e utilizou uma combinação de palavras-chave para identificar os artigos relevantes. Os resumos foram lidos e aqueles que foram qualificados tiveram sua leitura completa, que fizeram parte deste trabalho. **Resultados:** Um total de 976 registros foram identificados por meio das buscas nas bases de dados. Entre os artigos selecionados, 12 eram duplicados e excluídos imediatamente, resultando em 964 estudos para avaliação de elegibilidade. As revisões de título resultaram na exclusão de 879 artigos, os outros 85 artigos foram submetidos à revisão do resumo. Após todas as fases de seleção e extração, apenas 53 estudos atenderam aos critérios de inclusão e foram incluídos no presente estudo. **Considerações finais:** O cenário analisado mostrou uma grande evolução nas características dos dispositivos robóticos para reabilitação de cotovelo. O uso de software para simulação auxiliou muito nas simulações e definições dos dispositivos. Entretanto, ainda são grandes os esforços no dimensionamento dos atuadores e na escolha da melhor relação potência/peso para tornar os dispositivos mais leves e facilitar sua portabilidade.

Palavras-chave: Exoesqueleto, Robô, Dispositivo, Reabilitação, Cotovelo.

ABSTRACT

Objective: Identify developments related to robotic devices for elbow rehabilitation and make them available to the scientific community for possible future developments. Bibliographic survey. **Method:** The integrative review was carried out in the databases and used a combination of keywords to identify relevant articles. The abstracts were read and those who were qualified had their complete reading, which formed part of this work. **Results:** A total of 976 records were identified through database searches. Among the selected articles, 12 were duplicates and immediately excluded, resulting in 964 studies for eligibility assessment. Title reviews resulted in the exclusion of 879 articles, the other 85 articles were subjected to abstract review. After all selection and extraction phases, only 53 studies met the inclusion criteria and were included in the present study. **Final considerations:** The analyzed scenario showed a great evolution in the characteristics of robotic devices for elbow rehabilitation. The use of simulation software helped a lot in the simulations and definitions of the devices. However, there are still great efforts in sizing the actuators and choosing the best power/weight ratio to make the devices lighter and facilitate their portability.

Keywords: Exoskeleton, Robots, Device, Rehabilitation, Elbow.

¹ Universidade de Mogi das Cruzes (UMC), Mogi das Cruzes – SP.

² Instituto de Ciência e Tecnologia Centro Paula Souza (Etec Presidente Vargas)

RESUMEN

Objetivo: Identificar desarrollos relacionados con dispositivos robóticos para rehabilitación de codo y ponerlos a disposición de la comunidad científica para posibles desarrollos futuros. Estudio bibliográfico. **Métodos:** La revisión integradora se realizó en las bases de datos y utilizó una combinación de palabras clave para identificar artículos relevantes. Se leyeron los resúmenes y los calificados tuvieron su lectura completa, la cual formó parte de este trabajo. **Resultados:** Se identificaron un total de 976 registros mediante búsquedas en bases de datos. Entre los artículos seleccionados, 12 estaban duplicados y fueron inmediatamente excluidos, lo que resultó en 964 estudios para la evaluación de elegibilidad. Las revisiones de títulos dieron como resultado la exclusión de 879 artículos, los otros 85 artículos fueron sometidos a revisión de resúmenes. Después de todas las fases de selección y extracción, sólo 53 estudios cumplieron los criterios de inclusión y fueron incluidos en el presente estudio. **Consideraciones finales:** El escenario analizado mostró una gran evolución en las características de los dispositivos robóticos para rehabilitación de codo. El uso de software de simulación ayudó mucho en las simulaciones y definiciones de los dispositivos. Sin embargo, aún quedan grandes esfuerzos por dimensionar los actuadores y elegir la mejor relación potencia/peso para aligerar los dispositivos y facilitar su portabilidad.

Palabras clave: Exoesqueleto, Robot, Dispositivo, Rehabilitación, Codo.

INTRODUÇÃO

Uma alteração da função do membro superior está entre as sequelas mais comuns de lesão do sistema nervoso central (FEIGIN VL, et al., 2014). Essa alteração geralmente leva a uma redução na participação social do paciente, o que pode afetar negativamente a qualidade de vida (PARKER VM, WADE DT e HEWER RL, 1986). Os membros superiores são responsáveis por realizar grande parte dos movimentos funcionais que permitem a independência necessária para realizar as atividades da vida diária (AVD) (FEIGIN VL, et al., 2014). AVD, como vestir-se e realizar a higiene pessoal, entre outras ações, requerem o uso da articulação do cotovelo, tornando a reabilitação dessa articulação bastante importante.

