

Plataforma IoMT Gamificada de Baixo Custo para Manovacuometria Digital e Reabilitação Pulmonar

Tiago Machado Jardim¹, Danuza Corrêa¹,
Érico Marcelo Hoff do Amaral¹, Julio Saraçol Domingues Júnior¹

¹Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) – Bagé – RS – Brasil

tiagojardim.aluno@unipampa.edu.br, danuzatcorrea@gmail.com,

ericoamaral@unipampa.edu.br, juliiodomingues@unipampa.edu.br

Abstract. *Respiratory strength assessment is essential in pulmonary rehabilitation; however, the high cost of digital equipment limits clinical access. This study proposes a low-cost IoMT platform based on the ESP32, MPX sensors, and a gamified mobile application via BLE. The methodology involved calibration (error < 5%) and clinical validation with patients aged 36 to 74 years. The results confirm accuracy in measuring PI_{max} and PE_{max} , enabling reliable clinical classifications. The use of serious games demonstrated effectiveness in therapeutic engagement, distinguishing between muscle endurance and power demands. It is concluded that the solution enables remote monitoring with clinical rigor and accessibility, filling a gap in digital health.*

Resumo. *A avaliação da força respiratória é essencial na reabilitação pulmonar, porém o custo elevado de equipamentos digitais restringe o acesso clínico. Este estudo propõe uma plataforma IoMT de baixo custo baseada em ESP32, sensores MPX e aplicação móvel gamificada via BLE. A metodologia envolveu calibração (erro < 5%) e validação clínica com pacientes de 36 a 74 anos. Os resultados atestam precisão nas medições de $PI_{máx}$ e $PE_{máx}$, permitindo classificações clínicas fidedignas. O uso de jogos sérios demonstrou eficácia no engajamento terapêutico, distinguindo demandas de resistência e potência muscular. Conclui-se que a solução viabiliza o monitoramento remoto com rigor clínico e acessibilidade, preenchendo uma lacuna na saúde digital.*

1. Introdução

A fisioterapia respiratória desempenha um papel determinante na prevenção, avaliação e tratamento de disfunções do sistema pulmonar, sendo essencial para a otimização das trocas gasosas e a melhoria da qualidade de vida de pacientes com condições crônicas, como a Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC), ou agudas, como as sequelas deixadas pela COVID-19 [Yáñez 2021]. Neste contexto, a mensuração precisa da força muscular inspiratória e expiratória máxima ($PI_{máx}$ e $PE_{máx}$) é crítica, pois permite identificar precocemente fraquezas musculares que levam à limitação do fluxo aéreo, dispneia e à insuficiência respiratória [Gonçalves et al. 2006].

Tradicionalmente, a avaliação dessas pressões respiratórias máximas é realizada por meio de manovacômetros. Contudo, os equipamentos digitais de padrão-ouro, que oferecem precisão e registro automático de dados, apresentam custos elevados, tornando-se uma barreira para a aquisição por clínicas de pequeno porte e para a implementação de

estratégias de monitoramento domiciliar (home care). Embora existam versões analógicas mais acessíveis, estas carecem de conectividade, dependem da leitura visual momentânea do profissional e não possuem capacidade de armazenamento histórico, limitando a análise longitudinal da evolução do paciente [Moraes 2017].

Além da barreira financeira e tecnológica, a adesão ao tratamento é um desafio constante na reabilitação pulmonar. Exercícios respiratórios repetitivos, necessários para o fortalecimento muscular, tendem a ser monótonos, reduzindo o engajamento do paciente a longo prazo. A literatura aponta que estratégias de gamificação e biofeedback visual podem aumentar significativamente a motivação e a eficácia terapêutica, transformando a terapia em uma atividade lúdica e mensurável [Lopes and Silva 2020].

Diante deste cenário, este trabalho apresenta uma plataforma de Internet of Medical Things de baixo custo projetada para democratizar o acesso à tecnologia de reabilitação pulmonar. A contribuição científica deste estudo reside na integração de três pilares:

1. **Viabilidade Econômica:** Uso de microcontroladores ESP32 e sensores MPX para replicar funcionalidades de equipamentos de alto custo;
2. **Acurácia Técnica:** Calibração inicial do hardware em comparação a manôvacuômetros analógicos de referência, demonstrando a viabilidade das medições;
3. **Engajamento Terapêutico:** Desenvolvimento de jogos sérios que adaptam a mecânica de jogo à capacidade respiratória real do paciente.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 descreve os materiais e métodos utilizados, incluindo o protocolo. A Seção 3 apresenta o referencial teórico e os trabalhos correlatos, destacando o diferencial da proposta. A Seção 4 detalha o projeto e a implementação da plataforma proposta, abrangendo o hardware e o software. A Seção 5 apresenta os resultados clínicos e as discussões. Por fim, a Seção 6 traz as considerações finais e perspectivas futuras.

