

Laura Foroni Braulio

# **Desenvolvimento de um Jogo S rio Baseado em Inteligência Artificial para Tratamento da Lombalgia**

Uberlândia, MG

2025

Laura Foroni Braulio

## **Desenvolvimento de um Jogo S rio Baseado em Inteligência Artificial para Tratamento da Lombalgia**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso  
da Engenharia Biomédica da Universidade  
Federal de Uberlândia - UFU - Campus Santa  
M nica, como requisito para a obten o do  
título de Gradua o em Engenharia Biom -  
dica.

Universidade Federal de Uberlândia - UFU  
Faculdade de Engenharia Elétrica - FEELT

Orientador Prof. Dr. Eduardo Naves

Uberlândia, MG

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B825 2025	<p>Braulio, Laura Foroni, 2001- Desenvolvimento de um Jogo Séri Baseado em Inteligência Artificial para Tratamento da Lombalgia [recurso eletrônico] / Laura Foroni Braulio. - 2025.</p> <p>Orientador: Eduardo Naves. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Biomédica. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia biomédica. I. Naves, Eduardo ,1976-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Biomédica. III. Título.</p> <p>CDU: 62:61</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Laura Foroni Braulio

## **Desenvolvimento de um Jogo Sérió Baseado em Inteligência Artificial para Tratamento da Lombalgia**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso da Engenharia Biomédica da Universidade Federal de Uberlândia - UFU - Campus Santa Mônica, como requisito para a obtenção do título de Graduação em Engenharia Biomédica.

Trabalho aprovado em 30 de outubro de 2025.

COMISSÃO EXAMINADORA

---

**Prof. Dr. Eduardo Naves**  
Orientador

---

**Doutoranda Júlia Tannús**  
Membro Avaliador

---

**Doutorando Danilo Rocha**  
Membro Avaliador

Uberlândia, MG  
2025



# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me fortalecer em cada etapa desta jornada e por me dar saúde, determinação e propósito para chegar até aqui.

Aos meus pais e à minha família, pelo amor incondicional, apoio constante e pelos valores que me guiaram até este momento. Mesmo nos dias mais difíceis, vocês nunca deixaram de acreditar em mim.

Ao meu namorado, pelo incentivo diário, pela paciência durante as longas horas de estudo e desenvolvimento e por ser um alicerce fundamental nesta caminhada.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado oferecendo apoio, compreensão e palavras de motivação quando mais precisei. Cada gesto de vocês fez diferença.

Ao professor Eduardo, meu orientador, pela orientação constante, por compartilhar conhecimento com ética e paciência e por acreditar neste projeto desde o início.

À Isabela, pela oportunidade de fazer parte da Reabnet e pela confiança no meu trabalho, que foi essencial para o crescimento deste projeto.

A toda a equipe da Reabnet, pelo ambiente colaborativo, pelas trocas de conhecimento e pela inspiração diária em atuar com tecnologia aplicada à saúde. Em especial, agradeço à equipe de desenvolvimento de jogos e ao Felipe, pela parceria técnica, discussões produtivas e pela amizade construída ao longo deste percurso.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero muito obrigado.

# Resumo

A lombalgia é uma das principais causas de incapacidade funcional no mundo e frequentemente está associada à baixa adesão aos programas tradicionais de reabilitação. Nesse contexto, jogos sérios têm se destacado como estratégia complementar na fisioterapia por aliarem exercício terapêutico, motivação e feedback em tempo real. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um jogo sério de baixo custo para apoio à reabilitação de lombalgia, baseado em exercícios de alongamento e interação por visão computacional. O sistema foi implementado no Unity e utiliza o MediaPipe para rastreamento corporal sem necessidade de sensores externos, operando apenas com a câmera do computador. O jogo apresenta narrativa lúdica com o tema viagens, progressão de cenários e integra mecanismos de gamificação. Foram implementados oito exercícios terapêuticos, dos quais quatro apresentaram rastreamento satisfatório e lógica funcional estável, enquanto outros quatro apresentaram limitações relacionadas a oclusões corporais e instabilidades nos landmarks das mãos. Apesar disso, o protótipo demonstrou viabilidade técnica, estabilidade operacional e potencial para engajar o usuário, contribuindo para o estímulo à prática de exercícios terapêuticos em ambiente domiciliar. Como trabalhos futuros, propõe-se aprimorar a lógica de detecção para contabilizar apenas membros relevantes ao movimento, reduzir erros de pontuação e realizar um estudo piloto com usuários reais para avaliação de usabilidade e impacto terapêutico. O sistema mostrou-se promissor como ferramenta complementar de telereabilitação e reabilitação personalizada para lombalgia.

**Palavras-chaves:** Lombalgia; Jogos Sérios; Gamificação; Visão Computacional.

# Abstract

Low back pain is one of the leading causes of functional disability worldwide and is often associated with low adherence to traditional rehabilitation programs. In this context, serious games have emerged as a complementary strategy in physiotherapy by combining therapeutic exercise, motivation, and real-time feedback. This study presents the development of a low-cost serious game designed to support the rehabilitation of low back pain through stretching exercises and interaction via computer vision. The system was implemented in Unity and uses MediaPipe for body tracking without the need for external sensors, operating solely through the computer camera. The game features a playful narrative with a travel theme, scenario progression, and integrated gamification mechanisms. Eight therapeutic exercises were implemented, four of which demonstrated satisfactory tracking and stable functional logic, while the other four presented limitations related to body occlusions and instability in hand landmarks. Despite these challenges, the prototype demonstrated technical feasibility, operational stability, and potential to engage the user, contributing to the stimulation of therapeutic exercise practice in home environments. Future work includes improving the detection logic to count only relevant body segments for each movement, reducing scoring errors, and conducting a pilot study with real users to assess usability and therapeutic impact. The system proved to be a promising complementary tool for telerehabilitation and personalized rehabilitation for low back pain.