A amplitude de movimentos está entre os principais movimentos funcionais realizados que requerem o uso do cotovelo. Doenças neurológicas, como acidente vascular cerebral, resultam em coatização anormal do músculo flexor do cotovelo. Essa coatização anormal compromete os movimentos de flexão e extensão do cotovelo, causando a falta de movimento do membro superior (KUTLU M, et al., 2016).

Vários dispositivos, como exoesqueletos, próteses e robôs, foram desenvolvidos para recuperar o movimento funcional de pacientes neurológicos. As evidências atuais de reabilitação em pacientes neurológicos enfatizam a prática intensiva e repetitiva de tarefas adaptativas com o objetivo de facilitar a reaprendizagem motora e a fisioterapia em conjunto com dispositivos robóticos proporciona uma reabilitação mais eficiente (MANNA SK e DUBEY VM, 2017; OGUNTOSIN V, et al., 2015).

Gopura RARC, et al. (2015), realizaram um trabalho mostrando a evolução dos exoesqueletos para os membros superiores. No século XVIII, o professor Wangenstein (PONS JL, 2008) teve o primeiro conceito de exoesqueleto como um dispositivo vestível para fornecer assistência extra para andar para pessoas com deficiência. Em 1960, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos iniciou estudos para desenvolver exoesqueletos que pudessem ser usados como uma armadura corporal (PONS JL, 2008). No mesmo ano, sinais mioelétricos começaram a ser estudados para gerar comandos em músculos paralisados. Com esses estudos, também em 1960, a empresa americana GE desenvolveu o primeiro manto de exoesqueleto, com a intenção de usá-lo para a execução de trabalhos perigosos (PONS JL, 2008). O dispositivo foi chamado de Hardiman e consistia em braços e pernas motorizados e poderia fornecer uma força sobre-humana.

Na década de 90 houve uma grande mudança, onde o desenvolvimento de exoesqueletos foi direcionado para a interação humano/robô. Ao mesmo tempo o Instituto de Tecnologia de Kanagawa, Japão desenvolveu um traje de força para auxiliar os movimentos dos membros humanos (GOPURA RARC, et al., 2015).

Desde então, é possível verificar a grande pressão no desenvolvimento de dispositivos cada vez mais leves e com maior número de graus de liberdade para serem utilizados tanto para a recuperação de pacientes quanto para a execução de trabalho e aumento de força.

A evolução no desenvolvimento de exoesqueletos tem seu início nos anos 60, onde o Departamento de Defesa dos Estados Unidos em conjunto com a empresa General Electric desenvolveu o primeiro modelo chamado Hardiman. A partir disso, vários desenvolvimentos ocorreram até que em 1982 as primeiras órteses robóticas para membros superiores foram desenvolvidas. Com a entrada das empresas japonesas o Instituto Japonês de Tecnologia Kanagawa desenvolve o primeiro traje de força, até que em 2009 o primeiro exoesqueleto para reabilitação de membros superiores passa a ser comercializado. Daí por diante diversos desenvolvimentos, novas tecnologias e introdução de novos materiais deixaram os exoesqueletos mais comuns (GOPURA RARC, et al., 2015).

De acordo com a evolução destes dispositivos e sua utilização para reabilitação do cotovelo, este estudo tem como objetivo identificar as tecnologias aplicadas nesses dispositivos e disponibilizá-la como ferramenta de leitura para desenvolvimentos futuros.

MÉTODOS

A pesquisa começou identificando as palavras-chave que melhor se adequariam ao objetivo da pesquisa e, assim, facilitariam a busca por artigos. As palavras-chave definidas foram “robô”, “cotovelo”, “exoesqueleto”, “dispositivo”, “assistido” e “reabilitação” e a busca nas bases de dados foi realizada com base na combinação de duas ou mais dessas palavras. Uma vez definidas as palavras-chave, uma pesquisa bibliográfica aprofundada foi conduzida por dois revisores independentes nas bases de dados eletrônicas PUBMED CENTRAL, SCIENCE DIRECT, WEB OF SCIENCE e IEEE (*Institute of Electronic and Electronics Engineers*). Buscamos artigos publicados entre 2009 e 2020, usando a combinação de palavras-chave mencionada.