2. Materiais e Métodos

O desenvolvimento do sistema seguiu uma abordagem metodológica experimental aplicada, de natureza quali-quantitativa, estruturada para garantir a reprodutibilidade técnica e a validação clínica. O fluxo de pesquisa foi organizado em um ciclo iterativo composto por três fases distintas e interconectadas, conforme ilustrado na Figura 1.

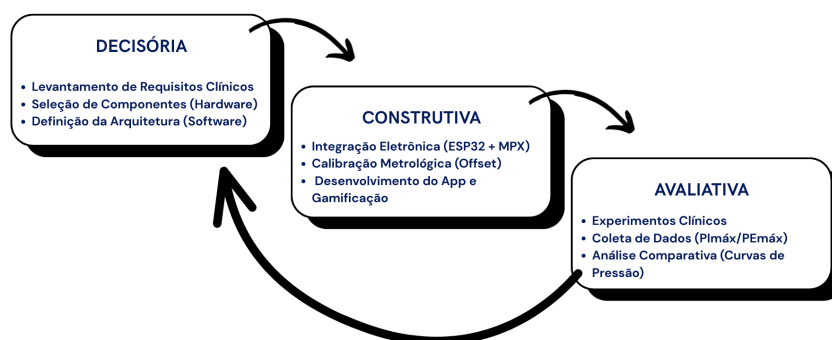


Figura 1. Fluxo metodológico do projeto.

1. Fase Decisória (Fundamentação): Etapa focada na revisão sistemática da literatura e no levantamento de requisitos junto a profissionais de saúde.
2. Fase Construtiva (Desenvolvimento): Compreendeu a modelagem da arquitetura de software e hardware, bem como a integração dos sensores MPX e o desenvolvimento da aplicação móvel gamificada.
3. Fase Avaliativa (Validação): Consistiu na aplicação do protocolo experimental em ambiente clínico para a coleta de dados e análise comparativa.

Para a avaliação prática da plataforma (Fase Avaliativa), foi conduzida uma experimentação supervisionada por uma fisioterapeuta especialista. A amostra voluntária foi composta por 6 participantes (3 homens e 3 mulheres) com idades entre 36 e 74 anos. A amostra incluiu indivíduos clinicamente saudáveis e pacientes com histórico de disfunções respiratórias leves (ex: sequelas pós-infecção viral), garantindo a variabilidade clínica necessária para testar a acurácia do sensor em diferentes faixas de pressão. O fluxo de testes foi estruturado para avaliar a viabilidade de uso do sistema em quatro etapas: (1) Preparação e conexão via BLE; (2) Captação de dados manovacumétricos; (3) Interação com o treinamento gamificado com ajuste de dificuldade; e (4) Avaliação qualitativa da usabilidade por meio de questionário respondido pela profissional.

Os testes práticos de usabilidade foram realizados mediante a concordância prévia e voluntária dos participantes. Todos os procedimentos seguiram rigorosamente as diretrizes éticas para pesquisas envolvendo seres humanos, garantindo a total segurança física durante o uso do bocal, a integridade e o absoluto anonimato dos dados clínicos coletados durante a experimentação do protótipo.

3. Referencial e Correlatos

Para fundamentar o desenvolvimento deste trabalho, é essencial compreender a importância da avaliação da força muscular respiratória, tradicionalmente realizada por manovacumetros. Estes equipamentos medem as pressões inspiratórias e expiratórias máximas (P_{Imáx} e P_{Emáx}), dados cruciais para diagnosticar fraquezas musculares e monitorar disfunções pulmonares [Moraes 2017]. Ademais, como a adesão ao tratamento é um desafio clínico constante, a literatura aponta o uso da gamificação e de "jogos sérios" como estratégias eficazes para transformar a terapia repetitiva em uma atividade lúdica, aumentando o engajamento e a motivação do paciente [Lopes and Silva 2020].

Nesse contexto, a intersecção entre Internet of Medical Things (IoMT), saúde respiratória e gamificação tem sido explorada em diversos estudos recentes. A Tabela 1 apresenta uma comparação estrutural entre a plataforma proposta e as principais soluções encontradas na literatura.

Tabela 1. Comparação entre a plataforma proposta e os trabalhos correlatos.

