

Indução de Flow na Reabilitação Física: Design e Mecânicas do Jogo Sérioso PhysioBirds

Title: Inducing Flow in Physical Rehabilitation: Design and Mechanics of the PhysioBirds Serious Game

Brayon Lopes Silva¹, Vitor da Silva Moreira¹,
Érico Marcelo Hoff do Amaral¹, Julio Saraçol Domingues Júnior¹

¹ Grupo de Informática Médica e Microeletrônica (GIMM)
Engenharia de Computação
Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) – Bagé, RS – Brasil

{brayonsilva.aluno, vitormoreira.aluno}@unipampa.edu.br

{ericoamaral, juliiodomingues}@unipampa.edu.br

Abstract. Introduction: Motor rehabilitation for amputees often faces challenges related to patient engagement and the lack of objective clinical telemetry. Within the PhysioGames 2.0 ecosystem, PhysioBirds emerges as a gamified module designed to bridge the gap between physical exercise and digital monitoring. **Objective:** This study aims to develop and validate the PhysioBirds system, a Godot-based serious game integrated with wearable sensors, focusing on motor rehabilitation in a real clinical environment. **Methodology:** The system utilizes an ESP32 microcontrolled node with an MPU6050 inertial sensor to capture movements, sending data to a Firebase-backed web platform. Validation involved 5 male elderly patients (over 50 years old) with upper and lower limb amputations, totaling 48 sessions monitored by physiotherapists. **Results:** Quantitative analysis showed high patient adherence (7 to 13 sessions per user). Telemetry data revealed a progressive increase in physical movement over time, despite reports of high game difficulty and technical latency in sensor response. These findings validate the system's potential for clinical monitoring and patient motivation.

Keywords Serious Games, Motor Rehabilitation, Godot Engine, Amputation, Telemetry.

Resumo. Introdução: A reabilitação motora de pessoas com amputação frequentemente enfrenta desafios relacionados ao engajamento do paciente e a falta de telemetria clínica objetiva. No ecossistema PhysioGames, o PhysioBirds surge como um módulo gamificado projetado para unir o exercício físico ao monitoramento digital. **Objetivo:** Este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar o sistema PhysioBirds, um jogo sério baseado na engine Godot integrado a sensores vestíveis, com foco na reabilitação motora em ambiente clínico real. **Metodologia:** O sistema utiliza um nó sensor IoT controlado por um ESP32 com sensor inercial MPU6050 para captura de movimentos, enviando dados para uma plataforma web integrada ao Firebase. A validação envolveu 5 pacientes idosos do sexo masculino (acima de 50 anos) com amputações de membros superiores e inferiores, totalizando 48

sessões acompanhadas por fisioterapeutas. Resultados: A análise quantitativa demonstrou alta adesão dos pacientes (7 a 13 sessões por usuário). Os dados de telemetria revelaram um aumento progressivo na movimentação física ao longo do tempo, apesar de relatos de alta dificuldade no jogo e latência técnica na resposta do sensor. Os achados validam o potencial do sistema para monitoramento clínico e motivação do paciente.

Palavras-Chave Jogos Sérios, Reabilitação Motora, Engine Godot, Amputação, Telemetria

1. Introdução

A reabilitação física é um pilar fundamental para a recuperação funcional e a melhoria da qualidade de vida de pacientes que enfrentam limitações motoras, sejam elas decorrentes de traumas, procedimentos cirúrgicos complexos ou condições crônicas. No entanto, o processo de reabilitação tradicional frequentemente confronta obstáculos significativos [Silva et al. 2026]. A natureza repetitiva e o progresso gradual dos exercícios convencionais podem gerar frustração e subestimação dos benefícios do tratamento, culminando, em muitos casos, na desistência das sessões terapêuticas. Embora o uso de consoles de videogame comerciais tenha sido explorado [Shires et al. 2014], essas soluções frequentemente falham por não serem adaptadas às limitações motoras específicas de cada paciente e, principalmente, por não oferecerem telemetria clínica objetiva, o que inviabiliza o monitoramento preciso do progresso pelo fisioterapeuta.

Nesse cenário, os jogos sérios (do inglês, *serious games*) emergem como uma ferramenta estratégica, combinando elementos lúdicos e objetivos terapêuticos específicos para transformar exercícios muitas vezes monótonos em experiências interativas e imersivas. Ao integrar mecânicas de jogos com a fisioterapia, essas tecnologias promovem uma maior adesão ao tratamento, reduzindo o foco do paciente no desconforto físico ou na dor [Vogel et al. 2006] e oferecendo um *feedback* instantâneo sobre seu progresso [Sathish et al. 2025].