**Keywords:** Low Back Pain; Serious Game; Gamification; Computer Vision.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Pontos (landmarks) do modelo MediaPipe . . . . .	20
Figura 2 – Telas de interação com o usuário. . . . .	22
Figura 3 – Cenários do jogo de acordo com cada exercício. . . . .	23
Figura 4 – Telas de jogo com teste experimental. . . . .	24

# Lista de abreviaturas e siglas

API	Interface de programação de aplicações
D	Direito
E	Esquerdo
SUS	Escala de usabilidade do sistema
UEQ	Questionário de experiência do usuário
UI	Interface do Usuário
YLDs	Anos vividos com incapacidade

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativas</b>	<b>11</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>12</b>
1.2.1	Objetivos Específicos	12
<b>2</b>	<b>REFERENCIAIS TEÓRICOS</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Lombalgia: Impacto e Limitações Funcionais</b>	<b>13</b>
2.1.1	O tratamento de lombalgia	14
2.1.2	Alongamentos como abordagem terapêutica	14
<b>2.2</b>	<b>Jogos sérios e reabilitação</b>	<b>15</b>
2.2.1	Desenvolvimento de jogos com Unity e MediaPipe	16
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Idealização e Jogabilidade</b>	<b>18</b>
<b>3.2</b>	<b>Desenvolvimento no Unity e MediaPipe</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>21</b>
<b>4.1</b>	<b>Interface de Interação com o Usuário (UI)</b>	<b>21</b>
<b>4.2</b>	<b>Interface de Jogabilidade</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>25</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>26</b>

# 1 Introdução

A lombalgia, um tipo de dor localizada na região inferior da coluna vertebral, na lombar. Um dos fatores responsáveis por desencadear a lombalgia é o encurtamento de músculos, como os isquiotibiais (MORONE et al., 2024). Como consequência, o encurtamento provoca a redução da força muscular, disfunção dos músculos e um desequilíbrio na biomecânica do ritmo lombopélvico, causando a lombalgia. Dessa forma, uma das abordagens utilizadas para o tratamento da tensão muscular são os alongamentos estáticos, que podem contribuir de forma eficaz na redução da dor e na melhora da mobilidade e do alinhamento postural. Além disso, a prática regular de alongamentos auxilia na prevenção de fases agudas da lombalgia e melhora significativamente a qualidade de vida dos pacientes (SHAMSI et al., 2020).

Apesar dos benefícios já conhecidos, a adesão e permanência no tratamento de reabilitação convencional nem sempre é simples. Além do processo monótono, onde a execução de exercícios deve ser repetida diversas vezes para alcançar o resultado esperado, muitos pacientes com lombalgia tendem a desenvolver também o medo de realizar movimentos devido à expectativa de dor (PEEBLES et al., 2022). Em função disso, muitos pacientes tendem a abandonar o processo de reabilitação, apresentando uma rigidez cada vez maior em realizar até mesmo movimentos simples do dia a dia.

Dessa forma, é fundamental que, em conjunto com o tratamento convencional, sejam adotadas estratégias para aumentar o engajamento dos pacientes, como a utilização de jogos sérios. Esse tipo de ferramenta consiste em criar um ambiente interativo e imersivo, onde o paciente realiza exercícios enquanto joga. A gamificação da reabilitação torna o processo mais divertido, terapêutico e promove o aumento da adesão dos pacientes, além de ser uma alternativa eficaz para combater a evitação do movimento (AFZAL et al., 2023).

Alguns estudos anteriores demonstraram resultados satisfatórios no uso de jogos sérios para apoio ao tratamento da lombalgia. O trabalho (BONNECHÈRE et al., 2013) apresentou melhorias na motivação e no acompanhamento dos pacientes, porém fez uso do sensor Kinect, o que demanda um equipamento adicional e não teve foco em exercícios de alongamento. De forma semelhante, o estudo apresentado por (MATHEVE et al., 2018) utilizou sensores posicionados nas costas dos usuários com o objetivo de aprimorar o feedback postural durante os exercícios. Embora ambos os estudos reforcem o potencial da gamificação na reabilitação, suas abordagens envolvem dispositivos específicos que podem limitar a aplicabilidade em ambientes domésticos ou em clínicas com poucos recursos, além de não explorarem diretamente a gamificação de alongamentos como proposta principal.

Além disso, os estudos pontuam questões como a segurança clínica, a falta de supervisão profissional durante a execução de jogos, pode aumentar o risco de execução incorreta e compensações musculares, o que pode reduzir a eficácia terapêutica e até causar desconforto adicional.

Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um jogo sério voltado à reabilitação de pessoas com lombalgia, utilizando a gamificação de exercícios de alongamento. O jogo foi desenvolvido com foco na acessibilidade e usabilidade, não necessitando de sensores ou elementos externos a um computador para seu uso. Dessa forma, o paciente poderá interagir com a interface de forma simples, garantindo uma experiência interativa, segura e eficiente. Com uma temática envolvente e estimulante, e exercícios de alongamento parte do processo fisioterapêutico já consolidado, é possível oferecer uma ferramenta complementar de baixo custo e alto potencial de engajamento, capaz de prevenir e ser uma das etapas do tratamento da lombalgia.

## 1.1 Justificativas

A lombalgia afeta cerca de 500 milhões de indivíduos no mundo todo. A estimativa é de que qualquer pessoa pode ter dor na lombar e que a maioria delas vai experimentar a condição pelo menos uma vez na vida, contudo, o pico dos casos normalmente está associado a pessoas com mais de 50 anos e mulheres, podendo se tornar mais recorrentes com o envelhecimento (COLLABORATORS, 2023). A lombalgia não afeta somente a qualidade de vida do indivíduo, mas é também uma das principais causas da perda de produtividade e, consequentemente, afastamentos do trabalho. Segundo dados de 2024 do ministério da previdência social, mais de 205 mil pessoas obtiveram benefícios concedidos por incapacidade laboral no Brasil devido a dores de coluna (SOCIAL, 2024).

A implementação de realidade virtual em contextos fisioterapêuticos ainda é pouco explorada, alguns dos sistemas necessitam de dispositivos externos ao jogo para funcionar, como sensores vestíveis, plataforma de força ou câmeras específicas, limitando o acesso e dificultando seu uso (MEINKE et al., 2022). Devido a isso, o desenvolvimento de sistemas que atuam de forma independente, apenas com o uso de um computador, ganham notoriedade por serem fáceis de usar e mais baratos, facilitando a sua implementação.

Em função disso, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um jogo com o foco no desenvolvimento de exercícios de alongamento para reabilitação de pessoas com lombalgia, utilizando apenas a câmera de um computador, celular ou tablet. O jogo tem como objetivo aliar fundamentação científica, tecnologia acessível e estratégias de engajamento para ampliar o alcance e a efetividade do tratamento de lombalgia, beneficiando os profissionais da saúde e pacientes acometidos.



## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um jogo sério, baseado em Visão Computacional, como ferramenta de apoio à reabilitação de pessoas com lombalgia, utilizando exercícios de alongamento baseados em evidências científicas, visando aumentar a adesão ao tratamento e promover melhora funcional.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- Realizar revisão da literatura para identificar os principais exercícios de alongamento indicados para a reabilitação e prevenção da lombalgia;
- Elaborar a ideação do projeto, definindo temáticas e mecânicas de jogabilidade que favoreçam o interesse e engajamento do paciente;
- Definir requisitos funcionais do sistema necessários para o funcionamento do jogo;
- Implementar ambiente virtual interativo e implementar a lógica funcional do jogo.