Trabalho	Sensores	Conectividade	Aplicação Principal	Limitação Identificada
[Figueiredo et al. 2023]	Piezoelétrico	Bluetooth	Gamificação (Shaker)	Não mede pressão (cmH ₂ O)
[Tincopa et al. 2022]	Impedância	Wi-Fi	Monitoramento Passivo	Foco apenas em taxa respiratória
[Castro 2019]	Efeito Hall	Bluetooth	Feedback de Sopro	Foco em frequência, não força
[Santos et al. 2018]	MPX5010DP	Bluetooth	Jogo Sério (Fluxo)	Foco em fluxo/volume
Trabalho Proposto	MPX5010/5500	BLE	Manovacumetria e Treino	Solução integrada (Pressão + Jogos)

Analisando a literatura, observa-se que soluções como a de [Figueiredo et al. 2023] focam na adaptação de dispositivos de vibração, mas não

quantificam a força muscular de forma padronizada. Sistemas robustos de monitoramento, como o proposto por [Tincopa et al. 2022], utilizam pneumografia por impedância, porém focam no monitoramento passivo de sinais vitais, sem oferecer ferramentas para a reabilitação ativa. O trabalho de [Santos et al. 2018] está mais próximo da nossa proposta ao utilizar sensores MPX, contudo, seu foco reside na espirometria (fluxo e volume), e não na manovacuometria diagnóstica.

A principal diferença destes trabalhos correlatos para o trabalho proposto reside na sua abordagem híbrida e completa de diagnóstico e reabilitação. Enquanto as soluções existentes focam em fluxo, vibração ou apenas no monitoramento passivo de alto custo, o trabalho proposto preenche uma lacuna crítica: ele fornece manovacuometria digital exata ($PI_{m\acute{a}x}$ e $PE_{m\acute{a}x}$ com erro $< 5\%$) aliada ao treinamento muscular gamificado adaptativo em uma única plataforma IoMT de baixo custo (ESP32 e BLE). Dessa forma, a ferramenta não atua apenas de forma recreativa ou passiva, mas contribui ativamente para a triagem clínica com base em equações preditivas validadas na literatura.

4. Projeto e Implementação da Plataforma

Esta seção descreve o projeto, a construção da ferramenta e a integração dos componentes tecnológicos necessários para a captura e o processamento dos sinais respiratórios.

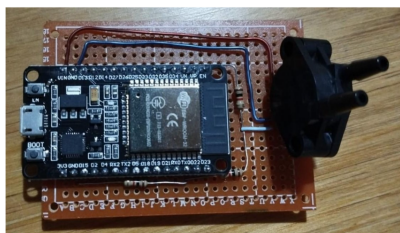
4.1. Arquitetura de Hardware e Instrumentação

A arquitetura do sistema foi projetada para garantir portabilidade e eficiência energética em ambiente ambulatorial. O processamento de dados é realizado pelo módulo ESP-WROOM-32, que integra o microcontrolador ESP32. Esta escolha técnica justifica-se pela sua arquitetura dual-core e pelo suporte nativo a Bluetooth Low Energy (BLE).

Para a aquisição dos sinais respiratórios, foram utilizados transdutores de pressão diferencial piezoresistivos da série MPX (NXP Semiconductors), configurados em duas versões para atender diferentes perfis antropométricos:

- **MPX5010DP (0 a 10 kPa):** Alta sensibilidade (4,413 mV/mmH₂O), ideal para pediatria e pacientes com fraqueza muscular severa.
- **MPX5500DP (0 a 500 kPa):** Alta amplitude, ideal para adultos saudáveis e atletas, evitando a saturação do sinal em manobras de força excessiva.

A construção do hardware seguiu uma abordagem modular. Inicialmente, os componentes (ESP32, sensores e resistores) foram soldados em uma placa perfurada para garantir robustez mecânica e minimizar ruídos de contato, conforme ilustrado na Figura 2(a).



(a) Vista interna do circuito.



(b) Dispositivo finalizado.

Figura 2. Vistas da montagem física do protótipo.

Para garantir o condicionamento adequado do sinal analógico e a proteção das portas lógicas do microcontrolador, implementou-se um circuito divisor de tensão. Adicionalmente, visando assegurar a autonomia energética e a portabilidade do dispositivo para o ambiente clínico (Figura 2(b)), integrou-se um módulo de alimentação autônomo (*Shield* de Bateria 18650 V3). Esta arquitetura elétrica estabilizou a alimentação do sensor e isolou a placa de desenvolvimento, viabilizando uma operação com baixo índice de ruído e imune a flutuações de tensão.

Para a interface física com o paciente, desenvolveu-se um bocal instrumentado contendo um sistema de carga linear (Figura 3). Utilizou-se um registro de esfera de PVC (1/2 polegada) acoplado a uma escala impressa de 180°.