O presente trabalho apresenta o PhysioBirds, um novo módulo de intervenção gamificada integrado à plataforma PhysioGames. O PhysioGames já demonstrou viabilidade ao utilizar sistemas embarcados e sensores sem fio (como o NodeMCU ESP32 e o acelerômetro MPU6050) para capturar movimentos em tempo real, permitindo a personalização das terapias. Enquanto versões anteriores da plataforma focaram em jogos como AsteroidTerapia e PongTerapia, o PhysioBirds expande essa biblioteca utilizando a engine Godot para oferecer uma experiência de navegação lateral refinada e adaptada às necessidades clínicas.

O diferencial técnico e científico desta proposta reside na capacidade do sistema tentar induzir o estado de *Flow* durante as sessões de reabilitação física para pacientes com amputação, com o objetivo de aumentar a efetividade da terapia. O estado de *Flow* [Csikszentmihalyi 1990] é um estado psicológico de imersão total e equilíbrio entre desafio e habilidade. Por meio da parametrização de variáveis como o tempo de jogo, a taxa de pontos e a quantidade de movimentos, o PhysioBirds transforma conceitos abstratos em indicadores clínicos mensuráveis. Essa abordagem permite aos fisioterapeutas identificar níveis ótimos de desafio para cada indivíduo, promovendo um suporte à decisão clínica baseado em evidências coletadas via telemetria.

Este trabalho detalha o desenvolvimento do jogo sério PhysioBirds, sua arquitetura, e sua integração com o banco de dados da plataforma PhysioGames e como o *design* do jogo foi concebido para maximizar a eficácia terapêutica no processo de reabilitação física. O trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 aborda o referencial teórico sobre reabilitação física, jogos sérios e estado de *Flow*, assim como discute os trabalhos correlatos; a Seção 3 descreve a arquitetura do sistema e o processo de desenvolvimento dos elementos de jogo; e o sistema de pontuação; a Seção 4 discute os resultados preliminares e a Seção 5 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2. Referencial Teórico e Trabalhos Relacionados

2.1. Reabilitação Assistida por Tecnologia e Jogos Sérios

A demanda por terapias de adaptação exige intervenções que considerem a motivação do paciente para evitar o abandono decorrente da natureza repetitiva dos exercícios. Nesse cenário, a utilização de sistemas embarcados e sensores inerciais de baixo custo permite a captura precisa de movimentos em tempo real, transformando o esforço físico em dados digitais aplicados a *serious games* com *feedback* imediato. Os jogos sérios atuam como ambientes controlados onde o esforço terapêutico é estimulado por objetivos lúdicos, promovendo o engajamento através do equilíbrio entre desafio e habilidade, conceito fundamental para a indução do estado de *Flow* [Csikszentmihalyi 1990].

2.2. Trabalhos Relacionados

O panorama nacional reflete essa tendência de integração tecnológica. Levantamentos realizados nas publicações do SBGames revelam que a Fisioterapia é uma das áreas que mais integram jogos em suas práticas. De acordo com a análise sistemática de Santos et al. (2025) [Santos et al. 2025], os jogos com objetivos terapêuticos e de reabilitação motora predominam no cenário brasileiro, representando aproximadamente 43% dos trabalhos selecionados em um universo de 51 artigos analisados. Esse dado reforça que o uso de tecnologia para suporte ao tratamento é uma vertente consolidada e necessária para a evolução da informática em saúde.

Entretanto, a implementação dessas soluções enfrenta desafios críticos de experiência do usuário (do inglês, *User Experience (UX)*). A literatura aponta que a eficácia clínica depende de um equilíbrio sensível: interfaces com alta carga cognitiva ou *feedbacks* desconexos podem comprometer a terapia. Estudos qualitativos recentes [Confessor et al. 2025] indicam que limitações técnicas e a falta de calibração para o perfil específico do paciente são barreiras comuns que dificultam a imersão. Portanto, o *design* de sistemas como o PhysioBirds deve priorizar a simplificação da interface e a precisão na coleta de dados, visando mitigar as barreiras de engajamento identificadas em levantamentos sistemáticos da área [Santos et al. 2025].