Além disso, a literatura de referência para essas publicações selecionadas também foi incluída na pesquisa. Alguns catálogos de fabricantes também foram verificados acessando os sites da internet.

O protocolo foi especificado a priori e de acordo com o *Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses Protocol* (MOHER D, et al., 2015).

Estratégia de busca e seleção de estudos

Os artigos selecionados foram aqueles que atenderam aos seguintes critérios de inclusão: usar um dispositivo para reabilitação de cotovelo, publicado em inglês; e publicado nos últimos 15 anos. Os artigos encontrados na busca inicial foram carregados no *State of the Art* por meio da versão *Systematic Review 3.4 Beta*, uma ferramenta computacional que ajuda a seguir os critérios de busca e seleção previamente definidos.

Esta ferramenta usa uma etapa de planejamento na qual todas as regras de revisão sistemática são definidas. Na segunda, os resumos são revisados. Na última etapa, o texto completo é revisado.

Após a remoção dos artigos duplicados, os títulos e resumos de todos os artigos foram analisados por dois pesquisadores independentes para garantir que os estudos atendessem aos critérios de inclusão.

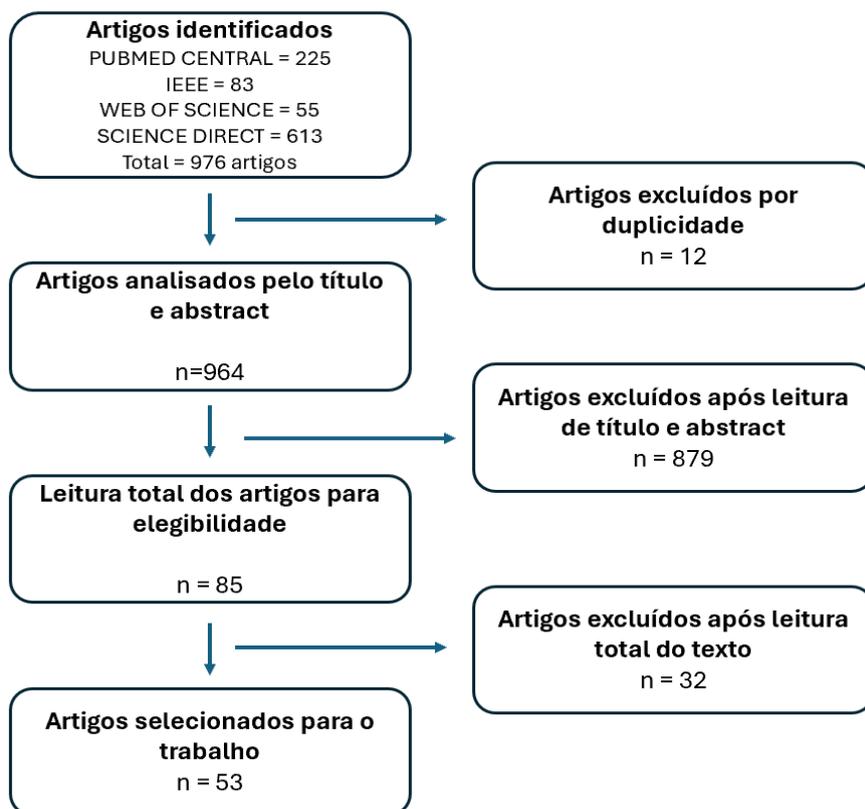
Para ajudar a definir os critérios de elegibilidade, foi utilizada a ferramenta PICOS (SCHARDT et al., 2007). Esta ferramenta ajuda a definir as variáveis relacionadas ao problema, como população, tipo de intervenção, comparação, desfecho, tipo de estudo, ano de publicação e idioma de publicação.

Foram excluídos os estudos que atenderam aos seguintes critérios: teses e dissertações, estudos com animais e dispositivos usados para reabilitação após cirurgia.

RESULTADOS

Um total de 976 registros foram identificados por meio das buscas nas bases de dados. Entre os artigos selecionados, 12 eram duplicados e excluídos imediatamente, resultando em 964 estudos para avaliação de elegibilidade. As revisões de título resultaram na exclusão de 879 artigos, os outros 85 artigos foram submetidos à revisão do resumo. Após todas as fases de seleção e extração, apenas 53 estudos atenderam aos critérios de inclusão e foram incluídos no presente estudo. A Figura 2 ilustra os resultados após o processo de extração.