Este mecanismo permite ao fisioterapeuta ajustar a resistência ao fluxo de ar (carga mecânica) de forma gradual: quando o registro está totalmente aberto (0°), a resistência é mínima; conforme se aproxima de 90° (fechado), a resistência aumenta, exigindo maior recrutamento muscular do paciente para gerar a mesma pressão, permitindo a progressão de carga terapêutica.

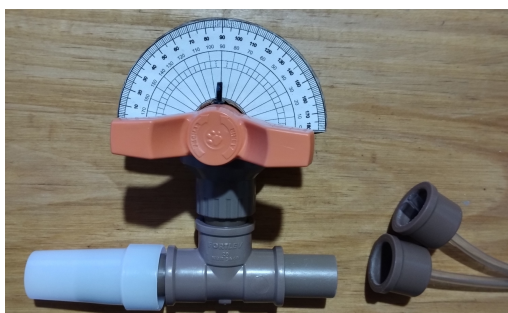


Figura 3. Bocal mecânico com registro de esfera para ajuste da carga resistiva.

A integração conjunta dos módulos eletrônico e mecânico consolidou a arquitetura de hardware do protótipo, tornando-o apto e autônomo para o ambiente ambulatorial. No entanto, para assegurar que as variações de tensão elétrica captadas pelo conversor analógico-digital (ADC) do ESP32 representem com exatidão as pressões respiratórias fisiológicas geradas no bocal, o conjunto montado precisou ser validado frente a um padrão de referência. Os procedimentos adotados para atestar essa precisão diagnóstica são detalhados na etapa de calibração metrológica a seguir.

4.2. Calibração Metrológica

A confiabilidade dos dados foi estabelecida através de um protocolo de calibração estática em pontos múltiplos. O protótipo foi acoplado em paralelo a um manovacuômetro analógico comercial (padrão de referência) utilizando um sistema pneumático em Y, garantindo que ambos os instrumentos fossem submetidos simultaneamente à mesma coluna de pressão, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4. Montagem experimental para calibração do protótipo.

Os valores brutos captados pelo Conversor Analógico-Digital (ADC) de 12 bits (0-4095) foram submetidos a uma regressão linear para derivar a curva de transferência para cmH_2O . Após a compensação via software do *offset* (tensão residual na ausência de fluxo) e do ganho dinâmico, o erro absoluto médio das medições replicadas manteve-se inferior a 5% em toda a faixa operacional útil do sensor.

Este limiar foi adotado em conformidade com as diretrizes da American Thoracic Society (ATS) e da European Respiratory Society (ERS). A ATS é a entidade global responsável pela padronização dos testes de função pulmonar, estabelecendo que equipamentos de espirometria e manovacuometria devem manter uma precisão mínima para garantir que as variações medidas reflitam a condição fisiológica do paciente e não ruídos instrumentais [American Thoracic Society and European Respiratory Society 2005].

4.3. Engenharia de Software e Gamificação

A aplicação móvel foi desenvolvida sobre o ecossistema Flutter (Google), utilizando a linguagem Dart. A escolha por este *framework* justifica-se pela sua capacidade de compilação AOT (*Ahead-of-Time*), que garante desempenho nativo no sistema Android, essencial para a renderização fluida dos gráficos de pressão em tempo real.