## 2 Referenciais Teóricos

### 2.1 Lombalgia: Impacto e Limitações Funcionais

A lombalgia é uma das condições musculoesqueléticas mais prevalentes e incapacitantes no mundo, estando entre as principais causas de anos vividos com incapacidade (YLDs) em diferentes faixas etárias e contextos socioeconômicos. Dados recentes do Global Burden of Disease 2021 apontam a dor lombar como a principal causa de incapacidade global, com projeções de aumento do número absoluto de casos até 2050, impulsionadas pelo envelhecimento populacional e crescimento demográfico (COLLABORATORS, 2023).

No contexto de países de baixa e média renda, o impacto clínico e econômico é extremamente significativo. Na revisão sistemática de Fatoye (FATOYE et al., 2023), que abrange países da América Latina, África e Ásia, vemos que a lombalgia representa uma alta parcela das hospitalizações, cerca de 13,4-19,7%, gerando custos expressivos com estimativas agregadas de US\$ 2.2 bilhões/ano por população. Os autores concluem que a condição está relacionada a consequências negativas para indivíduos, sistemas de saúde e a sociedade em um contexto geral, enfatizando a necessidade de estratégias de prevenção para reduzir os impactos da lombalgia.

Considerando o cenário brasileiro, análises da Pesquisa Nacional de Saúde (PNS-2013) mostram que 18,5% dos adultos possuem dor crônica na coluna, com prevalência maior entre mulheres (cerca de 21,1%) do que em homens (15,5%). O estudo identificou múltiplos fatores associados, como: idade mais avançada, baixa escolaridade; trabalho fisicamente pesado; tabagismo; obesidade e comorbidades como hipertensão e hipercolesterolemia. Em termos sociais, os autores destacam que a dor crônica na coluna limita atividades cotidianas, diminui a produtividade, estimula o absenteísmo e gera aumento de gastos previdenciários (MALTA et al., 2017).

Em função disso, o impacto laboral da lombalgia é evidenciado também por estudos populacionais. O trabalho de Hagen, com base em registros do seguro nacional da Noruega, que abrange 90% dos funcionários do país, estima a incidência anual de 2,27% de afastamentos por lombalgia, com média de 43 dias de ausência. Aproximadamente 35% retornaram ao trabalho em 1 mês, 70% em 3 meses e 85% em 6 meses, porém, entre os que ainda estavam afastados após 6 meses, 42% permaneceram fora do trabalho após 12 meses, migrando para benefícios por incapacidade permanente ou formas equivalentes de compensação. Esses dados ilustram a transição do absenteísmo para incapacidades duradouras, com impactos diretos em produtividade e custos sociais (HAGEN; THUNE, 1998).

Sendo assim, o desenvolvimento de soluções que aumentem a adesão ao tratamento e promovam melhora do desempenho funcional de pacientes com lombalgia torna-se essencial para atenuar os impactos negativos associados à condição. A alta prevalência, as limitações funcionais e o absenteísmo prolongado são fatores determinantes que explicam a posição da lombalgia entre as principais causas de YLDs, evidenciando a necessidade de intervenções que preservem a função, reduzam a incapacidade e favoreçam o retorno às atividades diárias (COLLABORATORS, 2023).

### 2.1.1 O tratamento de lombalgia

O processo de reabilitação de lombalgia é estruturado de forma progressiva, centrado em estratégias ativas e educativas. Em um primeiro momento, é necessária uma avaliação clínica detalhada, a fim de identificar fatores psicossociais (como cinesiofobia, catastrofização e crenças limitantes) e fatores ocupacionais. A partir disso, o tratamento se baseia em intervenções não farmacológicas, priorizando a educação do paciente e o retorno às atividades e exercícios terapêuticos, reservando abordagens farmacológicas e invasivas para casos específicos (CORP et al., 2021) (HUANG et al., 2020).

O protocolo foca em exercícios adaptados às capacidades e preferências do paciente, podendo incluir alongamentos, fortalecimento da musculatura, treino de controle motor e atividades aeróbicas leves, os quais devem ser aplicados de forma progressiva e supervisionada. A evolução do tratamento é monitorada periodicamente, permitindo ajustar intensidade, frequência e tipo de exercício conforme a resposta funcional. Essa abordagem integrada que combina educação, exercício, suporte psicossocial e adaptação contínua, busca restaurar a função, reduzir a incapacidade e promover o retorno seguro às atividades diárias e laborais (CORP et al., 2021).

### 2.1.2 Alongamentos como abordagem terapêutica

Alongamento é uma das estratégias que pode ser usada para reduzir dor, melhorar mobilidade e otimizar o controle postural de pessoas com lombalgias, especialmente quando há encurtamento de isquiotibiais e alterações do ritmo lombo-pélvico. Evidências clínicas do ensaio randomizado de Shamsi indicaram que o alongamento estático associado ao cuidado convencional (educação postural, termoterapia e exercícios gerais de mobilidade) melhorou de forma significativa o equilíbrio dinâmico quando comparado ao grupo controle e a um protocolo de fortalecimento em posição alongada (SHAMSI et al., 2020). A prática de alongamentos leva a redução do encurtamento de isquiotibiais, da retroversão pélvica e redução da lordose lombar, impactando diretamente na estabilidade e controle motor, favorecendo tarefas funcionais que exigem mobilidade e equilíbrio e diminuindo as dores provenientes da lombar (GOU et al., 2024).

Complementarmente, um ensaio clínico randomizado com 100 participantes com lombalgia crônica comparou alongamentos autoaplicados (programa domiciliar) com exercícios de controle motor e observou efeitos muito semelhantes entre os grupos para dor, incapacidade, medo/evitação, percepção global de melhora e flexibilidade. Dado que exercícios de controle motor são uma intervenção já estabelecida, os autores concluem que qualquer uma das duas opções pode ser recomendada, devendo a escolha considerar preferência do paciente e contexto de cuidado (TURCI et al., 2023). Do ponto de vista prático, esses resultados demonstram que o alongamento é uma estratégia válida para a reabilitação de lombalgia, a fim de restaurar mobilidade e equilíbrio em pacientes com encurtamentos específicos.

## 2.2 Jogos sérios e reabilitação

Jogos sérios são aplicações digitais projetadas com propósitos além do entretenimento, integrando mecânicas de jogo a objetivos terapêuticos. Na reabilitação musculoesquelética, eles são empregados para guiar exercícios, fornecer feedback em tempo real e aumentar adesão e motivação por meio de elementos de gamificação ou realidade virtual. Além do componente lúdico, os jogos sérios permitem padronizar tarefas, registrar métricas objetivas, como tempo de execução, repetições e pontuação, além de viabilizar o uso domiciliar, através da telereabilitação, com potencial de reduzir custos e ampliar acesso ao cuidado (LOHSE et al., 2013).