Figura 1 - Diagrama do processo de revisão



Fonte: Santos MF, et al., 2024.

Como resultado da triagem, mais de 50 artigos foram qualificados para leitura de texto completo. Após a leitura completa dos artigos, foi possível extrair várias informações dos dispositivos usados pelos pesquisadores.

Mancisitor A, et al., (2017), classificou os dispositivos robóticos de reabilitação em dois grupos: tipo *end-effector* e tipo *wearable* (exoesqueleto). A diferença entre esses dois tipos de dispositivos é a estrutura mecânica e como o movimento é transferido para o paciente. *End-effector* tem contato apenas com a parte mais distal do membro e não precisa ter o mesmo formato do membro. Os exoesqueletos são dispositivos que têm sua estrutura mecânica espelhada no membro do paciente, com a preocupação do posicionamento das e seus movimentos (COPACI D, et al., 2019).

Aplicações

Analisando os tipos de dispositivos desenvolvidos, foi possível identificá-los e dividi-los em dois grupos distintos, um utilizado para reabilitação de pacientes, que é o mais comum e o outro utilizado para auxiliar o paciente nas atividades da vida diária. Esse grupo é utilizado para reabilitação e fisioterapia é projetado para uso em clínicas de reabilitação e para uso nas casas dos pacientes, evitando assim o deslocamento deles até as clínicas (MACIEJASZ P, et al., 2014).

Em relação ao grupo de dispositivos para auxiliar os pacientes na realização de atividades diárias, ainda há grandes dificuldades em termos de tecnologia e custo para que possam ser utilizados como um suplemento diário. Sabendo que a portabilidade e o fácil manuseio ainda são uma demanda constante, isso no futuro pode ser um diferencial para sua utilização. Se o dispositivo funcionar com múltiplas articulações, haverá necessidade de mais atuadores, o que tornará o dispositivo ainda mais pesado e caro.

Normalmente, dispositivos ativos usam uma fonte de energia para seus atuadores realizarem os movimentos, tanto em um efetor final quanto nos exoesqueletos. Dependendo do tipo de fonte de energia

definida no projeto, os atuadores serão escolhidos. Os principais tipos de energia são elétrica, pneumática e hidráulica. Mais recentemente, ligas metálicas de memória têm sido usadas.

Pneumático

Dispositivos pneumáticos usam ar comprimido e atuadores para transmitir os movimentos e são caracterizados por baixo custo e design leve, facilitando o uso pelos pacientes (KOH TH, et al., 2017; TANIGUCHI K, et al., 2015). Os atuadores têm características distintas, como mangas de elastômeros que podem dobrar mediante uma entrada de pressão de ar (KOH TH, et al., 2017). Módulos infláveis também são usados para fornecer os movimentos (OGUNTOSIN V, et al., 2015). Como esse tipo de atuador requer o uso de um compressor, o sistema é estacionário, conforme mostrado pelo dispositivo Pneu-WREX.

Os músculos artificiais pneumáticos (PAM), conhecidos como atuadores *McKibben* ou atuadores compostos de matriz flexível, podem ser usados em uma ampla gama de aplicações, incluindo próteses/órteses, robôs, tecnologias de asas em mudança e estruturas de rigidez variável. Além dos métodos tradicionais de acionamento por fluido, técnicas inovadoras, como técnicas de acionamento químico e elétrico, são revisadas (OGUNTOSIN V, et al., 2015).

Elétrico

Manna SK e Dubey VM, (2017), desenvolveram um dispositivo para recuperação do cotovelo utilizando um mecanismo de quatro barras, engrenagens, fuso de avanço e um mecanismo de manivela deslizante. O sistema é acionado por um pequeno motor elétrico que fornece o torque necessário às molas acopladas para fornecer a rigidez da articulação. Dinh BK, et al., (2017), desenvolveram um exoesqueleto de estrutura leve, capaz de transmitir forças para o movimento da articulação do cotovelo, através de um motor elétrico localizado nas costas do indivíduo.

O motor puxa cabos flexíveis que movimentam a articulação. Esses sistemas são caracterizados por terem em sua arquitetura sistemas elétricos e eletrônicos e são controlados por hardware e software (JOBAGY B, et al., 2014). O uso de controles eletrônicos combinados com codificadores e motores que controlam sua operação podem ser algumas outras características, bem como o uso de softwares de controle como MatLab e Math Works (DINH BK, et al., 2017).