3. PhysioBirds

3.1. Design Visual e Modelagem Centrada no Usuário

A concepção visual do PhysioBirds foi desenvolvida sob a premissa fundamental de que a interface de um jogo sério voltado à saúde deve ser, simultaneamente, atraente e funcional, priorizando a usabilidade em detrimento de uma complexidade estética que possa gerar

sobrecarga sensorial. Essa preocupação é central para evitar a fadiga cognitiva ou o desengajamento precoce, especialmente considerando o perfil dos usuários envolvidos nos testes clínicos: majoritariamente pessoas com idade acima de 50 anos. Para a criação dos ativos gráficos, utilizou-se a ferramenta Piskel (versão web), um editor especializado em Pixel Art que permite o controle minucioso da resolução e da paleta de cores. A escolha por essa estética fundamenta-se na necessidade de fornecer formas claras e facilmente distinguíveis, o que é vital para pacientes que podem apresentar variados níveis de sensibilidade ao contraste e percepção visual reduzida devido à idade ou condições clínicas.

Um dos maiores diferenciais de identidade visual do projeto é o personagem protagonista, um pássaro Quero-quero (*Vanellus chilensis*), ave símbolo da região do Pampa onde está inserida o uso da solução. A escolha deste personagem, apresentada na Figura 1, busca criar uma conexão cultural e de pertencimento com o paciente. O *sprite* original do pássaro foi adaptado a partir de um *asset* gratuito, passando por um processo de redesenho e alteração cromática para representar fielmente a anatomia do Quero-quero. Esse processo de adaptação estendeu-se a outros elementos, como nuvens e pombos, que foram submetidos a uma repintura completa para garantir a coesão estética e o alto contraste necessário em relação ao cenário de fundo. O ambiente consiste em um céu dinâmico que transiciona em um *loop* entre tonalidades de azul, rosa e roxo; para evitar a confusão visual, a paleta dos objetos interativos foi selecionada para manter-se sempre distinguível em qualquer fase do ciclo do fundo.

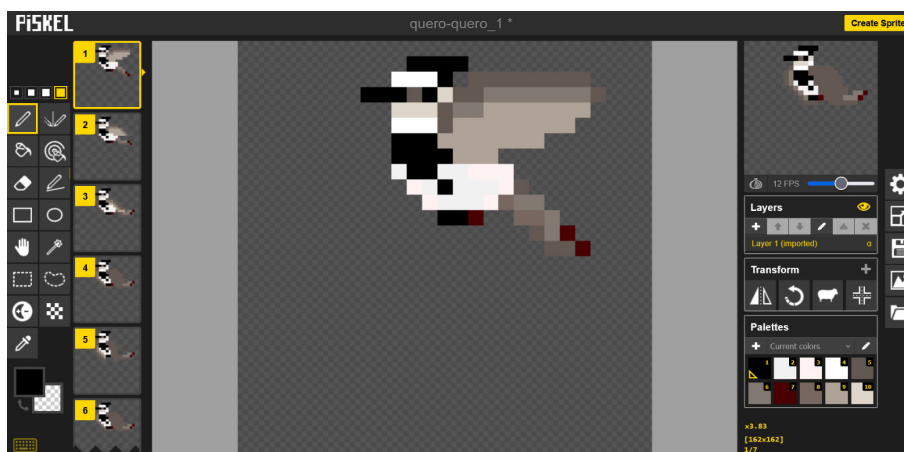


Figura 1. Interface da ferramenta Piskel utilizada para a criação e animação do protagonista Quero-quero.

A profundidade visual é conferida por meio de um sistema de paralaxe (*parallax*), implementado no motor Godot para criar um deslocamento diferenciado entre as camadas de nuvens e o cenário. Ciente dos riscos de cinetose (enjoo induzido pelo movimento), a complexidade desse efeito foi deliberadamente limitada, mantendo um movimento fluido, porém suave, para garantir o conforto do paciente durante a execução dos exercícios [Confessor et al. 2025], visando a manutenção do estado de *Flow* [Csikszentmihalyi 1990]. Complementando essa funcionalidade, o sistema de *feedback* foi projetado para ser direto: o jogo não utiliza barras de vida progressivas. Qualquer colisão com obstáculos resulta no término imediato da sessão, atuando como um indicador robusto de que o limite de precisão motora ou de atenção foi atingido. Essa lógica

elimina ambiguidades na telemetria e, embora possa gerar frustração inicial, esse aspecto é mitigado clinicamente pelo suporte verbal contínuo do fisioterapeuta, que atua mediando a sessão e ajustando os níveis conforme a tolerância do paciente.

