

Análise dos Principais Avanços Tecnológicos da Indústria 4.0 Direcionados à Fisioterapia

Analysis of the Main Technological Advances of Industry 4.0 Directed to Physiotherapy

Ingridy Danielle Barros de Souza¹, Isabel Cristina Guedes de Lima², Juliane Monique Dias de Santana³, Juliana de Netto Maia⁴, Maria das Graças Paiva⁵, Gisela Rocha de Siqueira⁶ e Eduardo José Nepomuceno Montenegro⁷

1. Fisioterapeuta pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4994-7071>. 2. Fisioterapeuta pela UFPE. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7816-5250>. 3. Fisioterapeuta pela UFPE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4593-2672>. 4. Professora Doutora do Departamento de Fisioterapia da UFPE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8680-180>. 5. Professora Doutora do Departamento de Fisioterapia da UFPE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6913-8639>. 6. Professora Doutora do Departamento de Fisioterapia da UFPE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4520-1175>. 7. Professor Doutor Titular do Departamento de Fisioterapia da UFPE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9798-9190>.
[_eduardo3montenegro@gmail.com](mailto:eduardo3montenegro@gmail.com)

Palavras-chave

Fisioterapia
Indústria 4.0
Inteligência artificial
Internet das coisas

Keywords

Physiotherapy
Industry 4.0
Artificial intelligence
Internet of things

Resumo:

A Indústria 4.0 é um conceito que se refere à quarta revolução industrial, caracterizada pelo uso de várias tecnologias emergentes, voltadas para a eficiência e otimização de processos produtivos. Na Fisioterapia, a Indústria 4.0 é comumente remetida a uma quantidade limitada de ferramentas, sendo, inclusive, pouco elucidada na literatura vigente. O presente estudo trata-se de uma revisão narrativa, que objetivou evidenciar quais são as tecnologias da indústria 4.0 que frequentemente vem sendo utilizadas na Fisioterapia, e discorrer sobre as principais aplicações. A seleção dos artigos foi feita nas bases de dados: Medline, Google Acadêmico, ACM Digital e IEEEExplore. Os resultados mostraram que o aprendizado de máquina tem o maior número de aplicações, seguido de robótica avançada, inteligência artificial, internet das coisas, realidade virtual e análise de dados. Conclui-se que as tecnologias 4.0 estão presentes nos vários processos de reabilitação, desde a avaliação até os exercícios domiciliares.

Abstract:

Industry 4.0 is a concept that refers to the fourth industrial revolution, characterized by the use of several emerging technologies, aimed at the efficiency and optimization of production processes. In physical therapy, Industry 4.0 is commonly referred to a limited number of tools, and is poorly elucidated in the current literature. The present study is a narrative review, which aimed to show which are the Industry 4.0 technologies that have been frequently used in physical therapy, and to discuss the main applications. The articles were selected from the following databases: Medline, Google Scholar, ACM Digital, and IEEEExplore. The results showed that machine learning has the largest number of applications, followed by advanced robotics, artificial intelligence, internet of things, virtual reality and data analysis. It is concluded that technologies 4.0 are present in the various rehabilitation processes, from assessment to home exercises.

Artigo recebido em: 28.09.2023.

Aprovado para publicação em: 05.12.2023.

INTRODUÇÃO

A indústria 4.0 tem sido responsável por uma série de avanços tecnológicos em diferentes setores, e não por acaso, o termo já é utilizado para determinar a quarta revolução industrial, diante da quebra de paradigmas e criação de novos conceitos ao redor do mundo. Na Fisioterapia, as tecnologias 4.0 têm sido utilizadas para melhorar a qualidade dos tratamentos, proporcionar diagnósticos mais precisos e aumentar a eficiência dos processos terapêuticos, beneficiando pacientes e profissionais, colaborando com a ascensão da profissão e abrindo oportunidades para a inovação no setor.

O termo “Indústria 4.0” foi descrito pela primeira vez na Feira de Hannover, na Alemanha, em 2011, durante uma apresentação do governo alemão sobre sua estratégia de manufatura avançada e, desde então, tem sido amplamente utilizado para descrever a transformação digital da indústria, baseada na convergência de tecnologias físicas, digitais e biológicas (DRATH; HORCH, 2014). As alterações promovidas por essa revolução são caracterizadas por incorporar ferramentas digitais avançadas e, principalmente, pela implementação de conectividade em todos os processos de produção (SANTOS *et al.*, 2018). Essa remodelação é constituída por tecnologias e conceitos emergentes que formam os nove pilares da Indústria 4.0: Robôs autônomos; *Big Data* e *Data Analytics*, Simulação, Integração de sistemas, Internet das Coisas - IoT, Cibersegurança, Computação em nuvem, Manufatura aditiva e Realidade aumentada (LAVAGNOLI, 2018). Elas são responsáveis por aumentar a produtividade, reduzir custos e melhorar a qualidade dos produtos e serviços.

Nesse contexto, a Fisioterapia também vem se adequando às transformações promovidas pelas aplicações criadas a partir dessas ferramentas e desenvolvendo novas formas de atuação na área de saúde. Algumas dessas modificações vêm sendo conhecidas por proporcionar interatividade, precisão e acurácia ao longo das sessões de terapia (SOUZA, 2021).

Dentre as mais conhecidas, destacam-se o uso de robôs, realidade virtual e a chamada “Gameterapia”, que promove uma interação entre jogos e pacientes, de acordo com a proposta terapêutica elencada pelo profissional, para que a sessão seja cada vez mais atrativa e efetiva, demonstrando o tamanho do impacto que essas alterações vêm proporcionando nas condutas convencionais (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Assim, diante da existência de outras ferramentas da indústria 4.0, que tem poder efetivo de transformação e podem ser implementadas na Fisioterapia, como a Inteligência Artificial, o aprendizado de máquina e o desenvolvimento de sistemas tecnológicos, percebe-se uma falha na elucidação dessas aplicações na literatura vigente.

Nesse contexto, a presente revisão narrativa tem como objetivo realizar uma análise dos principais avanços da indústria 4.0 direcionados à Fisioterapia, por meio da inspeção de artigos científicos publicados nos últimos cinco anos. Para que assim, a partir desse estudo, seja possível identificar as alterações que os pilares da quarta revolução industrial vem proporcionando às diversas áreas de atuação fisioterapêuticas.

REFERENCIAL TEÓRICO

A indústria 4.0 é um conceito que se refere à quarta revolução industrial, impulsionada pela integração de tecnologias avançadas em processos produtivos, sucedendo de três revoluções decorrentes da automação mecânica, eletrificação e das tecnologias de informação, respectivamente.

Esses marcos industriais representam momentos significativos na história da humanidade e na evolução da produção, pois cada revolução trouxe mudanças radicais nos processos produtivos, na organização do trabalho e na relação entre os indivíduos e as máquinas. Além disso, as revoluções industriais também trouxeram impactos sociais, econômicos e políticos em escala global, transformando a vida das pessoas e moldando o mundo de hoje. Dessa forma, compreender as características e as consequências dessas revoluções é fundamental para entender a história da humanidade e para projetar o futuro da produção industrial (CAVALCANTE *et al.*, 2011).