Na literatura, três formatos de jogos sérios são predominantes. Existem as soluções que usam câmeras específicas ou sensores de movimento (como Kinect) para mapear gestos e traduzir o movimento do corpo em ações no jogo, são frequentes em clínicas e uso domiciliar, pelo baixo custo e facilidade de implantação. De acordo com as revisões, é possível identificar uma melhora da dor e da função, se comparada a cuidados usuais, devido a resposta visual imediato e a estrutura lúdica que favorece a prática. (SATO et al., 2021). Para lombalgia, jogos que oferecem feedback de tronco e tarefas graduadas mostraram boa aceitabilidade e ganhos de controle postural em estudos piloto (PEEBLES et al., 2022).

Outra opção são os ambientes imersivos através do uso de óculos de realidade virtual, permitindo distração da dor e treino de tarefa funcionais com alta presença. Sínteses recentes apontam sinais de eficácia para dor, função e engajamento, especialmente quando há progressão de desafio e recompensa. Apesar dos benefícios, o custo de implementação se torna significativamente mais alto, comprometendo a facilidade de acesso, além de apresentar efeitos adversos como cinetose e risco de quedas (DEVORSKI et al., 2025) (MACINTYRE et al., 2023).

Por fim, existem os jogos digitais com visão computacional, que dispensam sensores

externos e operam através da câmera do computador ou tablet. Esse tipo de tecnologia conta com feedback em tempo real das poses do jogador e garante resultados positivos em relação a melhora da dor, engajamento e desempenho do paciente. Revisões recentes sugerem esse caminho como o mais promissor para ampliar alcance e reduzir barreiras de custo (DEVORSKI et al., 2025) (SATO et al., 2021).

Em 2024, Zhang (ZHANG et al., 2024) apresentou um sistema que integra MediaPipe e YOLOv5 para avaliar a amplitude de movimento de coluna e ombro, para isso desenvolveram um minijogo como estratégia lúdica auxiliar de treinamento. O trabalho mostra viabilidade de exergame que utiliza apenas uma câmera comum com métricas de movimento. Ademais, Gonçalves (GONÇALVES et al., ) relatou o desenvolvimento de jogos sérios para reabilitação da coluna vertebral para uso domiciliar, comparando OpenPose/MediaPipe com o Kinect para análise postural. Os autores descrevem o pipeline de visão computacional, a integração ao gameplay e a estimativa de erros angulares articulares, sustentando a viabilidade de monitorar e guiar exercícios usando apenas câmera e algoritmos de pose estimation.

## 2.2.1 Desenvolvimento de jogos com Unity e MediaPipe

O Unity consolidou-se como uma das principais plataformas para desenvolvimento de jogos sérios e aplicações imersivas em saúde por combinar multiplataforma, rápida prototipagem e um ecossistema robusto de UI e animação, além de ampla comunidade e suporte para diversas bibliotecas e pacotes. Na prática, isso permite transformar objetivos clínicos em mecânicas de jogo de forma simplificada. Em 2023, pesquisadores utilizaram Unity para construir e avaliar uma intervenção gamificada em saúde mental, mostrando como o motor facilita a integração de conteúdos terapêuticos, gestão de cenas e a telemetria de uso, componentes essenciais quando se busca escalabilidade e avaliação de eficácia em ambiente real (RAHMANI-KATIGARI; MOHAMMADIAN; SHAHMORADI, 2023). De forma complementar, o estudo de Rahani empregou Unity para simular cenários controlados e modular estímulos (intensidade, duração, tarefas), destacando a capacidade do motor de controlar parâmetros com precisão e padronizar sessões, características decisivas em protocolos de reabilitação (RAHANI; VARD; NAJAFI, 2018).

O MediaPipe é um framework de percepção multimodal voltado a inferência em tempo real e on-device, com pipelines otimizados para baixa latência e uso em várias plataformas. Na reabilitação, o componente Pose Landmarker permite detectar marcos corporais (landmarks) a partir de uma câmera comum, viabilizando uma resposta imediata de postura, contagem de repetições e cálculo de ângulos articulares. O guia oficial descreve saídas em coordenadas 2D e 3D (world), além de pontuações de confiança para cada landmark, o que é útil para filtros de estabilidade e lógicas de validação em jogos sérios (Google AI Edge, 2025).

Estudos experimentais mostram que soluções baseadas em MediaPipe conseguem rastrear movimento humano com boa fidelidade para tarefas clínicas e de exercício, desde que respeitadas condições de captura e que se adote pós-processamento (suavização, histerese, limiares de confiança). Por exemplo, Dill (DILL et al., 2024) propõem uma estratégia para reconstrução 3D combinando MediaPipe Pose (2D) com estéreo e fusão sem calibração prévia, avaliando exercícios físicos e a capacidade do sistema de reconhecer erros de execução. Dessa forma, os autores reportam que a abordagem atinge erro suficientemente baixo para a finalidade de análise de desempenho e uma resposta satisfatória.

Em tarefas de mão/membro superior, Meng apresenta um modelo de monitoramento de gestos em tempo real, capaz de aprender novos gestos, baseado no ecossistema MediaPipe. O trabalho mostra que, a partir dos landmarks extraídos pelo pipeline, é possível normalizar, combinar e classificar padrões com bons resultados, reforçando o papel do MediaPipe como uma boa ferramenta para controles de jogo (MENG et al., 2024).

Sendo assim, a integração entre Unity e MediaPipe já foi comprovada em sistemas práticos, como o projeto Air Canvas, que utiliza o MediaPipe para rastreamento de mãos em tempo real e faz a interface com o ambiente 3D no Unity para permitir desenho gestual no espaço. Esse exemplo demonstra que é tecnicamente viável usar câmeras comuns, o pipeline de estimativa de pose do MediaPipe e o motor gráfico do Unity de forma a atingir os resultados esperados. O Unity oferece a estrutura de cenas, lógica de jogo, interface e gráficos, enquanto o MediaPipe fornece os dados de pose que orientam o feedback e a validação dos exercícios, formando uma arquitetura funcional completa que suporta jogos interativos e o mapeamento dos movimentos (AHIRE et al., 2025).