3.2. Mecânicas de Gameplay e Sistema de Controle Híbrido

A dinâmica de jogabilidade do PhysioBirds é estruturada como uma intervenção assistida, onde o profissional de fisioterapia atua como o mediador técnico e clínico do sistema. Antes de iniciar o exercício, o terapeuta interage com uma interface de configuração, exemplificada na Figura 2, para definir variáveis críticas: a seleção do módulo de jogo, o nível de desafio inicial e o método de entrada dos comandos (teclado convencional ou sensor inercial). Essa triagem inicial é um requisito fundamental para mitigar a inconsistência na adesão e a falta de supervisão profissional contínua, desafios apontados como barreiras significativas na literatura de jogos para saúde. Ao optar pelo modo "Sensor", o motor Godot isola as entradas de periféricos padrão, assegurando que toda a telemetria enviada ao jogo e ao final da sessão ao Firebase, corresponda exclusivamente ao esforço motor do usuário, preservando a integridade dos dados para o suporte à decisão clínica.

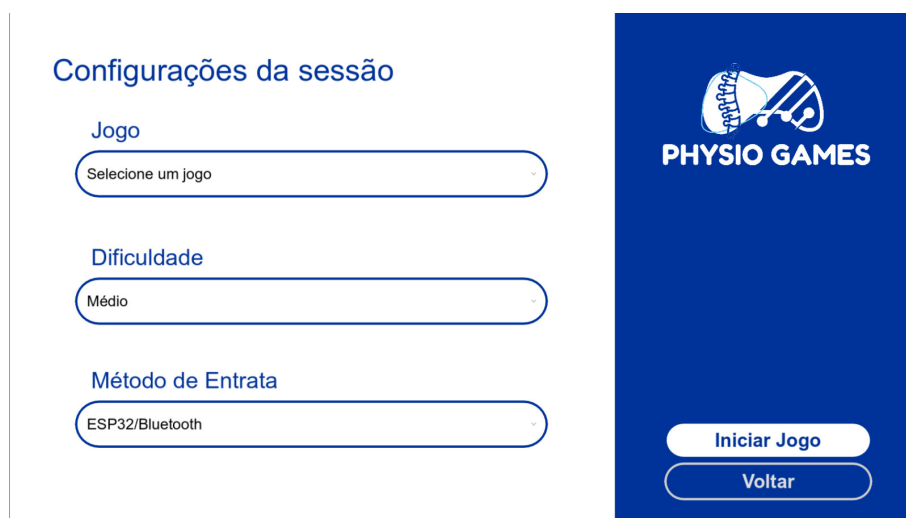


Figura 2. Interface de configuração da plataforma PhysioGames para definição de níveis e sensores.

O sistema de progressão foi projetado para oferecer flexibilidade e personalização, permitindo a escolha manual de três níveis (Fácil, Médio e Difícil) ou a execução de um Modo Padrão de evolução automática. No nível Fácil, o jogo prioriza a adaptação do paciente, oferecendo maior latência entre o surgimento de obstáculos e velocidades reduzidas de deslocamento lateral. À medida que o sistema progride, ele ajusta dinamicamente a frequência de *spawn*, o limite de inimigos simultâneos e a velocidade dos objetos. A transição para o nível Difícil introduz um sistema de partículas complexo que simula uma chuva densa; essa mecânica foi desenhada especificamente para elevar a carga cognitiva do paciente por meio da oclusão visual parcial, exigindo maior concentração e precisão motora sob condições adversas, o que favorece o aprendizado ativo e o engajamento.

A lógica de recompensas no PhysioBirds incentiva a manutenção do estado de *Flow*, buscando o equilíbrio ideal entre a habilidade do paciente e o desafio proposto. A pontuação é incrementada em +1 ponto para cada segundo de sobrevivência, premiando a persistência e a resistência física na tarefa. Complementarmente, surgem itens coletáveis (*power-ups*) em forma de minhocas animadas, que surgem no mesmo quadrante de trajetória dos obstáculos (à direita). Cada coleta adiciona +2 pontos ao total, mas sua posição estratégica força o paciente a realizar movimentos de amplitude variada e controlada. Essa dinâmica transforma a simples coleta de itens em um exercício de coordenação motora fina e planejamento espacial, elementos essenciais para a reabilitação de pessoas com amputação e pacientes com mobilidade reduzida [Hashim et al. 2019].