A Primeira Revolução Industrial datada, aconteceu entre o final do século XVIII e o início do século XIX e foi marcada pela mecanização da produção e pela utilização de fontes de energia como a água e o vapor (CAVALCANTE *et al.*, 2011); Em seguida, na segunda Revolução Industrial, que ocorreu no final do século XIX e início do século XX, houve o surgimento da eletricidade e do uso de novos materiais na produção industrial. Já a Revolução Digital, ou terceira revolução industrial, promoveu transformações na segunda metade do século XX, com o surgimento da eletrônica e da informática possibilitando a automatização e robotização de processos industriais (SEBRAE, 2018).

Atualmente o mundo passa pela Quarta revolução industrial que tem como sinônimo a expressão "Indústria 4.0", como dito anteriormente. O termo foi relatado pela primeira vez em uma apresentação, na Feira de Hannover, em 2011, onde foi apresentada uma iniciativa do governo alemão para desenvolver estratégias tecnológicas avançadas no país e desde então vem sendo utilizada como marco para as mudanças que as tecnologias emergentes vem promovendo na sociedade (SILVEIRA, 2016).

Para Schwab (2016), a indústria 4.0 é impulsionada por três áreas: a física, digital e biológica, que interagem entre si e promovem mudanças em vários setores, incluindo a saúde, agricultura, manufatura, serviços financeiros e transporte, entre outros.

Diante disso, para elucidar essas transformações, RÜSSMANN *et al.*, (2015) afirmaram que a Indústria 4.0 é sustentada por nove pilares, evidenciados na tabela 1.

Nas diversas vertentes desses pilares, encontram-se também, ferramentas de extrema importância tanto para a quarta revolução industrial, quanto para os avanços tecnológicos em geral. Dentre elas, destacam-se a Inteligência Artificial (IA), que é um campo da ciência da computação que busca criar sistemas capazes de realizar tarefas que geralmente exigem inteligência humana, como reconhecimento de fala, visão computacional, tomada de decisões e aprendizado (SILVA, 2019).

Outra ferramenta tecnológica de extrema relevância para a Indústria 4.0 é o Aprendizado de Máquina - *Machine Learning*, uma subárea da IA, que se concentra em modelos computacionais que podem aprender a partir de dados. Esses algoritmos são capazes de identificar padrões e relações nos dados de entrada e usam esses mesmos padrões para tomar decisões ou fazer previsões sobre novos dados. O *machine learning* é usado em uma variedade de aplicações, incluindo reconhecimento de fala, diagnóstico médico, detecção de fraudes e previsão de demanda (REZENDE, 2023).

Dessa forma, essas tecnologias permitem a análise de grandes quantidades de dados e a tomada de decisões mais precisas e rápidas, além de possibilitar a criação de sistemas autônomos e inteligentes que podem melhorar a produtividade e a segurança das operações industriais, promovendo a otimização da produção, a redução de custos até a criação de novos modelos de negócios e, principalmente a melhoria da qualidade de vida.

Tabela 1 - Descrição dos 9 pilares da indústria 4.0

Pilares da Indústria 4.0	Definição
Robôs autônomos	Máquinas programáveis que podem operar sem intervenção humana direta.
Grandes dados (<i>Big Data</i>) e Análise de dados (<i>Data Analytics</i>)	Coleta, armazenamento e análise de grandes quantidades de dados para gerar insights e tomar decisões mais precisas.
Simulação	Criação de modelos virtuais para testar e validar produtos, processos e sistemas antes da produção em massa.
Integração de Sistemas	Conexão de sistemas, máquinas e dispositivos para permitir o compartilhamento de informações e a automação de processos.
Internet das Coisas - IoT	Conectividade entre objetos físicos e digitais para coleta e compartilhamento de dados em tempo real.
Cibersegurança	Proteção de sistemas, dados e informações contra ataques cibernéticos.
Computação em Nuvem	Acesso remoto a recursos de computação, armazenamento e processamento de dados por meio da internet.
Manufatura Aditiva	Produção de peças e componentes por meio da adição camada por camada de material, a partir de um modelo digital.
Realidade Aumentada	Sobreposição de elementos virtuais sobre o mundo real para permitir a visualização e interação com informações digitais em tempo real.

Fonte: Rüssmann *et al.* (2015). Adaptado e traduzido pelos autores.

METODOLOGIA

O presente estudo trata-se de uma revisão de literatura do tipo narrativa, que tem como objetivo realizar um levantamento em artigos publicados nos últimos cinco anos, de 2018 a fevereiro de 2023, para identificar as tecnologias da indústria 4.0 que mais foram aplicadas na Fisioterapia, e assim, informar sobre os atuais avanços tecnológicos na área e também avaliar os possíveis impactos e barreiras apresentados pelos autores na implementação dessas ferramentas.

A construção do estudo foi constituída das seguintes etapas: desenvolvimento da questão central; definição dos critérios de inclusão e exclusão dos artigos; análise e agrupamento dos estudos por tecnologia; especificação das informações relevantes a serem extraídas dos artigos selecionados; análise e interpretação dos resultados e elaboração da revisão narrativa, que teve como pergunta norteadora: Quais são as tecnologias da indústria 4.0 que têm sido mais frequentemente utilizadas na fisioterapia e como essas tecnologias têm sido aplicadas?

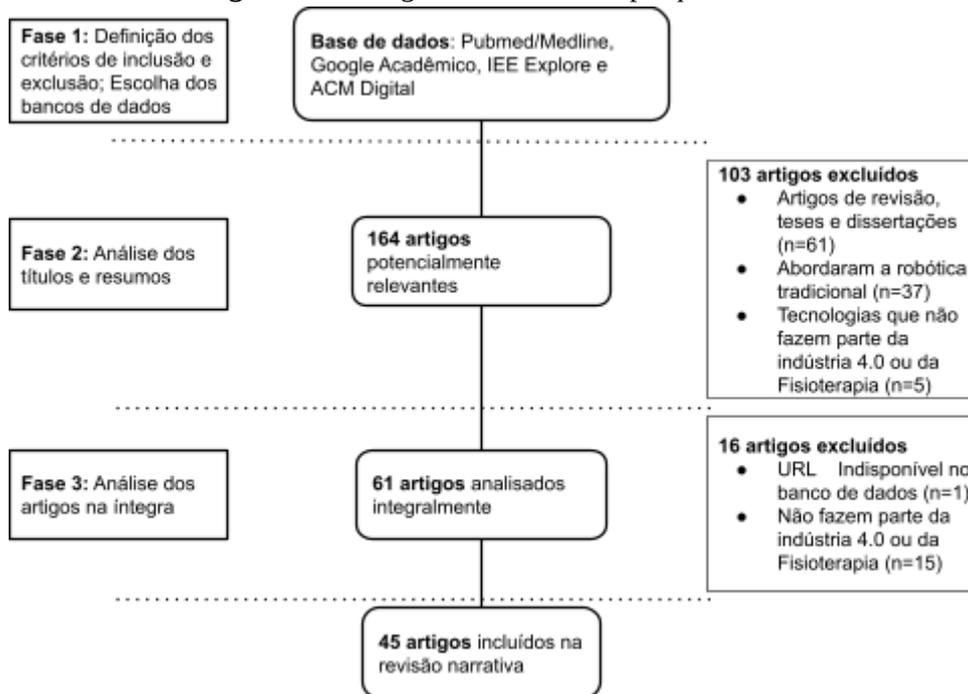
Os critérios de inclusão foram artigos online disponíveis nos seguintes bancos de dados: *MEDLINE* (*National Library of Medicine and National Institutes of Health*) via Pubmed, Google acadêmico, *ACM Digital Library* (*Association for Computing Machinery Digital Library*) e *IEEE Xplore* (*Institute of Electrical and Electronics Engineers Xplore*), publicados de 2018 a fevereiro de 2023, nas línguas portuguesa, inglesa e espanhola.