## 3 Metodologia

### 3.1 Idealização e Jogabilidade

O estudo em questão teve como objetivo elaborar um protótipo de jogo sério para apoio à reabilitação de pacientes com lombalgia, explorando a gamificação de exercícios de alongamento como estratégia para aumentar o engajamento e a adesão ao tratamento. Dessa forma, o primeiro passo da pesquisa consistiu em fazer uma revisão bibliográfica para identificar causas e consequências da lombalgia, entender as etapas do tratamento e os exercícios de alongamento recomendados. Com as informações reunidas, foi possível discutir com um fisioterapeuta especialista as abordagens identificadas, e assim, montar o protocolo de reabilitação do jogo, que incluiu seis exercícios de alongamento estáticos, com movimentos bilaterais e unilaterais, sendo eles: cadeia posterior; alongamento superior em pé; alongamento quadríceps direito e esquerdo; alongamento extensor de quadril direito e esquerdo; inclinação lateral de tronco direito e esquerdo e inclinação lateral cervical direito e esquerdo. A escolha dos exercícios se baseia em diminuir o encurtamento dos músculos, principalmente aqueles associados a coluna, pelve e coxas, a fim de recuperar o equilíbrio biomecânico.

A etapa de idealização do protótipo consistiu em estabelecer o tema, os requisitos iniciais de jogabilidade, interface e mecânicas de engajamento, de forma a alinhar o protocolo escolhido com os elementos de gamificação, tornando a prática mais atrativa e interativa. Sendo assim, a escolha do tema foi “Viagem” por estar associada a experiência relaxante que é viajar e sendo compatível com a prática de alongamentos. Além disso, o tema facilita o engajamento através da identificação e familiaridade para com o usuário, visto que viajar é uma experiência palpável e universal.

Diante disso, a dinâmica de jogabilidade foi elaborada pensando em estimular o jogador, de forma a gerar curiosidade e desafio ao longo da prática dos exercícios. Iniciando em um ambiente convencional de reabilitação, o cenário evolui gradualmente para um destino turístico à medida que o paciente executa os movimentos corretamente, contabilizando pontos de acordo com a performance. O jogo foi desenvolvido de forma que cada exercício representasse uma viagem a um destino diferente, motivando o usuário a executar a prática a fim de finalizar o cenário, gerando uma recompensa visual pelo desempenho e avanço no tratamento. Sendo assim, a escolha desses elementos garante que a experiência da reabilitação seja mais leve, divertida e instigante, aumentando a adesão de pacientes ao processo e diminuindo os episódios de evitação do movimento.

## 3.2 Desenvolvimento no Unity e MediaPipe

O protótipo foi desenvolvido predominantemente na linguagem C# na plataforma Unity, uma engine de criação de jogos que possui uma boa integração com bibliotecas de modelos de aprendizagem de máquina, como o MediaPipe. A arquitetura do jogo foi estruturada em três cenas principais, com o objetivo de separar responsabilidades, reduzir o tempo de carregamento e facilitar o gerenciamento, sendo elas: PersistentScene, MainMenu e GameScene.

A PersistentScene é a responsável pelos gestores globais e os elementos que devem permanecer ativos durante a execução do jogo. Nela foram centrados os componentes que controlam os estados globais, o armazenamento de variáveis importantes, o sistema nativo da Unity, que garante a interação entre o usuário e a interface (UI), e a tela de carregamento. Portanto, é através dessa cena que é possível ter um fluxo de jogo fluido e evitar perdas de informações importantes a medidas que as outras cenas são gerenciadas.

Já no MainMenu é onde se concentra os painéis de interface, como tela inicial, menu de exercícios, configurações e a interatividade com o usuário. Os elementos visuais dessa cena, como o design dos botões e as imagens gerais, foram criados no Adobe Photoshop, devido a necessidade de personalização e coerência com o tema. Além disso, essa cena é a responsável por gerenciar os painéis, definindo quais serão ativados ou inativados a cada clique nos botões, e os toggles de cada exercício, garantindo que múltiplos exercícios sejam selecionados e a lista seja atualizada via script. Sendo assim, essa cena garante a usabilidade, permitindo que o usuário navegue de forma interativa no jogo.

Por fim, a GameScene é a responsável pela jogabilidade em si, ou seja, desde o momento em que os dados fornecidos pelo MediaPipe são processados e interpretados, até a resposta em tempo real no jogo. Ao ser carregada, ela recebe da PersistentScene as informações definidas na MainMenu, como os exercícios selecionados e o cenário (destino da viagem) correspondente. Nessa cena, também estão concentrados os cenários, que são compostos por objetos 2D predominantemente gerados pela inteligência artificial do ChatGPT 5, devido a necessidade de imagens específicas para cada um dos destinos. Além disso, é no GameScene que está a dinâmica de jogabilidade, construída via script de forma a garantir a montagem e desmontagem dos cenários, a lógica consiste em iniciar os objetos em -90 graus e a medida que jogador acerta a pose os objetos passam a ser 0 graus, sendo revelados na tela. Ademais, a GameScene é a responsável por contabilizar a pontuação através da comparação de pontos do modelos de poses do MediaPipe com as animações de referência criadas de cada exercício no Unity.

A lógica de execução dos exercícios foi organizada de forma a seguir um modelo progressivo e controlado de esforço, alinhado a protocolos utilizados em reabilitação fisioterapêutica. Cada exercício é configurado em 3 séries de 30 segundos de execução



contínua, intercaladas por períodos de descanso de 15 segundos, totalizando um ciclo terapêutico de 1 minuto e 45 segundos por exercício unilateral. Entretanto, no caso de exercícios bilaterais, como aqueles que trabalham lados esquerdo e direito do corpo de forma independente, o sistema foi projetado para duplicar automaticamente o ciclo de execução, garantindo equilíbrio muscular e simetria postural. Nesses casos, o exercício é realizado primeiramente para um dos lados e, em seguida, para o lado oposto, resultando em 6 séries de 30 segundos e 4 períodos de descanso, preservando o mesmo padrão de estímulo e recuperação. Essa adaptação é representada visualmente na barra de progresso e na montagem do cenário, que se ajusta para o tempo total de séries e exibe o avanço do usuário durante toda a execução, mantendo clareza do ritmo e do tempo total do exercício. Essa decisão de design reforça a fidelidade funcional do jogo ao contexto terapêutico, além de garantir que a experiência permaneça intuitiva e consistente para o usuário.

O MediaPipe Pose Landmarker conta com 33 pontos (landmarks) do corpo humano, dispostos como mostra a Figura 1, a integração ao projeto ocorreu por meio da API oficial do MediaPipe e relacionada ao jogo do Unity via código em JavaScript. A câmera do computador ou dispositivo móvel envia continuamente os frames de vídeo, que são processados em tempo real pelo modelo de detecção de pose, que retorna as coordenadas tridimensionais (x, y, z) de cada landmark do corpo humano. Após a captação das coordenadas, a posição delas é espelhada no avatar do jogo e comparadas com a animação de referência a fim de determinar se a posição do jogador está correta.