SMA – Liga metálica com memória

Uma tecnologia mais recente a ser utilizada como atuador é uma liga metálica, *Shape Memory Alloy* (SMA), com a propriedade de recuperar sua forma original mesmo após ser deformada por aquecimento acima da temperatura de transformação entre a fase martensita e uma fase austenítica.

Esse tipo de atuador funciona por meio de aquecimento, com duas trocas físicas, transformando a energia elétrica em térmica, que é transformada em trabalho mecânico, levando a liga à sua posição original (COPACI D, 2019). Possui boas características quanto à força/peso e simplicidade, podendo substituir atuadores pneumáticos. As ligas mais comuns são chamadas de nitinol, compostas de níquel e titânio (Dynalloy, Inc., 2020).

Sistema de transmissão flexível

Uma grande parte dos dispositivos robóticos até agora é tipicamente composta de partes rígidas para transmitir forças, o que torna o equipamento maior e, portanto, mais pesado. O uso de sistemas de transmissão flexíveis (FTS), consistindo no sistema tendão-bainha, sistema acionado por cabo e fita de teia está sendo usado para reduzir o peso dos dispositivos (VITIELLO N, et al., 2016). Novos desenvolvimentos estão usando um exoesqueleto macio vestível com atuação de tendão-bainha de conformidade (CTSA) para minimizar as desvantagens das partes rígidas de sistemas mais convencionais. Este sistema é desenvolvido com base no modelo muscular baseado em Hill para imitar as características de trabalho do músculo humano (WU Q, et al., 2019).

Abaixo segue **Tabela 1**, que sumariza as características dos dispositivos robóticos para reabilitação de cotovelo analisados nesse estudo.

Tabela 1 - Dispositivos robóticos para reabilitação de cotovelo

Autor	Tipo	Aplicação	Tipo de assistência	Tipo de atuação	DOF
Ambrosini E, et al., (2014),	Exoesqueleto	Reabilitação	Passivo	Híbrido	3
Backus D, et al., (2014),	Efetor final	Reabilitação	Ativo	Elétrico	N/I
Jobbágy B, et al., (2014),	Efetor final	Reabilitação	Ativo	PAM	7
Lin CH, et al., (2014),	Efetor final	Reabilitação	Passivo	Híbrido	3
Marganska V, et al., (2014),	Efetor final	Reabilitação	Passivo	Elétrico	7
Rahman et al., (2014),	Efetor final	Reabilitação	Passivo	Híbrido	2
Sin M, et al., (2014),	Efetor final	Reabilitação	Passivo	Elétrico	1
Mohamaddan S, et al., (2015),	Efetor final	Reabilitação	Ativo	Elétrico	1
Oguntosin V, et al., (2015),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	Pneumático	1
Taniguchi K, et al., (2015),	Exoesqueleto	Reabilitação	Passivo	Híbrido	4
Wilkening et al., (2015),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	Pneumático	1
Vitiello N, et al., (2016),	Exoesqueleto	Reabilitação	Passivo	Elétrico	4
Werder SCFA e Klug D, (2016),	Exoesqueleto	Reabilitação	Passivo	Híbrido	2
Copaci D, et al., (2017),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	SMA	1
Dinh BK, et al., (2017),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	Elétrico	1
de Kruif BJ, et al., (2017),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	Elétrico	2
Kubota S, et al., (2017),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	Elétrico	1
Kutlu M, et al., (2017),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	Híbrido	N/I
Manna SK e Dubey VN, (2017),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	Elétrico	2
Qian et al., (2017),	Exoesqueleto	Reabilitação	Passivo	Elétrico	2
Saita K, et al., (2017),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	Elétrico	1
Zhou L, Li L, e Bai S, (2017),	Exoesqueleto	Reabilitação	Passivo	Híbrido	2
Akdoğan E, et al., (2018),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	Elétrico	3
Chen J e Lum OS, (2018),	Exoesqueleto	Reabilitação	Passivo	Híbrido	5
Liu K, et al., (2018),	Efetor final	Reabilitação	Ativo	Elétrico	5
Mancisidor A, et al., (2018),	Efetor final	Reabilitação	Ativo	Elétrico	2
Bertomeu-Motos A, et al., (2018),	Efetor final	Reabilitação	N/I	Híbrido	7
Copaci D, et al., (2019),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	SMA	1
Mochizuki G, et al., (2019),	Efetor final	Reabilitação	Passivo	Híbrido	4
Nematollahi M, et al., (2019),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	SMA	1
Trigili E, et al., (2019),	Exoesqueleto	Reabilitação	Active	Elétrico	4
Wu Q, et al., (2019),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	Elétrico	2
Chen W, et al., (2020),	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	Elétrico	4
Iglesia D, et al., (2020)	Exoesqueleto	Reabilitação	Ativo	Elétrico	4
Zang et al., (2020),	Exoesqueleto	Reabilitação		Elétrico	1