A pesquisa foi realizada por meio de palavras-chave acompanhado de o uso do operador booleano “and”, para permitir a junção dos grupos de palavras elencadas, e também o operador “or”, para termos sinônimos e assim abranger todos artigos relacionados ao assunto, assim, os termos ficaram da seguinte maneira: (“*Physiotherapy*” OR “*Rehabilitation*”) AND (“*Technology*” OR “*Advanced Robotics*” OR “*Artificial Intelligence*” OR “*Machine Learning*” OR “*Internet of Things*” OR “*Data Analytics*” OR “*Big Data*” OR “*3D Printing*”), procurados também nas respectivas línguas citadas anteriormente. É importante salientar que essas tecnologias foram escolhidas especificamente, por terem bastante afinidade com os conceitos vigentes da indústria 4.0 e, principalmente, por possuírem um grande potencial de desenvolvimento de aplicações voltadas para a área de fisioterapia.

Foram excluídos os estudos de revisão, editoriais, artigos de opinião, dissertações, teses e trabalhos de conclusão de curso; além de artigos que estivessem repetidos em mais de uma base de dados.

A seleção dos artigos foi dividida em três fases, como mostra a figura 1. Inicialmente definiu-se os bancos de dados da pesquisa e os critérios de inclusão; em seguida os títulos e resumos dos artigos foram avaliados, e assim separados por ferramentas da Indústria 4.0; os que foram considerados relevantes e de acordo com os critérios de elegibilidade foram obtidos em sua versão completa para análise mais aprofundada.

Figura 1 - Fluxograma das fases da pesquisa.



Fonte: De autoria própria

RESULTADOS

O presente estudo, por meio do levantamento de artigos nas bases de dados e, após a aplicação dos critérios de elegibilidade, identificou que a ferramenta da indústria 4.0 que mais possui trabalhos publicados relacionados a área de Fisioterapia é o Aprendizado de Máquina, totalizando 16 artigos, quantitativo esse, referente a 35,56% do total de artigos elencados. A segunda tecnologia mais utilizada é a Robótica Avançada,

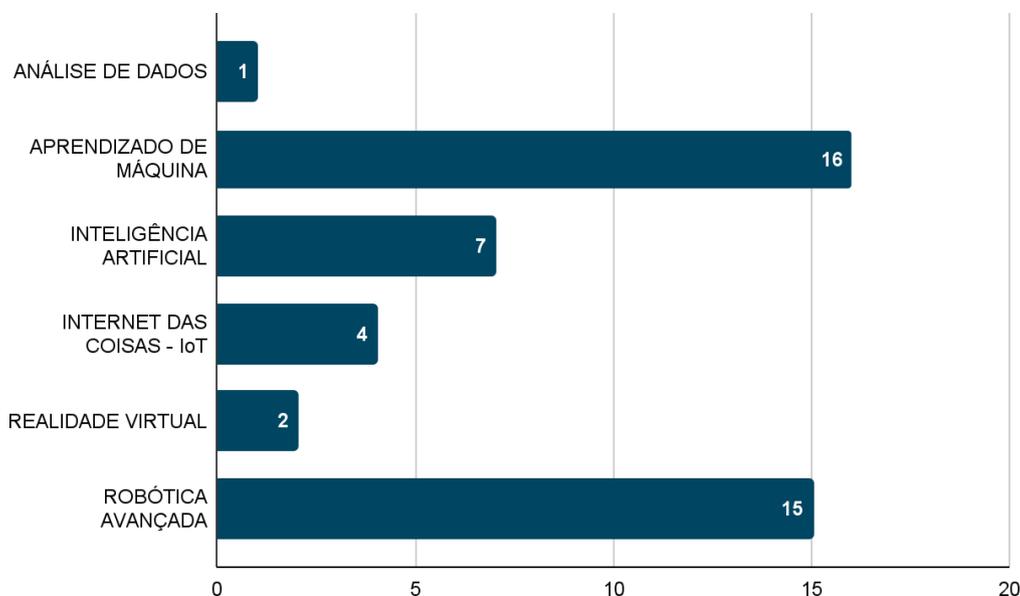
que apresentou um número bem próximo da primeira tecnologia, com 15 artigos e, fechando as três primeiras posições, apresenta-se a ferramenta Inteligência Artificial com 7 estudos.

Também foi possível observar que as ferramentas Grandes Dados, e Impressão 3D, apesar de pertencerem ao grupo de tecnologias da indústria 4.0, não foram encontradas publicações que possuíssem correlações com a Fisioterapia mediante aos critérios desta pesquisa.

A ferramenta Análise de Dados foi abordada em apenas um artigo; fator esse, similar a tecnologias de Realidade Virtual e Internet das Coisas, com dois e quatro artigos evidenciados, respectivamente.

A distribuição dos artigos encontrados e categorizados por tecnologia está elucidada na figura 2.

Figura 2 – Número total de artigos, elencados por tecnologia da indústria 4.0.



Fonte: De autoria própria.

DISCUSSÃO

ROBÓTICA AVANÇADA

A robótica avançada é uma área da indústria 4.0 em constante evolução e tem trazido grandes inovações para o mercado mundial; os robôs avançados são capazes de detectar e responder às mudanças no ambiente ao seu redor, tomar decisões baseadas em dados em tempo real e realizar tarefas complexas de forma independente através da utilização de sensores, IA e outras tecnologias que permitem mais autonomia e interatividade. Na medicina, já se utiliza essa tecnologia para a realização de cirurgias, demonstrando a capacidade de precisão e segurança, que é requisitada e necessária para esse tipo de procedimento (HELLER DE PAULA, 2017).

É importante destacar que a robótica avançada se difere da robótica tradicional, que utiliza robôs programados para realizar tarefas pré-determinadas. A robótica tradicional está relacionada às categorias de robôs, que são projetados para realizar tarefas específicas em linhas de produção, que geralmente são controlados por programação prévia, e realizam as tarefas de forma repetitiva, sem a capacidade de se adaptar a

mudanças ou tomar decisões autônomas. Diferentemente dos avanços dos robôs autônomos que possuem mais rapidez, mobilidade e feitos de materiais mais leves (MANYIKA *et al.*, 2013, p.69).

Assim, com esses avanços, as plataformas robóticas surgem como uma solução a diversos campos do cotidiano das pessoas, inclusive na reabilitação, que é um exemplo de aplicabilidade dessas máquinas, voltada para o âmbito da saúde, cujo um de seus potenciais é o de propriocepção 3D. Além disso, esses dispositivos permitem as terapias em grupo, pois existe a possibilidade da máquina monitorar os progressos e oferecer engajamento e confiança para realização desse processo (VALDÉS *et al.*, 2019; LIAKOPOULOU *et al.*, 2021).