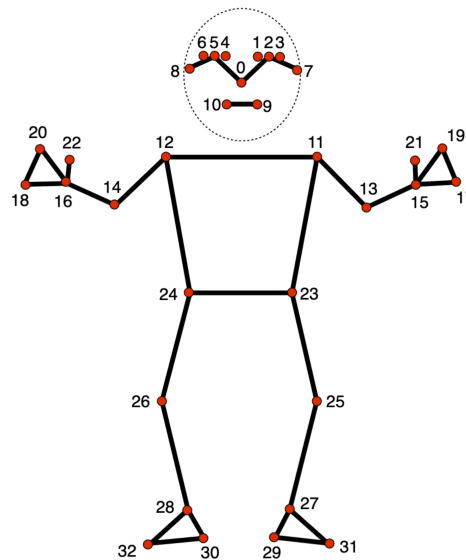


Figura 1 – Pontos (landmarks) do modelo MediaPipe

## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Interface de Interação com o Usuário (UI)

A etapa de desenvolvimento resultou em um protótipo funcional de jogo sério voltado à reabilitação de pessoas com lombalgia, implementado na engine Unity com integração à biblioteca MediaPipe para rastreamento corporal em tempo real. O sistema foi estruturado em três cenas principais, como já apresentado na metodologia, PersistentScene, Main Menu e Game Scene, que se comunicam de forma contínua por meio de scripts de gerenciamento central, assegurando a resposta do jogo ao usuário.

As interfaces de interação com o usuário foram projetadas para favorecer a simplicidade, acessibilidade e clareza das informações, aspectos fundamental para garantir a usabilidade do jogo. O menu principal permite navegar entre as opções de início e configurações, como pode ser visto na Figura 2a. Já o menu de exercícios apresenta as atividades que estão disponíveis na forma de selos dentro de um mapa, reforçando a temática de viagem e indicando o destino que cada exercício representa, a Figura 2b ilustra isso. Ao clicar em um dos selos, uma nova tela se abre em forma de cartão postal, onde é possível ver o exercício, selecioná-lo, se caso for unilateral (Fig. 2d), ou escolher entre direita, esquerda ou ambos, em caso de bilateral (Fig. 2c), cada exercício possui uma tela específica.

O jogo foi testado no modo play do próprio Unity e também após compilação para web, através da extensão Live Server. Durante os testes, todas as telas e botões responderam adequadamente, sem falhas de navegação ou travamentos. As transições entre cenas ocorreram de forma fluida e com tempo de carregamento imperceptível, o que reforça a estabilidade do sistema. A ambientação visual se manteve coerente com a proposta, criando uma experiência imersiva e leve que busca aumentar a motivação do usuário ao longo das sessões.



(a) Menu principal do jogo.



(b) Menu de exercícios.



(c) Detalhes alongamento de quadríceps.



(d) Detalhes alongamento de membros superiores em pé.

Figura 2 – Telas de interação com o usuário.

## 4.2 Interface de Jogabilidade

A interface de jogabilidade constitui o núcleo funcional do jogo, é nessa etapa onde foram implementados os componentes de interface e lógica que integram a visualização dos cenários temáticos, a barra de progresso, o ícone de referência do exercício e a lógica de pontuação associada ao desempenho do jogador. A cena se inicia no cenário base, o cenário da academia da Fig. 3a, quando o jogador acerta a execução dos movimentos, o cenário base se desmonta, sendo assim, conforme o usuário mantém a execução correta, ocorre a montagem gradual dos cenários de viagem (Fig. 3), representando visualmente o avanço do usuário em sua jornada terapêutica. Essa estrutura de progressão foi projetada para reforçar a motivação do paciente, associando feedback positivo à execução correta e à descoberta de novos ambientes virtuais, criando um ciclo de recompensa contínuo.

A partir dos testes de funcionalidade realizados, que ocorreram também no modo play do Unity e na compilação web através do Live Server, foi possível avaliar o desempenho do jogo. Como visto na Figura 3, a barra de progresso, localizada no canto superior esquerdo, se mostrou funcional, atualizando-se em tempo real conforme o sistema detecta a correção postural e o tempo de manutenção da posição. O ícone de referência localizado no canto inferior direito da tela, fornece ao jogador uma visualização estática da postura-alvo, auxiliando no alinhamento corporal e reduzindo ambiguidades durante a execução dos movimentos. Ademais, no canto superior direito é possível ver a pontuação em tempo real

sendo atualizada e o nome do exercício que está em execução. Esses elementos visuais se mostraram eficazes para orientar o usuário, uma característica essencial em sistemas de reabilitação digital.