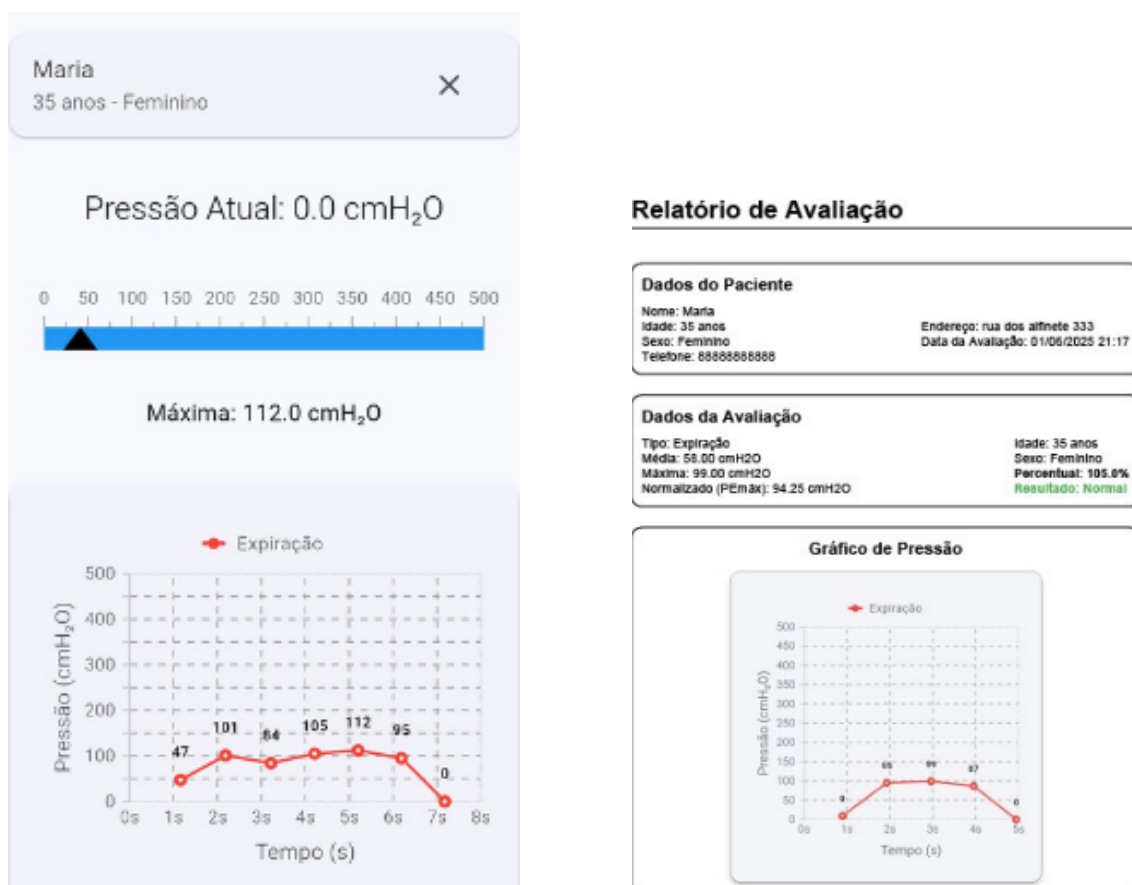
4.3.1. Comunicação e Conectividade

A comunicação entre o nó sensor (ESP32) e o dispositivo móvel é realizada através do protocolo Bluetooth Low Energy (BLE). A implementação utilizou a biblioteca *flutter_bluetooth_serial_ble*, garantindo baixa latência na recepção dos vetores de pressão, o que é crítico para o *biofeedback* visual instantâneo. Além disso, a escolha pelo BLE em detrimento do Bluetooth Clássico foi determinante para a eficiência energética, prolongando a autonomia do dispositivo vestível alimentado por bateria.

4.3.2. Persistência de Dados e Relatórios Clínicos

A infraestrutura de dados utiliza o Firebase Firestore, um banco NoSQL orientado a documentos. A modelagem hierárquica (*Fisioterapeutas* → *Pacientes* → *Sessões*) permite que cada documento armazene não apenas os picos de pressão (P_{máx}/PE_{máx}), mas também o *array* completo da curva de pressão (Pressão × Tempo).

Essa arquitetura em nuvem viabiliza o telemonitoramento: o fisioterapeuta pode acessar remotamente o histórico evolutivo do paciente e visualizar a qualidade de cada manobra através de relatórios gráficos, conforme ilustrado na Figura 5.



(a) Monitoramento em tempo real.

(b) Histórico de medições.

Figura 5. Interface do módulo de avaliação e acompanhamento do usuário.

A integração dessa funcionalidade de geração de relatórios transcende o mero armazenamento passivo de dados. O processamento e armazenamento dos *arrays* brutos permitem a reconstrução fidedigna das curvas de desempenho de sessões anteriores. Dessa forma, o sistema converte as medições isoladas em um panorama evolutivo claro, o que é essencial para o acompanhamento longitudinal e para o planejamento assertivo de intervenções futuras por parte do profissional de saúde.

4.3.3. Módulo de Gamificação (Jogos Sérios)

A biblioteca Flame foi utilizada para sustentar um ciclo de jogo otimizado que integra a física dos elementos visuais diretamente ao fluxo de dados captados pelos sensores. Nessa estrutura, o esforço respiratório substitui o toque na tela para controlar as ações do usuário. Foram desenvolvidas duas mecânicas distintas, apresentadas na Figura 6, com objetivos terapêuticos específicos:

- **Mecânica de Fluidos (Resistência):** Este módulo utiliza componentes da biblioteca SynCFusion para simular a subida do nível de um líquido virtual de forma proporcional à pressão sustentada no bocal. O objetivo consiste em manter a pressão constante dentro de uma zona alvo para recrutar fibras musculares de resistência.
- **Mecânica de Impulso Vertical (Potência):** Baseada em lógicas de código aberto para progressão lateral, o movimento do personagem ocorre apenas quando o usuário atinge um limiar de pressão predefinido. Essa dinâmica exige explosão muscular para a superação de obstáculos e visa estimular fibras de contração rápida.