Uma das funcionalidades da robótica avançada para saúde é a sua utilização na reabilitação de pacientes com incapacidade motora. O acidente vascular cerebral (AVC) é a principal causa dessa incapacidade em adultos. A reabilitação assistida por robôs é um passo importante para recuperação motora de pacientes com sequelas do AVC (ZHANG, WANG, SHI, 2021).

Para isso, Zhang, Wang e Shi (2021), utilizaram o sistema robótico controlado pelo olhar, sua finalidade foi a reabilitação de membros superiores, podendo ser utilizado para reabilitação em pacientes nas diferentes fases de seu tratamento, tornando-se uma ferramenta envolvente e programada para disponibilizar variadas assistências.

Chang *et al.*, (2020), Covaciu; Pisla; Jordan (2021) e El-Kafy *et al.*, (2022) também corroboraram com a ideia de que a reabilitação com a participação de um robô traz mais benefícios para pacientes em reabilitação de sequelas após o AVC. O primeiro, utilizou o “*AI Therapist - AI-T*”, sistema neuro-difuso, treinado com as palavras do terapeuta e os dados clínicos e robóticos coletados por meio da marcha assistida pelo robô *SUBAR*. O segundo, afirmou que a utilização da tecnologia motiva os pacientes; seu projeto consiste em um simulador com realidade virtual para um sistema robótico controlado por um módulo inteligente que utiliza aprendizado de máquina para recuperação do tornozelo de pacientes com AVC. Esse sistema é capaz de monitorar a evolução do paciente e estabelecer os níveis de exercício (COVACIU, PISLA, IORDAN, 2021). E por fim, o terceiro, que utilizou os jogos de realidade virtual mediados por robôs para recuperação da espasticidade e as funções motoras dos membros superiores de pessoas com AVC crônico. Os pacientes que fizeram uso dessa ferramenta tiveram um melhor efeito na maioria das variáveis em relação ao grupo que não utilizou (EL-KAFY *et al.*, 2022).

Outra funcionalidade da reabilitação robótica na fisioterapia, é a abordagem em crianças com paralisia cerebral (PC). A lesão neurológica causada por essa patologia em crianças que acabam por apresentar maior fraqueza na musculatura distal, dificuldade nas contrações musculares e dificuldade nos deslocamentos mais rápidos. Para isso, Coley *et al.*, (2023) utilizaram o sistema robótico intitulado “*PedBotHome*”, que agregado ao uso de uma interface de videogame, simula a pilotagem de um avião por meio dos pés, com o intuito de promover a realização de exercícios domiciliares de reabilitação de tornozelo através da movimentação assistida ou resistida nos três graus de liberdade, reproduzindo o movimento natural da articulação, de maneira lúdica para motivar as crianças e aumentar a adesão ao tratamento. Os autores também apresentam os resultados de um estudo piloto que avaliou a segurança e a eficácia da utilização do “*PedBotHome*” na reabilitação de crianças com PC, através da avaliação de parâmetros como os graus de força e de espasticidade dos flexores-plantares. Dessa forma, foi possível demonstrar que, após o protocolo de intervenção, observou-se ganhos na amplitude de movimento, melhora da força e diminuição da espasticidade do tornozelo, fatores essenciais para a estabilidade e equilíbrio durante diversas atividades de vida diária, a exemplo da caminhada. O artigo enfatiza, ainda, que esse modelo de robô é uma evolução do chamado “*PedBotLab*”, outra modali-

dade de sistema robótico, que por sua vez, é direcionado para a reabilitação no ambiente clínico. Ainda sobre os achados da pesquisa, observou-se que o robô “*PedBotHome*”, teve uma boa aceitação por parte das crianças, sendo mais um fator que demonstra o potencial dessa ferramenta, para melhorar a qualidade de vida e o bem-estar das crianças com deficiências neurológicas.

Martin *et al.*, (2020) também propuseram intervenções voltadas para crianças com PC, por meio do desenvolvimento de um *framework*, um tipo de conjunto de recursos adaptativos, para melhorar a interação e promover a personalização das sessões de fisioterapia guiadas pelo robô “*NAOTherapist*”, um robô humanoíde, equipado com sensores e câmeras que permitem interagir com o ambiente e com as pessoas ao seu redor e que permite ser programado para executar exercícios de fisioterapia, guiando, oferecendo *feedback* sobre o desempenho e o progresso ao paciente em tempo real. Ainda sobre o *framework*, os autores afirmam que sua construção foi viabilizada por meio da coleta de informações do perfil do paciente e seu progresso na reabilitação de forma que, através desses dados foi possível promover a individualização das condutas e consequentemente proporcionar o aumento da motivação, além do compromisso dos usuários. É importante salientar que esse sistema robótico citado acima, trabalha em conjunto com fisioterapeutas, que por sua vez, buscam auxiliar e monitorar as sessões, enquanto os robôs demonstram as séries já pré definidas.

Acerca do trabalho mútuo entre profissionais e robôs, muitos fisioterapeutas estão com receio de serem substituídos pela máquina, porém, apenas com a junção dos dois que problemas futuros no âmbito da reabilitação, podem ser superados. A reabilitação dos membros superiores tem sido muito explorada pelos criadores de robôs, sendo utilizado tanto o exoesqueleto, um tipo de dispositivo robótico vestível, projetado para auxiliar o movimento do corpo humano ajustando-se ao corpo do paciente e fornecendo suporte mecânico para os membros afetados; quanto também com o uso do efector final, que é uma categoria de robôs projetados para executar movimentos precisos e repetitivos, com controle de força e velocidade, para ajudar na recuperação do movimento e na restauração da função. Entretanto, esses dispositivos são mais empregados em pesquisas do que na prática clínica, além de terem um custo elevado, o que consequentemente torna difícil a sua utilização e popularização (JAKOB *et al.*, 2018).

Albanese *et al.*, (2021) pontuaram que há um constante avanço na neuro-reabilitação com robôs, diferentemente do que acontece no campo ortopédico, como por exemplo no desenvolvimento de ferramentas para a reabilitação nas lesões de punho. Diante disso, a autora desenvolve o robô “*WRISTBOT*”, que tem como finalidade o controle motor e a reabilitação do pulso humano, são características dele os baixos valores de inércia. Em seu ensaio clínico randomizado e controlado, constatou que o grupo submetido aos cuidados de robô apresentaram melhor desempenho quando comparado ao grupo da reabilitação tradicional.

Além disso, os pesquisadores Bergmann *et al.*, (2018) e Wang *et al.*, (2019) fizeram estudos, respectivamente, sobre os modelos de robô como o “*RAGT*”, aumentado por realidade virtual para o treinamento da marcha assistida e o “*BAXTER*” para reagir de acordo com os limites do paciente, auxiliando na reabilitação da mão.

Ozgur *et al.*, (2019) descreveram em seu artigo a utilização de jogos com robôs para reabilitação de membros superiores, enquanto Chin, Hsiung e Chiang (2023) objetivaram a aplicação do *Pneumatic Artificial Muscle* (PAM), músculo artificial pneumático, na tradução para o português, voltado para um sistema de robô com a finalidade de reabilitar membros inferiores de 2 graus de liberdade. Por sua vez, Bamdad, Mokri e Abolghasemi (2022) pesquisaram modelos miocinéticos matemáticos, em especial o modelo musculoesquelético impulsionado por eletromiografia (EMG) que podem melhorar a rigidez articular.