Os obstáculos foram diversificados para refletir um ciclo dinâmico de tempo (dia/noite), identificado pela variação cromática do fundo. Esse aspecto visual final foi projetado para gerar contraste e imersão estética através de transições suaves de iluminação via código. Durante o período diurno, surgem nuvens que funcionam como barreiras de visibilidade; a permanência prolongada dentro delas aciona um efeito de esbranquiçamento progressivo da tela, incentivando a movimentação constante para retomar a clareza visual. Figura 3a e 3b apresentam os cenários possíveis. Ao anoitecer, o cenário introduz meteoritos representados por sprites de tonalidades quentes em alta saturação em trajetórias diagonais imprevisíveis. Para compensar a redução natural de visibilidade e garantir o tempo de reação necessário para o público de terceira idade, o sistema exibe um ícone de aviso piscante antes de cada queda, atuando como um indicador visual precursor.

Outras ameaças, como o avião que sinaliza a passagem de uma asa gigante no topo da tela, exigem manobras de descida controlada. Essa variedade de estímulos, cujos componentes visuais podem ser observados na folha de *sprites* da Figura 3c, visa mitigar a monotonia das terapias convencionais, promovendo uma experiência de cuidado mais acessível, envolvente e tecnicamente monitorada.

3.3. Telemetria Granular e Definição de Métricas Clínicas

A camada de telemetria do PhysioBirds constitui o núcleo científico do sistema, atuando como o mecanismo de conversão entre a interação lúdica e o dado clínico objetivo. Para superar a carência de métricas padronizadas e a falta de validação clínica robusta apontadas em levantamentos recentes do SBGames [Santos et al. 2025], o sistema foi projetado para coletar e persistir três variáveis fundamentais por sessão: Pontuação, Quantidade de Movimentação e Tempo de Execução. A coleta desses dados ocorre de forma local no motor Godot durante toda a partida, sendo o pacote de informações enviado integralmente para o banco de dados Firebase apenas no momento do encerramento da sessão (*game over*). Essa estratégia de envio único ao final garante a integridade do conjunto de dados e reduz a carga de processamento e rede durante o exercício, o que é vital para manter a fluidez da resposta visual em dispositivos de hardware limitado.

A métrica de Pontuação reflete a eficácia motora e o nível de atenção do paciente, sendo influenciada tanto pela persistência temporal quanto pela coleta estratégica de *power-ups*. O Tempo de Execução, registrado em minutos, serve como um indicador direto de resistência física e engajamento na tarefa. Já a quantidade de Movimentação é a variável de maior densidade técnica; ela é calculada com base na frequência de