Figura 6. Ambientes virtuais desenvolvidos para o biofeedback respiratório.

Para incentivar o engajamento contínuo, ambas as mecânicas utilizam um sistema de pontuação em tempo real que motiva o usuário a superar seus próprios limites. Ao final de cada sessão, os dados de desempenho relacionados às pressões máxima e média, além da pontuação conquistada, são sincronizados automaticamente com o banco de dados para permitir o acompanhamento da evolução do treinamento. Essa integração assegura que a interface recreativa atue não apenas como um motivador, mas como um gerador de dados clínicos objetivos, permitindo ao fisioterapeuta monitorar a evolução do tratamento e ajustar a carga terapêutica para as próximas sessões.

5. Resultados e Discussões

O estudo clínico foi conduzido ao longo de 60 dias com uma amostra heterogênea de 6 participantes (3 homens e 3 mulheres, idade 36-74 anos), sob supervisão direta de uma fisioterapeuta respiratória. Os dados coletados permitiram avaliar tanto a precisão diagnóstica do hardware quanto a eficácia terapêutica do software.

5.1. Precisão Diagnóstica: Manovacumetria

Após a calibração técnica do hardware, a capacidade do sistema em realizar a triagem clínica de disfunções respiratórias foi avaliada comparando-se os valores medi-

dos pelo protótipo com os valores de referência calculados pelas equações preditivas de [Neder et al. 1999]. Ressalta-se que, da amostra total de 6 voluntários descrita na metodologia, um participante realizou exclusivamente a etapa de treinamento gamificado, não participando dos testes iniciais de força máxima. Por esse motivo, a análise manovométrica consolidada na Tabela 2 apresenta apenas 5 participantes.

Tabela 2. Resultados da Avaliação Clínica de P_{Imáx} e P_{Emáx}.

Part.	Idade/Sexo	Teste	Medido (cmH ₂ O)	Predito (cmH ₂ O)	Diagnóstico Automático
P1	57, F	P _{Emáx}	99	80,83	Normal (122%)
P2	40, F	P _{Imáx}	67	83,60	Normal (80%)
P3	47, M	P _{Imáx}	71	117,70	<i>Déficit (60%)</i>
P4	74, M	P _{Imáx}	91	96,10	Normal (94%)
P5	36, M	P _{Emáx}	76	136,14	<i>Déficit Severo (55%)</i>

Os resultados demonstram que o sensor MPX manteve linearidade e sensibilidade em extremos opostos. No caso da Participante 1, o sistema registrou 99 cmH₂O (122% do previsto), atestando que o hardware não satura em pressões elevadas. Em contrapartida, para o Participante 5 (homem jovem, 36 anos), o sistema detectou um déficit severo (apenas 55% do esperado). Este diagnóstico automático, gerado pelo algoritmo do aplicativo, alerta o profissional para a necessidade de investigação clínica. Contudo, em concordância com as limitações deste estudo preliminar de baixo custo, reconhece-se que a validação definitiva da exatidão do equipamento exigirá futuras análises estatísticas de concordância e repetibilidade (como o método de Bland-Altman) em um espaço amostral ampliado.

5.2. Análise das Curvas de Pressão

Além dos valores de pico, a análise morfológica das curvas de pressão ($P \times t$) geradas em tempo real permitiu observar diferentes padrões de resposta neuromuscular durante as manobras. A Figura 7 apresenta a comparação entre dois perfis distintos observados durante a experimentação.

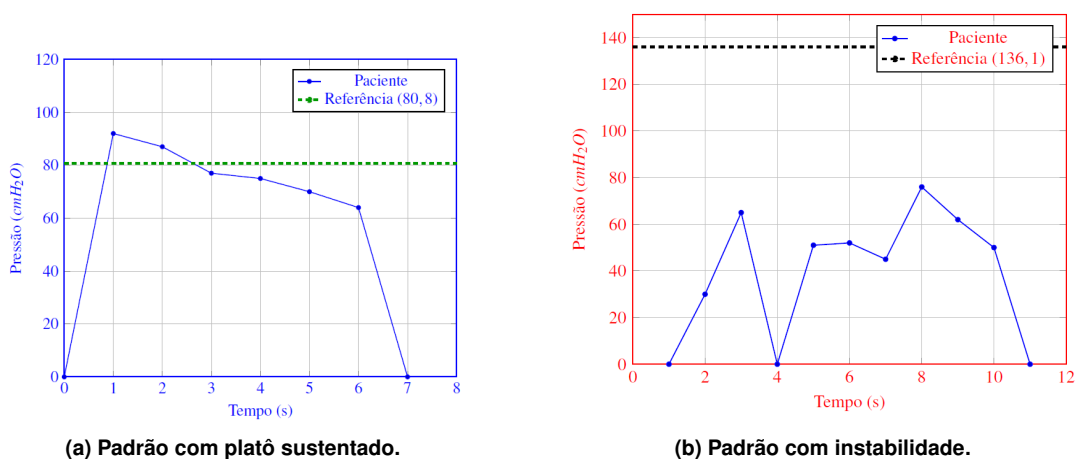


Figura 7. Curvas de $PE_{máx}$ demonstrando diferentes desempenhos frente às metas de referência.