Dessa forma, percebeu-se que a Robótica avançada, oferece métodos inovadores para a reabilitação de pacientes com diversas necessidades e patologias, sendo a neuro-reabilitação uma das áreas da Fisioterapia mais beneficiadas. A robótica avançada pode melhorar a precisão e a consistência da terapia, ajudando a garantir que as sessões de reabilitação sejam realizadas de maneira consistente e precisa, o que pode levar a melhores resultados para a evolução dos pacientes (ALBANESE *et al.*, 2021).

APRENDIZADO DE MÁQUINA - *MACHINE LEARNING*

Machine learning é uma das tecnologias mais promissoras da atualidade, especialmente na Indústria 4.0. Trata-se de uma técnica de IA, que permite que as máquinas aprendam e se adaptem a partir de dados e experiências anteriores, sem a necessidade de serem explicitamente programadas.

Com o aprendizado de máquina é possível explorar diversas áreas da tecnologia de ponta que, por sua vez, trará grandes mudanças no mundo, uma delas é a reabilitação por robô para pacientes pós-AVC cujo o modelo é baseado no *machine learning*, que consegue ser utilizado como sistemas de apoio à decisão clínica (CDSS). Para esses pacientes, é possível utilizar também uma luva de dados, um aplicativo móvel e algoritmos de aprendizado de máquina a fim de avaliar seu desempenho. Por outro lado, torna possível inclusive, que a população realize exercícios em casa por meio de um aplicativo capaz de avaliar a dificuldade dos exercícios e fornecer *feedback* (CAMPAGNINI *et al.*, 2022; SARWAT *et al.*, 2021 RANASINGHE *et al.*, 2021).

Bennett, Kumar e Garate (2022) fizeram uso de algoritmos simples de aprendizado de máquina para prever trajetórias de movimento verticais que poderiam ser empregadas para o controle de um robô a partir de dados sobre biomecânica de corpo inteiro e de força durante os movimentos de sentar e levantar, realizados por pessoas que sofreram e não sofreram AVC, porém, concluiu em sua pesquisa que é preciso estudos em maior escala para obter resultados mais significativos.

No âmbito da reabilitação cardíaca, é de senso comum que as doenças cardiovasculares, de maneira geral, possuem múltiplos fatores, questão essa que pode vir a dificultar a assistência, especificamente o monitoramento remoto e a reabilitação. Posto isso, o aprendizado de máquina e a IA podem auxiliar nesse processo, tornando-o mais fácil, a partir de um sensor multiparamétrico capaz de interpretar a capacidade funcional no acompanhamento longitudinal de pacientes em reabilitação cardíaca (CANNIÈRE *et al.*, 2020).

Yuan *et al.*, (2023) avaliaram oito modelos de aprendizado de máquina com a finalidade de prever a probabilidade de retorno ao trabalho de pacientes que passaram por reabilitação cardíaca. Os pesquisadores recorreram a esses algoritmos para criar modelos de previsão com base nos dados coletados. Eles compararam a precisão de cada modelo e selecionaram o que apresentou melhores resultados e assim, o autor concluiu que o modelo chamado “*AdaBoost*” se destacou entre os demais, pois, é capaz de realizar essa previsão.

Enquanto isso, An *et al.*, (2020) relataram sobre o uso de um detector de movimento da cervical, com a finalidade de observar a saúde desse segmento da coluna. Sharifi *et al.*, (2021) em suas pesquisas, utilizaram o aprendizado de máquina para diagnosticar pés hígidos e não hígidos, de acordo com imagens de pegada digital. Segal; Hadar (2022) desenvolveram um simulador de rede neural, um sistema computacional inspirado no funcionamento do cérebro humano. Ela é composta por camadas de "neurônios artificiais" que estão conectados entre si e trabalham em conjunto para resolver tarefas complexas de processamento de informações. Essa rede visou quantificar, marcar e inferir gestos humanos usando um banco de dados com pacientes anônimos.

Para facilitar a fisioterapia em casa, Sanesi *et al.*, (2019) se beneficiaram do aprendizado de máquina para descrever um *pipeline* capaz de detectar e avaliar a execução correta de exercícios gravados pelo celular, para que assim não seja necessária a presença física dos terapeutas para monitorar os exercícios. Igualmente, Arrowsmith *et al.*, (2022) buscaram esse monitoramento, porém, não supervisionado, baseado em vídeos de exercícios para lombar e ombro, isso é possível devido a uma rede neural convolucional treinada para classificar esses exercícios com base em segmentos de dados.

Nijeweme-s'Hollosy *et al.*, (2018) também abordaram o aprendizado de máquina voltado para reabilitação de pacientes com dor lombar. Para isso, utilizaram um sistema de apoio à decisão clínica (Clinical Decision Support Systems - CDSS) com o modelo de árvore impulsionada, porém, afirmaram que ainda precisa de melhorias, entretanto, dentre os modelos utilizados na pesquisa foi o que teve melhor desempenho. Já Alfakir (2022) buscou um sistema que detecta especificamente a realização de exercícios não supervisionados voltados para pacientes com lombalgia, por meio de um projeto de classificação quantitativa, por uma estrutura de aprendizado de máquina e de uma rede convolucional treinada com os dados das séries temporais. Abdollahi *et al.*, (2020) também discorreram sobre a dor lombar em seu estudo, porém, a inespecífica. Pontuaram que para essa problemática, os profissionais seguem utilizando as coordenadas convencionais, por isso objetivaram na pesquisa, desenvolver um modelo de aprendizado de máquina baseado em sensores para classificar os pacientes com dor lombar inespecífica por meio de dados cinemáticos quantitativos.

A reabilitação baseada em exercícios desempenha um papel fundamental na melhoria da saúde e qualidade de vida de pacientes com *Cardiovascular Disease* (CVD), que significa Doenças cardiovasculares, em português. Triantafyllidis *et al.*, (2018) desenvolveram um *Decision Support System* (DSS), sistema de apoio à decisão, que usa aprendizado de máquina para analisar dados de avaliação do paciente, como idade, gênero, condições médicas e níveis de aptidão física, e assim, fornecer orientações específicas sobre o tipo, frequência e intensidade de exercícios que o paciente deve realizar. A fim de promover exercícios de reabilitação domiciliar, de forma não-supervisionada, demonstrando sua viabilidade e potencial de apoiar intervenções fisioterapêuticas.

Ponciano *et al.*, (2019) buscaram utilizar o Aprendizado de Máquina para medir os parâmetros do teste *Timed-Up and Go*, a partir de um *smartphone* com sensores embutidos, entre eles, as funcionalidades permitiam fornecer informações da EMG e Eletrocardiografia (ECG) e um segundo dispositivo Bitalino com um sensor de pressão conectado, para que seus resultados contribuam na descoberta de padrões complexos e condições relacionadas, como alterações de equilíbrio, patologias neurológicas e outras.