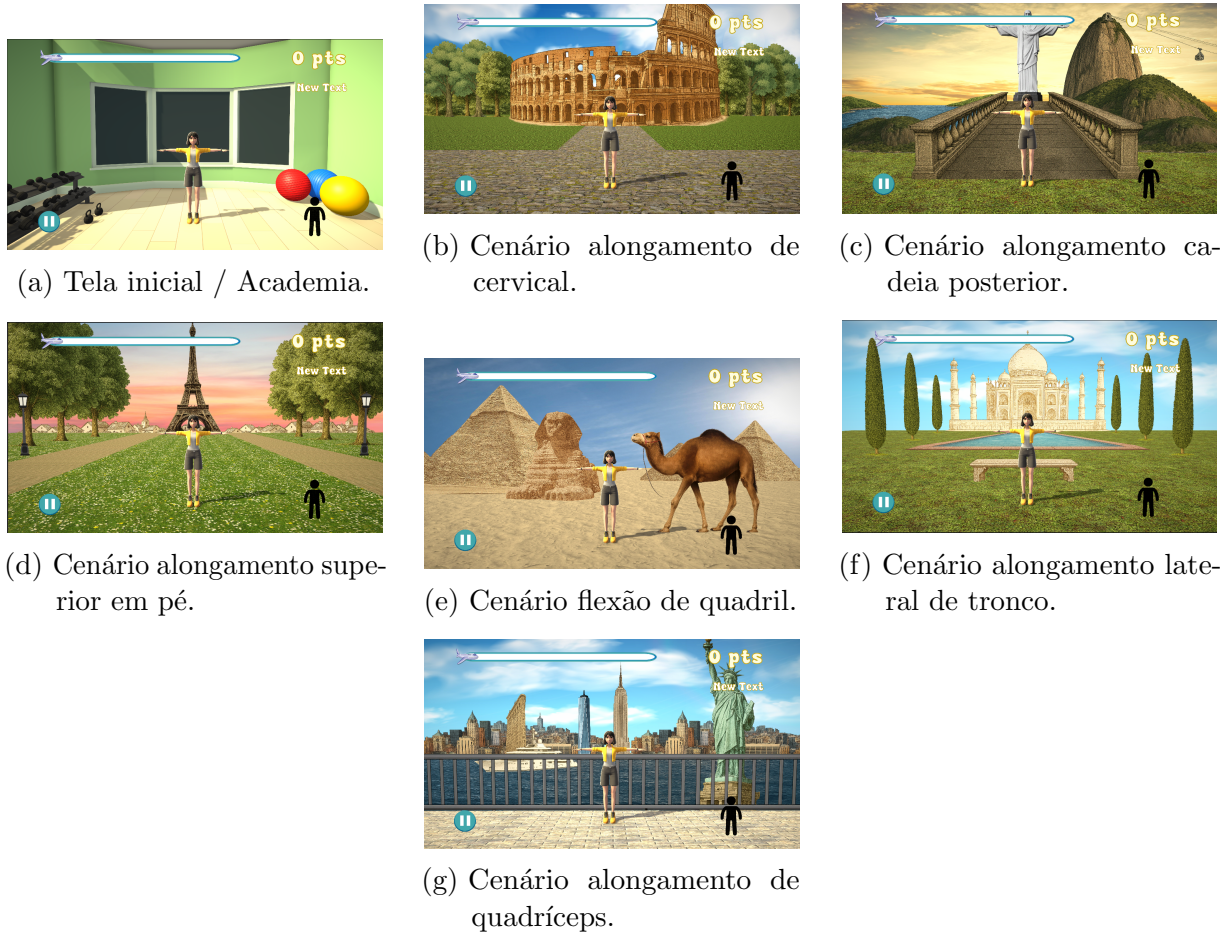


Figura 3 – Cenários do jogo de acordo com cada exercício.

Ao todo, foram testados seis exercícios, sendo eles quatro bilaterais e dois unilaterais, representando diferentes grupos musculares e movimentos de flexão e extensão. Dentre eles, quatro apresentaram desempenho satisfatório, sendo eles: alongamento cervical (D e E); alongamento posterior; flexão de quadril (D e E) e alongamento lateral de tronco (D e E). Os exercícios bem-sucedidos envolveram movimentos amplos, nos quais os landmarks corporais principais permaneceram visíveis e sem oclusões, facilitando o rastreamento preciso e resposta estável do MediaPipe. Na Figura 4 é possível em (a), (b) e (c) visualizar uma prévia dos testes realizados, sendo em (a) uma flexão de quadril esquerdo, (b) um alongamento cervical esquerdo, e (c), que representa a tela de encerramento das séries, mostrando o nome do exercício, a pontuação final e estrelas.



Figura 4 – Telas de jogo com teste experimental.

Por outro lado, dois exercícios apresentaram limitações técnicas no reconhecimento da pose, os exercícios de alongamento de quadríceps, e o cadeia posterior. Ambos envolvem sobreposição de membros, como levar a perna para trás ou tocar as pernas, resultaram em oclusões parciais, levando à confusão de pontos e à perda temporária da estimativa correta da articulação. Tais ocorrências são condizentes com a literatura sobre pose estimation, que aponta a sensibilidade do MediaPipe à posição da câmera e à iluminação, além da tendência à perda de precisão em situações de oclusão (DILL et al., 2024) (MENG et al., 2024).

Apesar dessas limitações, o desempenho geral do jogo foi satisfatório, demonstrando sincronia adequada entre interface, lógica de jogo e rastreamento corporal. O sistema respondeu bem aos comandos, exibiu feedback coerente e estável e proporcionou uma experiência imersiva e motivadora, cumprindo o objetivo de oferecer uma ferramenta acessível e funcional para apoio à reabilitação de pessoas com lombalgia.

## 5 Conclusão

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um jogo sério baseado em visão computacional como ferramenta de apoio ao processo de reabilitação de pessoas com lombalgia, utilizando exercícios de alongamento e mecanismos de gamificação para promover engajamento e adesão terapêutica. O sistema foi implementado no motor Unity com integração do MediaPipe para rastreamento corporal em tempo real, operando com câmera comum e dispensando sensores externos, o que reforça seu caráter acessível, de baixo custo e aplicável a contextos de telereabilitação.

Os resultados obtidos demonstraram que o protótipo é funcional, estável e capaz de interpretar corretamente a execução de movimentos corporais básicos, fornecendo feedback visual imediato ao usuário. A estrutura interativa proposta, composta por uma narrativa temática com progressão por cenários, mostrou-se coerente com estratégias de motivação e engajamento amplamente defendidas na literatura de jogos sérios para saúde. Entre os oito exercícios desenvolvidos, quatro apresentaram desempenho satisfatório, com rastreamento estável e lógica adequada de validação. Outros quatro revelaram limitações técnicas associadas ao rastreamento de mãos e à oclusão de membros, evidenciando desafios ainda presentes na aplicação de modelos de visão computacional.

Apesar dos resultados promissores, o sistema ainda exige aprimoramentos. A principal necessidade identificada é a implementação de uma lógica que restrinja a pontuação apenas aos membros relevantes do movimento, pois na versão atual todos os membros corporais são contabilizados simultaneamente, o que pode gerar pontuações errôneas e reduzir a acurácia da avaliação. Além disso, é necessário estudar estratégias anti-occlusão, além de expandir o conjunto de exercícios a fim de incluir um protocolo mais completo e níveis de dificuldade.

Outro passo essencial será a realização de um estudo piloto com usuários reais, envolvendo profissionais de fisioterapia, para avaliação de usabilidade, experiência do usuário e efetividade terapêutica, utilizando métricas estruturadas como SUS (System Usability Scale) (MASKELIŪNAS et al., 2022) e medidas clínicas funcionais. Esse piloto permitirá ajustar a ferramenta antes de estudos controlados maiores.

Conclui-se que o jogo desenvolvido alcançou seu objetivo principal ao demonstrar viabilidade técnica e potencial clínico como ferramenta complementar de reabilitação para lombalgia, especialmente em ambientes domiciliares. Com as melhorias propostas e validações futuras, a solução pode evoluir para um recurso tecnicamente confiável, clinicamente relevante e socialmente acessível, contribuindo para o avanço de tecnologias em saúde alinhadas à democratização do tratamento fisioterapêutico.



# Referências Bibliográficas

AFZAL, M. W. et al. Effects of virtual reality exercises on chronic low back pain: Quasi-experimental study. *JMIR Rehabil Assist Technol*, v. 10, p. e43985, set. 2023. Citado na página 10.

AHIRE, K. et al. Air canvas using media pipe for computer vision in unity 3d hand tracking. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, p. 444–448, 04 2025. Citado na página 17.