Fonte: Santos MF, et al., 2024.

DISCUSSÃO

Durante os últimos 15 anos, a pesquisa sobre o uso de robôs para reabilitação aumentou (AKDOGAN E, et al., 2018) e após a seleção dos artigos, foi possível verificar que grandes esforços estão sendo realizados na Ásia, com mais de 50% dos artigos sendo escritos neste continente, com a Europa respondendo por 36,8% dos artigos.

Esses dispositivos têm sido usados para auxiliar no movimento e dar suporte à função de reabilitação do paciente. Os principais problemas encontrados no desenvolvimento desse tipo de dispositivo incluem tamanho e complexidade dos componentes, que dificultam um arranjo que combine força, movimentos dinâmicos, peso final e tamanho (de KRUIF BJ, et al., 2017).

O desenvolvimento desses dispositivos para serem usados na reabilitação ativa assistida inclui os princípios da biomecânica (JOBÁGY B, et al., 2014; ZHOU L, YIBIN L, e BAI S, 2017), porque esses são os princípios que farão com que a interface entre o dispositivo e o paciente ocorra harmoniosamente.

Além da estrutura do dispositivo e da interface com o paciente, surgiu uma preocupação com a recuperação do paciente. Com base nessa preocupação, diversos estudos mostram que tais desenvolvimentos visam a criação de dispositivos compactos e de uso amigável (MOHAMADDAN S, et al., 2015), que facilitem a rotina diária do paciente, bem como sua recuperação, uma vez que podem ser usados em casa, evitando problemas de logística de viagens (AKDOĞAN E, et al., 2018) e aumentando a chance de que as sessões ocorram conforme planejado pelos profissionais de recuperação.

Para desenvolver protótipos de dispositivos de baixo custo, leves e fáceis de usar, os sistemas pneumáticos estão sendo usados como alternativas para recuperação do cotovelo (OGUNTOSIN V, et al., 2015). Esses dispositivos pneumáticos precisam de uma pressão operacional muito baixa, que mantenha movimentos suaves e considere o impacto no paciente. Embora esses sistemas normalmente tenham menos graus de liberdade (DoF), sua suavidade de acionamento e as facilidades acima mencionadas inspiraram novos estudos e desenvolvimentos. Outras tecnologias de dispositivos pneumáticos usam músculos artificiais para reabilitação e aumento da força nos membros comprometidos (TANIGUCHI K, et al., 2015). Mesmo com o desenvolvimento de equipamentos pneumáticos mais leves, alguns deles ainda não se preocupam com a portabilidade, pois são fixados em cadeiras (OGUNTOSIN V, et al., 2015) ou outras estruturas. Também é notado que esses dispositivos usam atuadores pneumáticos personalizados desenvolvidos exclusivamente para essa aplicação, o que pode torná-la mais cara e criar dificuldades em caso de manutenção. Equipamentos comerciais seriam mais fáceis de encontrar e rápidos de substituir.