Percebe-se que o Aprendizado de máquina se mostra como base para o desenvolvimento de muitas aplicações e, inclusive, é utilizado como estrutura para outras ferramentas, à exemplo da robótica avançada; sendo uma subárea importante da IA, fomentando a ideia de que, no futuro, o desenvolvimento de sistemas que forneçam assistência personalizada à saúde se torne menos complexo, fator de grande relevância para a fisioterapia em pacientes com diversas sequelas, seja no ambiente clínico ou em propostas de exercícios domiciliares (BENNETT, KUMAR e GARATE 2022).

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL - IA

A inteligência artificial (IA), é de suma importância quando se trata de ferramentas da indústria 4.0, a reabilitação por meio de jogos é um exemplo disso. Abordada pelos autores Varga; Stoicu-Tivadar e Stelian (2021) que pesquisaram sobre a reabilitação de pacientes com artrite reumatóide de primeiro e segundo es-

tágios. Eles desenvolveram um aplicativo que objetiva realizar a reabilitação da mão com o auxílio da tecnologia digital e interação multimodal: movimento de salto, jogos sérios e redes neuronais. E assim, por meio dos algoritmos da rede neural é viabilizada o suporte para os pacientes realizarem os exercícios em casa (VARGA; STOICU-TIVADAR e STELIAN 2021).

Outro exemplo se dá no artigo de Burdea *et al.*, (2021) que igualmente, utilizaram jogos para a reabilitação de pacientes que sofreram AVC. Os *softwares* também utilizam dessa inteligência. Sarwat *et al.*, (2021) apresentaram uma luva de dados que funciona por meio do uso de IA em conjunto com técnicas de aprendizado de máquina.

Assim como Luna *et al.*, (2021) que utilizaram um aplicativo móvel de IA para avaliar os movimentos corretos durante o exercício de agachamento, de acordo com o peso corporal. A IA também é utilizada no âmbito da robótica, a exemplo do robô *SUBAR* utilizado na reabilitação de pacientes com AVC, da mesma forma com o exoesqueleto de joelho que é aprimorado com o uso da IA, para fisioterapia (ZHANG *et al.*, 2021; LYU *et al.*, 2019).

Thiengwittayaporn *et al.*, (2021) direcionaram seu trabalho para a reabilitação de pacientes com osteoartrite do joelho, uma doença articular degenerativa que requer exercícios consistentes e uma compreensão precisa da condição clínica, por parte dos profissionais, para manutenção a longo prazo das evoluções adquiridas. Para isso, eles desenvolveram um aplicativo móvel interativo, chamado de “*RAK KAO*”, sem fins lucrativos. Sua finalidade foi educar os pacientes sobre as patologias e disponibilizar exercícios que auxiliam na sua reabilitação, além disso, o aplicativo consegue analisar o estágio da doença por meio de questionários e consegue direcionar o exercício adequado baseado nas respostas e em regras da IA.

É importante ressaltar que, com a recente pandemia de COVID-19, foi fomentada a descoberta de novas necessidades, frente aos avanços mundiais. Uma delas é a viabilização da reabilitação domiciliar, que tem se tornado possível, dentre outras coisas, graças às ferramentas da Indústria 4.0, à exemplo da IA (SARWAT, *et al.*, 2021).

INTERNET DAS COISAS - IOT

Dahua Zhang e Xiang Zhang (2021) trabalharam em seu estudo a impressão 3D através da tecnologia de IoT e concluíram que tratamento e reparo de traumas articulares têm melhor desenvolvimento quando são utilizados os aparelhos impressos do que os tradicionais.

Ademais, a IoT é abordada também por Yujia Zhang *et al.*, (2022) que buscaram na telerreabilitação o tratamento para osteoartrite de joelho, com a finalidade de reduzir a dor e melhorar a qualidade de vida dos pacientes, além da telerreabilitação baseada em IoT.

Quan Zhang *et al.*, (2021) estudaram sobre a extração de dados com base na IoT, sobre os movimentos de marcha e do quadril. Para isso, utilizaram o dispositivo vestível baseado em nanogerador triboelétrico. Ainda nesse estudo, os autores chegaram à conclusão que a reabilitação de membros inferiores por meio de um robô e jogos possuem potencial para utilização em saúde, com aplicações inteligentes baseadas em IoT. Kuo *et al.*, (2022) utilizaram a IoT para assistir o robô exoesqueleto, chamado de “*TIGER*”, usado para tratamento de membros superiores em pacientes com AVC. A IoT se faz extremamente importante para o atual tratamento de algumas patologias, se tornando um atalho tecnológico para o desenvolvimento de dispositivos inteligentes, que promovam tanto a redução dos custos gerais de terapias, como soluções unificadas, fortalecendo a prática fisioterapêutica (ZHANG *et al.*, 2021).

ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados é considerada uma das ferramentas mais importantes e poderosas na indústria atualmente. Com o aumento exponencial de dados gerados por dispositivos conectados, sensores, aplicativos, redes sociais e outras fontes, a análise de dados é essencial para extrair informações valiosas, que podem ser usadas para melhorar a tomada de decisões e alcançar objetivos de negócios, obter padrões ocultos, identificar problemas de forma mais rápida e tomar medidas corretivas em tempo hábil, aumentando a eficiência e a produtividade (FERRARI, 2022).

Dessa maneira, o “*ePhysio*”, uma plataforma de gerenciamento remoto de doenças musculoesqueléticas, que faz uso de dispositivos vestíveis, a exemplo de monitores de exercícios e sensores de movimento, para extrair dados e informações em tempo real, permitindo uma melhoria na análise dos casos clínicos e melhor definição do tratamento dessas condições. O único artigo que correlacionou essa ferramenta da indústria 4.0 com a Fisioterapia, destaca igualmente a importância dessa coleta de dados precisos e confiáveis para melhorar o gerenciamento de tais patologias; possibilitando o ajuste das condutas terapêuticas de forma mais eficaz. Assim, através, principalmente, das tecnologias de análise de dados, o “*ePhysio*” pode, inclusive, fornecer aos pacientes informações sobre seus progressos, bem como oferecer o suporte remoto dos profissionais de saúde envolvidos. O artigo enfatizou que essa abordagem pode levar a melhores resultados no tratamento de doenças musculoesqueléticas, além de oferecer uma solução mais conveniente e acessível (VALLATI *et al.*, 2018).

REALIDADE VIRTUAL

A realidade virtual é bastante utilizada em conjunto com diversas outras ferramentas da quarta revolução industrial; Feick; Tang e Kruger (2022) mostraram uma interface capaz de exercer forças multidirecionais no corpo de um humano, conhecida como *HapticPuppet*: uma tecnologia que permite a transmissão de *feedback* tátil e força em tempo real entre dois dispositivos. Esse apetrecho é baseado em dispositivos de interface háptica, que são capazes de simular a sensação de toque, vibração e pressão, assim, um dispositivo pode ser usado para controlar remotamente outro, e sentir a sensação de toque e força associada a essa interação; exercendo alto potencial em realidade virtual aumentada e mista, podendo ser um diferencial nas sessões de Fisioterapia. Já Elor, Teodorescu e Kurniawan (2018) utilizaram a realidade virtual como motivador e estimulador de pacientes que fazem fisioterapia, por meio de um jogo que utiliza o *HTC Vive*, um óculos de realidade virtual, para reabilitação de membros superiores, intitulado “*Project Star Catcher*”.