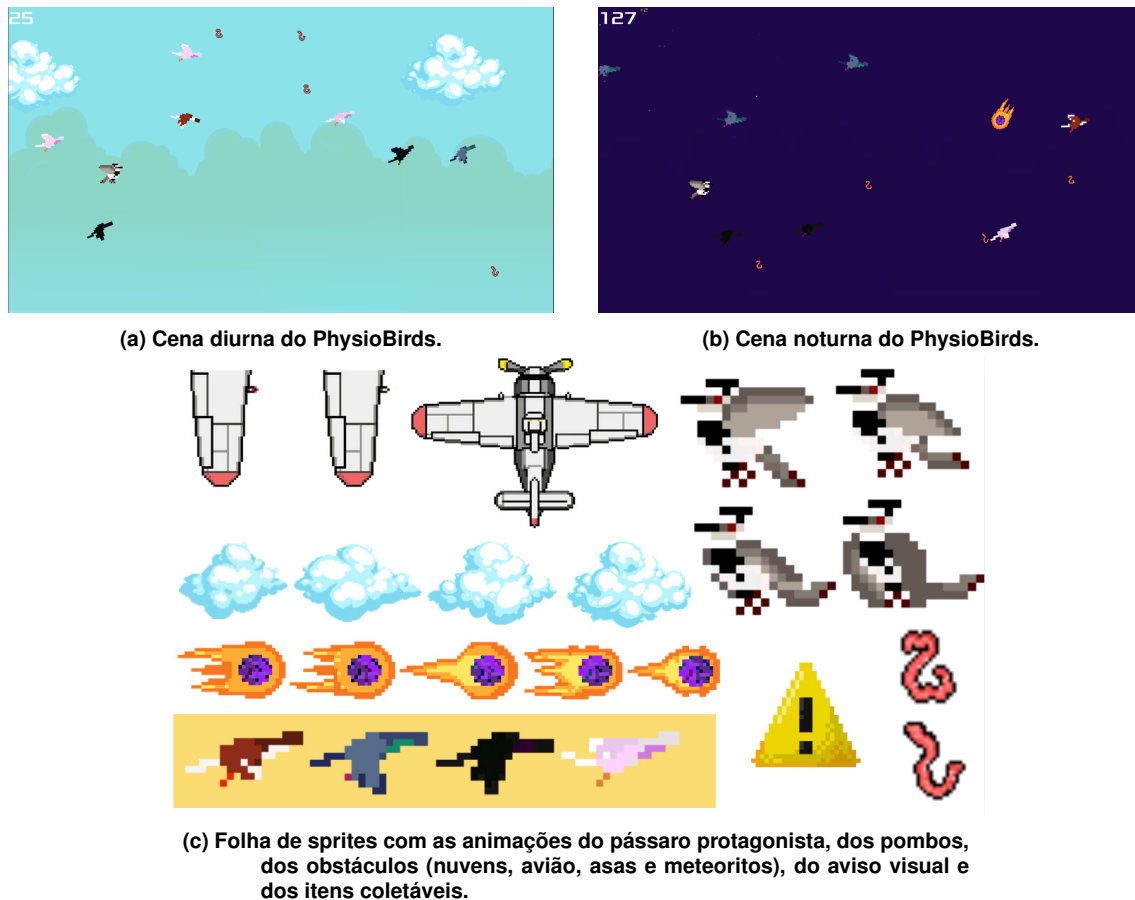


Figura 3. Cenas do jogo sério PhysioBirds e folha de sprites utilizada no desenvolvimento visual.

atualização do sensor inercial (amostragem), onde cada pacote de dados recebido pelo NodeMCU ESP32 é interpretado como um evento de esforço motor. Ao consolidar essas três métricas, o fisioterapeuta dispõe de uma visão multidimensional do paciente: enquanto a pontuação mede o sucesso na tarefa, a movimentação quantifica o esforço real despendido para atingir tal resultado.

A infraestrutura analítica do sistema é complementada por uma plataforma Web de suporte à decisão, onde os dados de cada um dos pacientes envolvidos no estudo são processados individualmente. Para mitigar a falta de acompanhamento profissional contínuo reportada na literatura, a plataforma gera gráficos de série temporal específicos para cada usuário, permitindo a visualização isolada do progresso em cada métrica. Além do acompanhamento por sessão, o sistema calcula a média aritmética individual de pontuação, tempo e movimentos ao longo de todo o histórico do tratamento.

Essa abordagem estatística permite identificar tendências de melhora ou estagnação clínica, transformando o registro de cada partida em um indicador de desempenho longitudinal. Ao fornecer gráficos personalizados para cada paciente, o PhysioBirds atende à necessidade de personalização e monitoramento clínico síncrono e assíncrono, consolidando-se como uma ferramenta de prontuário digital dinâmica que auxilia o profissional de saúde a ajustar o protocolo terapêutico de forma precisa e baseada

em evidências.

3.4. Infraestrutura Tecnológica

A escolha pelo motor Godot justifica-se por ser uma ferramenta de código aberto que oferece maior flexibilidade para o desenvolvimento acadêmico e clínico. Tecnicamente, a engine destaca-se pela excelente compatibilidade com a arquitetura ARM64, o que é fundamental para a execução do sistema em *single-board computers* como o Raspberry Pi. Essa portabilidade permite que o PhysioBirds seja implantado em ambientes de reabilitação com infraestrutura computacional limitada, garantindo um desempenho fluido sem a necessidade de hardware gráfico de alto custo.

No que se refere ao hardware, o sistema utiliza o NodeMCU ESP32 como núcleo do nó sensor. A escolha do ESP32 é estratégica pela integração nativa do protocolo Bluetooth Low Energy (BLE), que assegura uma comunicação estável e sem fios que poderiam comprometer a biomecânica do paciente. Acoplado ao microcontrolador, o módulo MPU6050 realiza a captura inercial nos eixos X, Y e Z, traduzindo gestos físicos em comandos virtuais e monitoramento clínico em tempo real. Para garantir que essa telemetria não seja perdida, a camada de dados foi projetada para que, ao final de cada partida, os indicadores processados pelo Godot sejam enviados automaticamente para uma base de dados centralizada no Firebase.