Sinais de eletromiografia EMG foram usados em quase todos os estudos, para iniciar movimentos do membro parético ou como dados para os estudos realizados. Os sinais de EMG também foram usados para executar algoritmos que poderiam definir os padrões de movimentos (BERTOMEU-MOTOS A, et al., 2018). Basicamente, os sinais de EMG são captados por meio de eletrodos de contato colocados nos músculos que são as referências para os estudos (RONG W, et al., 2017). Este estudo também mostrou resultados positivos para a aplicação de sistemas robóticos no processo de reabilitação dos membros superiores. O uso de um dispositivo SPRING em casa demonstrou um aumento na amplitude de movimento e um aumento na extensão do cotovelo em uma média de 18,7% (CHEN J e LUM PS, 2018). O uso de dispositivos robóticos em conjunto com EMS também mostrou resultados positivos (TANIGUCHI K, et al., 2015), na escala FMA de 2,5 pontos. Quanto mais cedo o uso da terapia aumenta as chances de recuperação da plasticidade neural espontânea da resposta motora (CHEN J e LUM PS, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desde o início das pesquisas relacionadas ao desenvolvimento e uso de robôs para reabilitação, grandes conquistas aconteceram, tornando viável a construção de exoesqueletos. Grande parte dos dispositivos robóticos é tipicamente composta por partes rígidas, mas, no entanto, a busca constante por dispositivos leves, fáceis de usar, com baixo custo e com bom desempenho tem sido um dos principais objetivos desses desenvolvedores. A substituição dessas partes rígidas por sistemas de transmissão flexíveis, como o sistema tendão-bainha, sistema acionado por cabo e fita de teia pode ser o caminho para obter dispositivos mais leves. A Covid-19 trouxe um cenário diferente que certamente deve ser considerado em trabalhos futuros. A dificuldade de locomoção dos pacientes até as clínicas de fisioterapia pode ter causado comprometimento no tratamento. Dessa forma, a necessidade de desenvolver dispositivos portáteis, leves e fáceis de usar continua sendo alvo para desenvolvimentos futuros.

REFERÊNCIAS

1. AKDOĞAN E, et al. Hybrid Impedance Control of a Robot Manipulator for Wrist and Forearm Rehabilitation: Performance Analysis and Clinical Results. *Mechatronics* 49, 2014; 77–91.
2. AMBROSINI E, et al. A Myocontrolled Neuroprosthesis Integrated with a Passive Exoskeleton to Support Upper Limb Activities. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2014; 307–17.