Assim como a Realidade Virtual está interconectada ao desenvolvimento de diversas outras aplicações, dessa forma ela se faz presente na criação de sistemas e de produtos da Robótica avançada, contribuindo com o aumento da motivação e se tornando um estímulo interativo na recuperação de pacientes, promovendo a continuidade e adesão dos pacientes aos protocolos de Fisioterapia (ELOR; TEODORESCU e KURNI-AWAN, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do crescente desenvolvimento tecnológico proporcionado pela Indústria 4.0, a Fisioterapia tem sido uma das áreas da saúde que tem se beneficiado com essas inovações.

A partir da revisão narrativa realizada, foi possível identificar as principais tecnologias da indústria 4.0 que estão sendo utilizadas na área da fisioterapia, sendo elas: o Aprendizado de máquina, a Robótica avançada, e a Inteligência Artificial. Além disso, outras tecnologias como análise de dados, internet das coisas e realidade virtual também apresentaram aplicações na área.

Observou-se que a utilização dessas tecnologias tem permitido uma maior precisão e eficácia no tratamento fisioterapêutico, além de possibilitar um acompanhamento mais detalhado do paciente e de sua evolução. A robótica avançada, por exemplo, tem sido utilizada no desenvolvimento de dispositivos que auxiliam na reabilitação de membros inferiores e superiores. O aprendizado de máquina tem possibilitado o desenvolvimento de sistemas, permitindo, dentre outras aplicações, o monitoramento em tempo real da evolução do paciente, bem como a personalização do tratamento de acordo com suas necessidades individuais.

Contudo, foi constatado que algumas tecnologias da Indústria 4.0 ainda não foram amplamente exploradas na Fisioterapia, como a ciência de dados, *big data* e impressão 3D. Essas tecnologias possuem um enorme potencial para aprimorar ainda mais o tratamento fisioterapêutico, e espera-se que façam parte de estudos futuros, buscando elucidar seus desenvolvimentos e benefícios.

Uma lacuna encontrada nesse estudo é a falta de concordância na definição de conceitos relacionados à Indústria 4.0, evidenciada na alternância da descrição das tecnologias, processos e ferramentas utilizadas, fator comum nas ciências da computação, que possui diversas vertentes relacionadas. Assim, propõe-se o desenvolvimento de estudos mais aprofundados e consistentes, que considerem as diferentes perspectivas e abordagens utilizadas pelos autores envolvidos, de forma a chegar a uma definição mais ampla e abrangente dos conceitos da Indústria 4.0.

Dessa forma, é possível concluir que a utilização das tecnologias da Indústria 4.0 tem se mostrado uma grande aliada na busca por tratamentos mais eficazes e personalizados na Fisioterapia, promovendo a crença de que ainda há espaço para uma enorme gama de ideias a serem exploradas, diante dos notáveis avanços que essas tecnologias têm proporcionado no setor.

REFERÊNCIAS

- ABDOLLAHI, M. et al. Using a Motion Sensor to Categorize Nonspecific Low Back Pain Patients: A Machine Learning Approach. **Sensors (Basel)**. Junho. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20123600>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3600>. Acesso em: 13 out. 2022.
- ABD EL-KAFY, E. M. et al. The Effect of Robot-Mediated Virtual Reality Gaming on Upper Limb Spasticity Post-stroke: A Randomized-Controlled Trial. **Games Health J.** V. 11, n. 2, p. 93-103, 2022. DOI: [10.1089/g4h.2021.0197](https://doi.org/10.1089/g4h.2021.0197). Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35100025/>. Acesso em: 15 out 2022.
- ALBANESE, G. A. Efficacy of wrist robot-aided orthopedic rehabilitation: a randomized controlled trial. **J Neuroeng Rehabil.** V. 18, n. 1, 2018. DOI: [10.1186/s12984-021-00925-0](https://doi.org/10.1186/s12984-021-00925-0). Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34465356/>. Acesso em: 22 set 2022.
- ALFAKIR, A. et al. Detection of Low Back Physiotherapy Exercises With Inertial Sensors and Machine Learning: Algorithm Development and Validation. **JMIR Publications.** v. 9, n. 3, julho-setembro. 2022. DOI: <https://doi.org/10.2196/38689>. Disponível em: <https://rehab.jmir.org/2022/3/e38689>. Acesso em: 08 ago. 2022.
- ARROWSMITH, C. et al. Physiotherapy Exercise Classification with Single-Camera Pose Detection and Machine Learning. **Sensors.** v. 23, n. 1, dezembro. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23010363>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/1/363>. Acesso em: 05 jan 2023.
- AN, S. et al. Deep Learning Enabled Neck Motion Detection Using a Triboelectric Nanogenerator. **ACS Nano.** Washington, D.C, v. 28, n. 16, p. 9359-9367, junho. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c02149>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.2c02149>. Acesso em: 08 ago 2022.