4. Resultados e Discussão

Nesta seção, apresentam-se os resultados dos testes realizados em ambiente clínico real. A amostra atendeu a uma demanda institucional específica da SRF, que solicitou a intervenção do sistema para o tratamento de cinco pacientes masculinos (acima de 50 anos) com amputações de membros superiores e inferiores. O estudo obteve aprovação do Comitê de Ética local, registrado sob o Certificado de Apresentação para Apreciação Ética (CAAE) de número 95586026.2.0000.5323, e todos os participantes assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). Por se tratar de um estudo de caso voltado a solucionar a demanda desse grupo específico, o nó sensor vestível (composto pelo NodeMCU ESP32 e o acelerômetro/giroscópio MPU6050) foi fixado ao segmento anatômico residual (coto) envolvido na terapia de cada participante por meio de uma faixa elástica ajustável com velcro. A interação com o jogo ocorria de forma síncrona: o paciente realizava movimentos terapêuticos de mobilização ativa segmentar e a variação da amplitude angular capturada pelo sensor inercial controlava o deslocamento vertical do avatar em tela, estabelecendo uma relação direta entre o esforço físico exigido pelo fisioterapeuta e a mecânica de desvio de obstáculos no ambiente virtual. Os experimentos foram conduzidos pelos profissionais de saúde, que atuaram como mediadores técnicos e clínicos na supervisão das 48 sessões. A análise correlaciona o esforço físico despendido (telemetria de movimento) ao desempenho lúdico (pontuação e tempo), além de discutir as percepções de usabilidade e desafios técnicos encontrados no cenário de uso.

4.1. Análise Quantitativa e Desempenho

Os testes totalizaram 48 sessões de fisioterapia gamificada. A Tabela 1 sintetiza as médias de desempenho por paciente, correlacionando as métricas de pontuação, quantidade de movimentação capturada pelo sensor inercial e o tempo de permanência em jogo.

Ao observar os dados da Tabela 1, nota-se um comportamento heterogêneo entre os participantes. O Paciente 2 destacou-se com a maior pontuação média (123) e o maior tempo de permanência (54 segundos), apesar de apresentar uma das menores médias de movimentação (126). Esse dado sugere uma maior eficiência motora e precisão no controle, conseguindo sobreviver por mais tempo com movimentos mais econômicos e precisos. Em contrapartida, o Paciente 5 apresentou a maior taxa de movimentação média (220) em sessões curtas de apenas 22 segundos, o que indica um alto esforço físico e agitação motora, porém com baixa eficácia na manutenção da sobrevivência no jogo.

Tabela 1. Médias de desempenho e engajamento por paciente.

Paciente	Nº de Sessões	Pontuação	Movimentação	Tempo(s)
P1	10	17	210	18
P2	10	123	126	54
P3	7	25	108	24
P4	8	21	109	20
P5	13	22	220	22

A disparidade entre o esforço (movimentação) e o resultado (pontuação/tempo) é um indicador clínico relevante, pois permite ao fisioterapeuta identificar pacientes que estão realizando movimentos excessivos ou descoordenados, necessitando de ajustes na calibração do sensor ou na orientação da tarefa.

4.2. Percepção de Usabilidade e Desafios de Gameplay

Um dos achados mais significativos da validação clínica foi a percepção de alta dificuldade relatada pela totalidade dos pacientes. O tempo médio geral de sessão ficou abaixo dos 30 segundos para 80% do grupo amostral, o que é considerado um intervalo curto para a indução ao estado de *Flow* e para a sustentação de um exercício aeróbico ou motor prolongado.

Os pacientes relataram que a velocidade dos obstáculos e a sensibilidade do controle tornaram a experiência frustrante em certos momentos. Para um jogo sério voltado à terceira idade, a literatura recomenda curvas de aprendizado mais suaves e sessões que permitam uma duração maior para garantir o benefício terapêutico. Portanto, a redução da velocidade base e o aumento do tempo de reação surgem como melhorias prioritárias para as versões subsequentes do PhysioBirds, visando aumentar a persistência do paciente e, conseqüentemente, o tempo de exposição ao estímulo motor.

4.3. Limitações Técnicas no Ambiente Clínico

A execução dos testes em um ambiente clínico real revelou desafios que muitas vezes são invisíveis em testes de laboratório. Observou-se um atraso (delay) perceptível na resposta do sensor ESP32 via Bluetooth. Embora a latência tenha sido pequena em termos de milissegundos, no contexto de um jogo de navegação lateral rápida, esse atraso impactou diretamente a precisão dos desvios, exacerbando a percepção de dificuldade mencionada pelos pacientes.

Esse fenômeno pode estar atrelado a interferências de outros equipamentos eletrônicos presentes na clínica ou a gargalos no processamento do fluxo de dados BLE

pelo motor Godot em tempo real. Identificar essa limitação é crucial, pois sugere a necessidade de implementar técnicas de interpolação de movimento ou otimização no protocolo de comunicação para garantir que a resposta do Quero-quero em tela seja síncrona com o gesto físico do paciente, reduzindo a carga cognitiva e o erro de controle.