3. BACKUS D, et al. Assisted Movement with Proprioceptive Stimulation Reduces Impairment and Restores Function in Incomplete Spinal Cord Injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2014; 95(8): 1447–53.
4. BERTOMEU-MOTOS A, et al. Human Arm Joints Reconstruction Algorithm in Rehabilitation Therapies Assisted by End-Effector Robotic Devices. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2018; 15(1): 1–11.
5. BUONGIORNO D, et al. A Novel 3 DoF WRist Exoskeleton With Tendon-Driven Differential Transmission for Neuro-Rehabilitation and Teleoperation, in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, 2018; pp. 2152-2159.
6. CHEN J, LUM OS. Pilot Testing of the Spring Operated Wearable Enhancer for Arm Rehabilitation (Spring Wear). *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2018; 15(1): 1–11.
7. CHEN W, et al. Mechanical Design and Kinematic Modeling of a Cable-Driven Arm Exoskeleton Incorporating Inaccurate Human Limb Anthropomorphic Parameters. *Sensors* 2019; 19, 446.
8. COPACI D, et al. SMA Based Elbow Exoskeleton for Rehabilitation Therapy and Patient Evaluation. *IEEE*, 2019.
9. COPACI D, et al. New Design of a Soft Robotics Wearable Elbow Exoskeleton Based on Shape Memory Alloy Wire Actuators. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2017.
10. DINH BK, et al. Adaptive Backlash Compensation in Upper Limb Soft Wearable Exoskeletons. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017; 92: 173–86.
11. FEIGIN VL, et al. Global and Regional Burden of Stroke during 1990-2010: Findings from the Global Burden of Disease Study 2010." *Lancet*, 2014; 383(9913): 245–54.
12. GOPURA RARC, et al. Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review. *Robots and Autonomous Systems*, 2016; 75: 203-220
13. IGLESIA D, et al. Connected Elbow Exoskeleton System for Rehabilitation Training Based on Virtual Reality and Context-Aware. *Sensors* 2020; 20, 858.
14. JOBBÁGY B, et al. Robotic Arm with Artificial Muscles in Rehabilitation." *Procedia Engineering*, 2014; 96: 195–202
15. KLAMROTH-MARGANSKA V, et al. Three-Dimensional, Task-Specific Robot Therapy of the Arm after Stroke: A Multicentre, Parallel-Group Randomized Trial. *The Lancet Neurology*, 2014; 13(2): 159–66.
16. KREBS HI EIICHI S, NEVILLE H. Robotic Therapy and the Paradox of the Diminishing Number of Degrees of Freedom. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 2015; 26(4): 691–702.
17. de KRUIF BJ, et al. Simulation Architecture for Modelling Interaction Between User and Elbow-Articulated Exoskeleton. *Journal of Bionic Engineering*. 2017; 14(4): 706–15.
18. KUBOTA S, et al. Safety and efficacy of robotic elbow training using the upper limb single-joint hybrid assistive limb combined with conventional rehabilitation for bilateral obstetric brachial plexus injury with co-contraction: a case report. *The Journal of Physical Therapy Science*, 2017; 31: 206–210
19. KUTLU M, et al. A Home-Based FES System for Upper-Limb Stroke Rehabilitation with Iterative Learning Control." *IFAC-Papers Online*, 2017; 50(1): 12089–94.
20. LIN CH, et al. Validity and Reliability of a Novel Device for Bilateral Upper Extremity Functional Measurements." *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2014; 114(3): 315–23.
21. LIU K, et al. Postural Synergy Based Design of Exoskeleton Robot Replicating Human Arm Reaching Movements." *Robotics and Autonomous Systems*, 2018; 99: 84–96.
22. MACIEJASZ P, et al. A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil*. 2014; 9;11:3.
23. MANCISIDOR A, et al. Kinematical and Dynamical Modeling of a Multipurpose Upper Limbs Rehabilitation Robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018; 49: 374–87.
24. MANNA SK, VENKETESH ND. A Mechanism for Elbow Exoskeleton for Customized Training." *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2017; 1597–1602.
25. MOHAMADDAN S, et al. Development of Upper Limb Rehabilitation Robot Device for Home Setting." *Procedia Computer Science*, 2015; 76(Iris): 376–80.
26. MOCHIZUKI G, et al. Movement kinematics and proprioception in post-stroke spasticity: assessment using the Kinarm robotic exoskeleton". *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*, 2019; 16:146.
27. MOHER D et al. Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis Protocols (PRISMA-P) 2015 Statement." *Systematic Reviews* 4(1): 148–60.
28. NEMATOLLAHI M. Application of NiTi in Assistive and Rehabilitation Devices: A Review". *Bioengineering (Basel)*. 2019; 6(2): 37.
29. OGUNTOSIN V, et al. Development of a Wearable Assistive Soft Robotic Device for Elbow Rehabilitation. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2015; 747–52.
30. PONS JL. *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*, John Wiley & Sons, 2008.
31. RONG W, et al. A Neuromuscular Electrical Stimulation (NMES) and Robot Hybrid System for Multi-Joint Coordinated Upper Limb Rehabilitation after Stroke. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2017; 14(1): 1–13.
32. SAITA K, et al. Combined Therapy Using Botulinum Toxin A and Single-Joint Hybrid Assistive Limb for Upper-Limb Disability Due to Spastic Hemiplegia. *Journal of the Neurological Sciences*, 2017; 373: 182–87.

33. SCHARDT C. Utilization of the PICO framework to improve searching PubMed for clinical questions. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 2016.
34. SIN M, et al. Electromyographic Analysis of Upper Limb Muscles during Standardized Isotonic and Isokinetic Robotic Exercise of Spastic Elbow in Patients with Stroke. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2014; 24(1): 11–17.
35. TANIGUCHI K, et al. Research of Rehabilitation Aid System by DOF Constrainable Mechanism and NMES for Hemiplegic Upper Limbs. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2015; 139-44.
36. TRIGILI E, et. al. Design and experimental characterization of a shoulder-elbow exoskeleton with compliant joints for post-stroke rehabilitation. in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017; vol. 24, no. 4, pp. 1485-1496.
37. VITIELLO N, et al., Functional Design of a Powered Elbow Orthosis Toward its Clinical Employment, in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016; vol. 21, no. 4, pp. 1880-1891.
38. von WERDER SCFA, DISSELHORST-KLUG C. The Role of Biceps Brachii and Brachioradialis for the Control of Elbow Flexion and Extension Movements. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2016; 28: 67–75.
39. WU Q, et al. Design and Fuzzy Sliding Mode Admittance Control of a Soft Wearable Exoskeleton for Elbow Rehabilitation. in *IEEE Access*, 2019; vol. 6, pp. 60249-60263.
40. ZHOU L, YIBIN L, SHAOPING B. A Human-Centered Design Optimization Approach for Robotic Exoskeletons through Biomechanical Simulation. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017; 91: 337–47.