- BAMDAD, M., MOKRI, C., ABOLGHAEMI, V. Joint mechanical properties estimation with a novel EMG-based knee rehabilitation robot: A machine learning approach. **Med Eng Phys.** 2022. DOI: 10.1016/j.medengphy.2022.103933. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36509665/>. Acesso em: 10 dez 2022.
- BENNEL, K. L. et al. Physiotherapists and patients report positive experiences overall with telehealth during the COVID-19 pandemic: a mixed-methods study. **Journal of Physiotherapy.** V. 67, ed. 3, p. 201-209. Julho, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphys.2021.06.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1836955321000527?via%3Dihub>. Acesso em: 25 ago 2022.
- BENNET, T.; KUMAR, P.; GARATE, V. R. A Machine Learning Model for Predicting Sit-to-Stand Trajectories of People with and without Stroke: Towards Adaptive Robotic Assistance. **Sensors (Basel).** Junho. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22134789>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/13/4789>. Acesso em 24 ago 2022.
- BERGMANN, J. et al. Virtual reality to augment robot-assisted gait training in non-ambulatory patients with a subacute stroke: a pilot randomized controlled trial. **Eur J Phys Rehabil Med.** V. 54, n. 3, p. 397-407, 2018. DOI: 10.23736/S1973-9087.17.04735-9. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29265791>. Acesso em: 02 dez 2022.
- BURDEA, G. et al. Assistive game controller for artificial intelligence-enhanced telerehabilitation post-stroke. **Assist Technol.** P. 117-128. Maio, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10400435.2019.1593260>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10400435.2019.1593260>. Acesso em: 04 jul 2022.
- CAMPAGNINI, S. et al. Cross-Validation of Machine Learning Models for the Functional Outcome Prediction after Post-Stroke Robot-Assisted Rehabilitation. **Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.** Nova Jersey, p. 4950-4953, julho. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/embc48229.2022.9870893>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9870893/>. Acesso em: 02 fev 2023.
- CARDOSO, N. L. S. et al. Development and validation of a web application for physiotherapy management in the trauma-orthopedics área. **Research, Society and Development.** V. 12, n. 1, p. e27012139773, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i1.39773>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/39773>. Acesso em 03 mar 2023.
- CAVALCANTE Z.; LUIS, M.; DA SILVA, S. A IMPORTÂNCIA DA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL NO MUNDO DA TECNOLOGIA. [S.l.:s.n.],2011. Disponível em: https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2011/wp-content/uploads/sites/86/2016/07/zedequias_vieira_cavalcante2.pdf.
- CHACON, D. A. et al. SpinalLog: Visuo-Haptic Feedback in Musculoskeletal Manipulation Training. **TEI '19: Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction.** P. 5-14. Março, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1145/3294109.3295626>. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3294109.3295626>. Acesso em: 02 fev 2022.
- CHANG, M. et al. AI Therapist Realizing Expert Verbal Cues for Effective Robot-Assisted Gait Training. **IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.** V. 28, n. 12, p. 2805-2815, 2020. DOI: 10.1109/TNSRE.2020.3038175. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9260225>. Acesso em: 03 fev 2022.
- COLEY, C. et al. PedBotHome: A Video Game-Based Robotic Ankle Device Created for Home Exercise in Children With Neurological Impairments. **Pediatr Phys Ther.** V. 34, n. 2, p. 212-219, 2021. DOI: 10.1097/PEP.0000000000000881. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35385456/#:~:text=PedBotHome%20is%20a%20robotic%20ankle,were%20measured%20pre%2D%20and%20posttrial>. Acesso em: 08 set 2022.
- COVACIU, F., PISLA, A., IORDAN, A. E. Development of a Virtual Reality Simulator for an Intelligent Robotic System Used in Ankle Rehabilitation. **Sensors (Basel).** V. 21, n. 4, 2021. DOI: 10.3390/s21041537. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7926555/>. Acesso em: 04 jun 2022.
- DE CANNIÈRE, H. et al. Wearable Monitoring and Interpretable Machine Learning Can Objectively Track Progression in Patients during Cardiac Rehabilitation. **Sensors (Basel).** Junho. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20123601>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3601>. Acesso em: 22 mar 2022.
- DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum]. **IEEE Industrial Electronics Magazine,** v. 8, n. 2, p. 56-58, jun. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/mie.2014.2312079>. Acesso em: 04 abr. 2023.
- ELOR, A.; TEODORESCU, M.; KURNIAWAN, S. Project Star Catcher: A Novel Immersive Virtual Reality Experience for Upper Limb Rehabilitation. **ACM Transactions on Accessible** <https://doi.org/10.3390/s21216948>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/21/6948>. Acesso em: 06 ago 2022.

SEBRAE. 4a revolução industrial e a indústria 4.0. [S. l.]: **Sebrae**, 2018. Disponível em: https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/sebraeaz/a-4-revolucao-industrial-e-a-industria-40,33198_0b31e751610VgnVCM1000004c00210aRCRD. Acesso em: 03 abr. 2023.

SEGAL, Y.; HADAR, O. Constructing a skeleton database and enriching it using a Generative Adversarial Network (GAN) simulator to assess human movement. **IEEE 38th International Conference on Data Engineering (ICDE)**. Cuala Lumpur, Malásia, p. 3226-3229, maio. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDE53745.2022.00304>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9835511>. Acesso em: 01 fev 2023.

SHARIFI, A. et al. Experimental and numerical diagnosis of fatigue foot using convolutional neural network. **Comput Methods Biomech Biomed Engin**. Londres, v.24, n. 16, p. 1828-1840, dezembro. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1921164>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10255842.2021.1921164>. Acesso em: 14 jan 2022.

SILVA, J. A. S. DA; MAIRINK, C. H. P. Inteligência artificial. **LIBERTAS: Revista de Ciências Sociais Aplicadas**, v. 9, n. 2, p. 64-85, 13 dez. 2019.

THIENGWITTAYAPORN, S. et al. Development of a mobile application to improve exercise accuracy and quality of life in knee osteoarthritis patients: a randomized controlled trial. **Arch Orthop Trauma Surg**. P. 729-738. Fevereiro, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00402-021-04149-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00402-021-04149-8>. Acesso em: 03 mar 2023.

TRIANAFYLLIDIS, A. et al. Computerized decision support for beneficial home-based exercise rehabilitation in patients with cardiovascular disease. **Comput Methods Programs Biomed**. Agosto, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2018.04.030>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00402-021-04149-8>. Acesso em: 24 abr 2022.

TSAI, T. C., CHIANG, M. H. A Lower Limb Rehabilitation Assistance Training Robot System Driven by an Innovative Pneumatic Artificial Muscle System. **Soft Robot**. V. 10, n. 1, p. 1-16, 2023. DOI: [10.1089/soro.2020.0216](https://doi.org/10.1089/soro.2020.0216). Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35196171/>. Acesso em: 25 mar 2023.

VALLATI, C. et al. ePhysio: A Wearables-Enabled Platform for the Remote Management of Musculoskeletal Diseases. **Sensors (Basel)**. Dezembro, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19010002>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/1/2>. Acesso em: 07 dez 2022.

VALDES, B. A. et al. Robot-Aided Upper-limb Proprioceptive Training in Three-Dimensional Space. **IEEE Int Conf Rehabil Robot**. P. 121-126, 2019. DOI: [10.1109/ICORR.2019.8779529](https://doi.org/10.1109/ICORR.2019.8779529). Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31374617/>. Acesso em 29 jan 2023.

VARGA, G; STOICU-TIVADAR, L; NICOLA, S. Serious Gaming and Artificial Intelligence in Rehabilitation of Rheumatoid Arthritis. **Stud Health Technol Inform**. P. 562-565. Junho, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3233/shti220790>. Disponível em: <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/SHTI220790>. Acesso em 28 dez 2022.

WANG, W. S. et al. Towards Data-Driven Autonomous Robot-Assisted Physical Rehabilitation Therapy. **IEEE Int Conf Rehabil Robot**. P. 34-39, 2019. DOI: [10.1109/ICORR.2019.8779555](https://doi.org/10.1109/ICORR.2019.8779555). Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31374603/>. Acesso em 02 abr 2022.

YUAN, C. J. et al. Predicting Return to Work after Cardiac Rehabilitation using Machine Learning Models. **J Rehabil Med**. janeiro. 2023. DOI: <https://doi.org/10.2340/jrm.v54.2432>. Disponível m: <https://medicaljournalssweden.se/jrm/article/view/2432>. Acesso em: 24 fev 2023.

ZHANG, D.; ZHANG, X. Rehabilitation Brace Based on the Internet of Things 3D Printing Technology in the Treatment and Repair of Joint Trauma. **J Healthc Eng**. Fevereiro, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6663892>. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/jhe/2021/6663892/>. Acesso em: 24 out 2022.

ZHANG, Q. et al. Wearable Triboelectric Sensors Enabled Gait Analysis and Waist Motion Capture for IoT-Based Smart Healthcare Applications. **Adv Sci (Weinh)**. V. 9, n. 4. fevereiro, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.202103694>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/advs.202103694>. Acesso em: 15 fev 2023.

ZHANG, Y. et al. Effects of Internet of Things-based power cycling and neuromuscular training on pain and walking ability in elderly patients with KOA: protocol for a randomized controlled trial. **Trials**. Dezembro, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13063-022-06946-x>. Disponível em: <https://trialsjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13063-022-06946-x>. Acesso em: 15 set 2022.