Na Figura 7a, nota-se que o usuário não apenas atinge o pico de pressão, mas sustenta um platô estável acima da linha de referência por aproximadamente 4 segundos, o que sugere um bom controle muscular para o perfil avaliado. Em contrapartida, a Figura 7b revela uma maior instabilidade e dificuldade em atingir a zona alvo prevista para a idade do voluntário.

Essa visualização imediata permitiu que a profissional acompanhasse a execução e orientasse ajustes na técnica de respiração durante a sessão, fornecendo dados que manovacuômetros analógicos tradicionais, limitados a valores instantâneos, geralmente não captam. A observação desses diferentes comportamentos reforça o potencial do sistema em auxiliar na caracterização da resistência e da força muscular ao longo do tempo. Esses subsídios visuais podem contribuir para que o profissional direcione o uso das mecânicas de gamificação de forma mais personalizada, adequando o treinamento às necessidades observadas em cada usuário.

5.3. Avaliação das Mecânicas de Gamificação e Biofeedback

A Tabela 3 apresenta as métricas obtidas durante as sessões de experimentação, fornecendo indícios sobre como as diferentes mecânicas de jogo podem se comportar em relação ao esforço respiratório exigido.

Tabela 3. Desempenho comparativo nas mecânicas de gamificação.

Participante	Mecânica	Modo	Pico (cmH ₂ O)	Média (cmH ₂ O)
P1 (57a)	Fluido	Inspiração	88,00	22,80
P5 (36a)	Impulso	Inspiração	110,00	19,22
P6 (72a)	Fluido	Expiração	72,00	27,94

Com base nos dados coletados, os resultados levam a acreditar que pode existir uma tendência na aplicabilidade das dinâmicas propostas conforme o perfil do usuário:

- Mecânica de Fluido e Fibras de Resistência: A dinâmica de manutenção do nível de líquido apresentou-se promissora para voluntários com idades mais avançadas, como observado no participante 6. A exigência de manter uma pressão média constante e controlada sugere uma adequação para o treinamento de resistência, o que pode estar relacionado ao recrutamento de fibras de contração lenta (Tipo I).
- Mecânica de Impulso e Fibras de Potência: O desempenho no jogo baseado em impulsos rápidos resultou em picos de pressão mais elevados com médias inferiores, como no caso do participante 5. Esses dados sugerem que essa mecânica pode ser mais direcionada ao treino de potência e ao estímulo de fibras de contração rápida (Tipo II), sendo possivelmente indicada para usuários que buscam ganho de explosão muscular.

Para incentivar o engajamento, ambas as mecânicas utilizam um sistema de pontuação que motiva o usuário a superar seus próprios limites. Ao final de cada sessão, os dados de desempenho são sincronizados automaticamente com o banco de dados para permitir o acompanhamento da evolução do uso.

5.4. Percepções de Usabilidade e Feedback Profissional

Após a realização dos testes, a profissional de fisioterapia responsável compartilhou percepções qualitativas sobre o uso da plataforma proposta. Para estruturar essa coleta de dados, utilizou-se um questionário *ad-hoc* baseado em entrevista semiestruturada, focado em três dimensões principais: (1) confiabilidade das medições frente à percepção clínica de esforço, (2) usabilidade da interface gráfica e (3) potencial de engajamento do paciente.

Entre as observações registradas, destacou-se a consistência entre o esforço físico percebido no bocal e os valores digitais apresentados, o que reforça a confiabilidade do sistema para o acompanhamento das manobras. O biofeedback visual em tempo real foi apontado como um recurso determinante, pois permite a correção imediata de falhas técnicas, como posturas incorretas ou fugas de ar durante a execução. Além disso, a profissional observou que as mecânicas de gamificação auxiliaram no engajamento dos voluntários, que demonstraram preferências distintas conforme a faixa etária e o tipo de desafio proposto, sugerindo um potencial para a personalização de protocolos futuros de treinamento.