BONNECHÈRE, B. et al. Patient follow-up using serious games. a feasibility study on low back pain patients. In: *Games for Health: Proceedings of the 3rd European Conference on Gaming and Playful Interaction in Health Care*. [S.l.]: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. p. 185–195. Citado na página 10.

COLLABORATORS, G. . L. B. P. Global, regional, and national burden of low back pain, 1990–2020, its attributable risk factors, and projections to 2050: a systematic analysis of the global burden of disease study 2021. *The Lancet Rheumatology*, v. 5, n. 6, p. e316–e329, 2023. Published May 22, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 11, 13 e 14.

CORP, N. et al. Evidence-based treatment recommendations for neck and low back pain across europe: A systematic review of guidelines. *European Journal of Pain*, v. 25, n. 2, p. 275–295, 2021. Epub 2020 Nov 12. Citado na página 14.

DEVORSKI, L. et al. Gamified delivery of at-home rehabilitation for individuals with nonspecific low back pain: a randomized controlled trial. *Disability and Rehabilitation*, v. 47, n. 6, p. 1416–1422, 2025. Epub 2024 Jun 20. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

DILL, S. et al. Accuracy evaluation of 3d pose reconstruction algorithms through stereo camera information fusion for physical exercises with mediapipe pose. *Sensors*, v. 24, n. 23, p. 7772, dez. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 24.

FATOYE, F. et al. Clinical and economic burden of low back pain in low- and middle-income countries: a systematic review. *BMJ Open*, v. 13, n. 4, p. e064119, 2023. Published April 25, 2023. Citado na página 13.

GONÇALVES, R. S. et al. Development of serious games for the rehabilitation of the human vertebral spine for home care. v. 12, n. 2. Citado na página 16.

Google AI Edge. *Pose landmark detection guide (MediaPipe Pose Landmarker)*. 2025. Disponível em: <[https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/pose\\_landmarker](https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/pose_landmarker)>. Citado na página 16.

GOU, Y. et al. The effects of hamstring stretching exercises on pain intensity and function in low back pain patients: A systematic review with meta-analysis of randomized controlled trials. *SAGE Open Med*, v. 12, p. 20503121241252251, jul. 2024. Citado na página 14.

HAGEN, K. B.; THUNE, O. Work incapacity from low back pain in the general population. *Spine (Phila Pa 1976)*, v. 23, n. 19, p. 2091–2095, 1998. Published October 1, 1998. Citado na página 13.

- HUANG, R. et al. Exercise alone and exercise combined with education both prevent episodes of low back pain and related absenteeism: systematic review and network meta-analysis of randomised controlled trials (rcts) aimed at preventing back pain. *British Journal of Sports Medicine*, v. 54, n. 13, p. 766–770, 2020. Epub 2019 Oct 31. Citado na página 14.
- LOHSE, K. et al. Video games and rehabilitation: using design principles to enhance engagement in physical therapy. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, v. 37, n. 4, p. 166–175, dez. 2013. Citado na página 15.
- MACINTYRE, E. et al. Get your head in the game: A replicated single-case experimental design evaluating the effect of a novel virtual reality intervention in people with chronic low back pain. *The Journal of Pain*, v. 24, n. 8, p. 1449–1464, 2023. Epub 2023 Apr 6. Citado na página 15.
- MALTA, D. C. et al. Factors associated with chronic back pain in adults in brazil. *Revista de Saúde Pública*, v. 51, n. suppl 1, p. 9s, 2017. Published June 1, 2017. Citado na página 13.
- MASKELIŪNAS, R. et al. Evaluation of myrelief serious game for better self-management of health behaviour strategies on chronic low-back pain. *Informatics*, v. 9, n. 2, 2022. ISSN 2227-9709. Citado na página 25.
- MATHEVE, T. et al. Serious gaming to support exercise therapy for patients with chronic nonspecific low back pain: a feasibility study. *Games for Health Journal*, v. 7, n. 4, p. 262–270, 2018. Citado na página 10.
- MEINKE, A. et al. Feedback on trunk movements from an electronic game to improve postural balance in people with nonspecific low back pain: Pilot randomized controlled trial. *JMIR Serious Games*, v. 10, n. 2, p. e31685, jun. 2022. Citado na página 11.
- MENG, Y. et al. Real-time hand gesture monitoring model based on mediapipe's registerable system. *Sensors*, v. 24, n. 19, p. 6262, set. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 24.
- MORONE, G. et al. Efficacy of sensor-based training using exergaming or virtual reality in patients with chronic low back pain: A systematic review. *Sensors (Basel)*, v. 24, n. 19, p. 6269, set. 2024. Citado na página 10.
- PEEBLES, A. T. et al. A virtual reality game suite for graded rehabilitation in patients with low back pain and a high fear of movement: Within-subject comparative study. *JMIR Serious Games*, v. 10, n. 1, p. e32027, mar. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 15.
- RAHANI, V. K.; VARD, A.; NAJAFI, M. Claustrophobia game: Design and development of a new virtual reality game for treatment of claustrophobia. *Journal of Medical Signals and Sensors*, v. 8, n. 4, p. 231–237, out. 2018. Citado na página 16.
- RAHMANI-KATIGARI, M.; MOHAMMADIAN, F.; SHAHMORADI, L. Development of a serious game-based cognitive rehabilitation system for patients with brain injury. *BMC Psychiatry*, v. 23, n. 1, p. 893, nov. 2023. Citado na página 16.
- SATO, T. et al. Effects of nintendo ring fit adventure exergame on pain and psychological factors in patients with chronic low back pain. *Games for Health Journal*, v. 10, n. 3, p. 158–164, 2021. Epub 2021 Apr 22. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.



SHAMSI, M. et al. Modeling the effect of static stretching and strengthening exercise in lengthened position on balance in low back pain subject with shortened hamstring: a randomized controlled clinical trial. *BMC Musculoskelet Disord*, v. 21, n. 1, p. 809, dez. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 14.

SOCIAL, B. M. da P. *Boletim Estatístico da Previdência Social – 2024*. 2024. Relatório estatístico oficial. Disponível em: <<https://www.gov.br/previdencia/pt-br/assuntos/previdencia-social/saude-e-seguranca-do-trabalhador>>. Acesso em: 01 set. 2025. Citado na página 11.

TURCI, A. M. et al. Self-administered stretching exercises are as effective as motor control exercises for people with chronic non-specific low back pain: A randomised trial. *Journal of Physiotherapy*, v. 69, n. 1, p. 87–94, 2023. Epub ahead of print. Citado na página 15.

ZHANG, W. et al. Combined mediapipe and yolov5 range of motion assessment system for spinal diseases and frozen shoulder. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 15879, jul. 2024. Citado na página 16.