5. Conclusões

O desenvolvimento e a validação preliminar do PhysioBirds demonstram que a integração entre jogos sérios e sistemas embarcados de baixo custo é uma alternativa viável e eficaz para a reabilitação de pacientes amputados. O sistema cumpriu seu papel de transformar a telemetria bruta em indicadores clínicos objetivos, preenchendo uma lacuna importante na informática em saúde brasileira.

Em uma perspectiva macro, os resultados sugerem uma curva de aprendizado e engajamento físico positiva ao longo do tempo. O volume expressivo de sessões realizadas, variando entre 7 e 13 tentativas por participante, demonstra uma alta taxa de adesão e persistência com a plataforma, superando a barreira inicial da dificuldade relatada. Crucialmente, os dados de telemetria revelam que a intensidade da movimentação apresentou uma tendência de crescimento progressivo conforme as sessões avançavam. Esse aumento no esforço físico indica que, à medida que os usuários ganhavam familiaridade com a mecânica do jogo e com o ambiente virtual, sentiam-se motivados a ampliar o seu desempenho motor, validando o potencial do PhysioBirds como um estímulo eficaz para a continuidade e a intensificação do tratamento fisioterapêutico.

Apesar dos resultados promissores, a validação técnica identificou limitações pontuais, como a latência na comunicação em determinados cenários e a percepção de uma curva de dificuldade acentuada para usuários sem experiência prévia com jogos digitais. Esses fatores, embora não tenham impedido a adesão, apontam caminhos para o aprimoramento da ferramenta.

Como trabalhos futuros, pretende-se implementar um sistema de Ajuste Dinâmico de Dificuldade (DDA), que calibre a velocidade dos obstáculos em tempo real com base no desempenho motor do paciente, visando manter o estado de *Flow* por períodos mais longos. Adicionalmente, planeja-se investigar o uso da biblioteca MediaPipe para o controle dos avatares via visão computacional, avaliando-a como uma alternativa não vestível ao uso do nó sensor. Além disso, planeja-se otimizar o *firmware* do nó sensor para reduzir o *delay* de captura e expandir os testes para um grupo maior e mais diversificado de pacientes, incluindo diferentes níveis de amputação e próteses. Por fim, a integração de novos módulos de sensores para capturar diferentes tipos de exercícios fortalecerá o ecossistema PhysioGames como uma plataforma abrangente de telemedicina e suporte à decisão clínica.

6. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Serviço de Reabilitação Física de Bagé-RS juntamente com seus fisioterapeutas e voluntários pelo apoio e pela cooperação essenciais durante a fase experimental deste estudo. Este trabalho foi financiado em parte pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (Fapergs) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) — Brasil, Programa PET-Saúde: Informação e Saúde Digital.

Referências

- Confessor, I., Gaspar, S., Santos, A., Soares, L., Sousa, I., e Oliveira, V. (2025). Medicina em jogo: Estudo crítico sobre o uso de jogos digitais para ensino e tratamento médicos. In *Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital*, pages 2277–2286, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: The Psychology of Optimal Experience*. Harper & Row, New York.
- Hashim, N. A. et al. (2019). Video game-based rehabilitation approach for individuals who have undergone upper limb amputation: Case-control study. *JMIR Serious Games*.
- Santos, A., Soares, L., Oliveira, V., e Sousa, I. (2025). Uso de jogos digitais na saúde: um levantamento no sbgames. In *Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital*, pages 2132–2143, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Sathish, P. et al. (2025). Mediglove: A smart rehabilitation glove with gesture-based iot control and gamified therapy. *International Journal of Food, Midwifery and Rural Health*.
- Shires, L., Brown, D. J., Sherkat, N., Lewis, J., e Standen, P. J. (2014). Evaluating the Microsoft Kinect for use in upper extremity rehabilitation following stroke. In *Proceedings of the 10th Intl Conf. on Disability, Virtual Reality & Associated Technologies*, pages 249–256, Gothenburg, Sweden.
- Silva, C., Silva, J., Silva, R., et al. (2026). Mobile-based serious games for upper limb rehabilitation: A systematic review. *JMIR Serious Games*, 14(1):e64091.
- Vogel, J., Vogel, D., Cannon-Bowers, J., Muse, K., e Wright, M. (2006). Computer gaming and interactive simulations for learning: A meta-analysis. *Journal of Educational Computing Research*, 34:229–243.