6. Considerações Finais

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a validação clínica de uma plataforma IoMT de baixo custo projetada para democratizar o acesso à reabilitação pulmonar. Os resultados obtidos confirmam a hipótese de pesquisa de que a integração do módulo ESP-WROOM-32 com sensores de pressão diferencial (MPX), quando submetida a protocolos de calibração de *offset* e sensibilidade, oferece precisão comparável a manovacuômetros analógicos de referência, mantendo um erro inferior a 5%.

As principais contribuições científicas e tecnológicas deste estudo destacam-se inicialmente pela viabilidade econômica e portabilidade. A resolução dos problemas de alimentação do sensor por meio da integração de um *shield* de bateria e a migração para a comunicação via protocolo BLE viabilizaram um dispositivo totalmente autônomo, apto para telemonitoramento e uso domiciliar. Adicionalmente, ressalta-se o valor do algoritmo de triagem automática, cuja implementação das equações preditivas de [Neder et al. 1999] diretamente no aplicativo permitiu identificar e quantificar corretamente pacientes com déficit muscular severo, validando o sistema como uma poderosa ferramenta de triagem clínica em tempo real para medições de $PI_{\text{máx}}$ e $PE_{\text{máx}}$.

A avaliação da aplicabilidade das dinâmicas propostas revelou tendências significativas conforme o perfil do usuário e os objetivos terapêuticos. A mecânica fundamentada na manutenção constante do nível de líquido, que exige uma pressão média controlada e sustentada, apresentou-se promissora para voluntários com idades mais avançadas, sugerindo uma adequação para o treinamento de resistência relacionado ao recrutamento de fibras de contração lenta (Tipo I). Em contrapartida, a dinâmica baseada em impulsos rápidos resultou em picos de pressão mais elevados com médias inferiores, indicando que essa mecânica é mais direcionada ao treino de potência e ao estímulo de fibras de contração rápida (Tipo II), sendo possivelmente indicada para usuários que buscam ganho de explosão muscular.

Como limitações do estudo, aponta-se o tamanho reduzido da amostra e o caráter transversal da análise, que não permitiram a verificação do ganho fisiológico de força

muscular a longo prazo. Trabalhos futuros focarão na realização de estudos longitudinais com maior amostragem e na validação de concordância comparando a plataforma com equipamentos digitais padrão-ouro de mercado. Adicionalmente, planeja-se a submissão dos protocolos de hardware e segurança para adequação aos requisitos de certificação de dispositivos médicos junto aos órgãos reguladores (ANVISA), além da implementação de algoritmos de *Machine Learning* para ajuste dinâmico da dificuldade baseado na fadiga detectada durante a manobra. Conclui-se que essa proposta não apenas substitui funcionalmente equipamentos tradicionais, mas agrega valor imensurável ao processo terapêutico através do biofeedback visual e do telemonitoramento seguro, preenchendo uma lacuna crítica na saúde digital acessível.

Referências

- American Thoracic Society and European Respiratory Society (2005). Standardization of spirometry. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 152(2):1107–1136.
- Castro, R. M. (2019). Desenvolvimento de sistema de medição de frequência e interface móvel para equipamento de fisioterapia respiratória. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil.
- Figueiredo, M., Júnior, R., and Rezende, A. (2023). Adaptshaker: um dispositivo gamificado para o tratamento da discinesia ciliar primária. In *Anais do Seminário Tecnologias Aplicadas a Educação e Saúde*, pages 95–101.
- Gonçalves, M. P. et al. (2006). Avaliação da força muscular inspiratória e expiratória em idosos praticantes de atividade física e sedentárias. *Revista brasileira de ciência e movimento*, 14(1):37–44.
- Lopes, J. and Silva, M. (2020). Gamificação e jogos sérios na saúde: Um estudo sobre o engajamento de pacientes. *Revista Brasileira de Tecnologias Aplicadas à Saúde*, 10(3):45–58.
- Moraes, L. (2017). *Fisioterapia respiratória*. SESES, Rio de Janeiro.
- Neder, J. A., Andreoni, S., Lerario, M. C., and Nery, L. E. (1999). Reference values for lung function tests: Ii. maximal respiratory pressures and voluntary ventilation. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 32(6):719–727.
- Santos, A. M., Grimes, R. H., Hounsell, M. S., Noveletto, F., Soares, A. V., and Silva, H. E. (2018). I blue it: Um jogo sério para auxiliar na reabilitação respiratória. In *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital (SBGames)*, pages 179–188, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. SBC.
- Tincopa, J. P. et al. (2022). Development of an iot device for measurement of respiratory rate in covid-19 patients. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 13(4):72–77.
- Yáñez, M. F. O. (2021). Evidência científica sobre avaliação da musculatura respiratória e tratamento dos distúrbios respiratórios do sono em acidente vascular cerebral. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN, Brasil.