SISTEMA EMBARCADO INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DE SEGURANÇA EM MERGULHO RECREATIVO

Autores: Felipe Faria Arthur, Guilherme Henrico Amaro Martins, Matheus Vieira Silva Pereira, José Eduardo Loureiro da Costa.

Colégio Técnico Antônio Teixeira Fernandes, Rua Paraibuna, 75, Jardim São Dimas, - 12245-020 - São José dos Campos-SP, Brasil, felipefarthur09@gmail.com, henrico09filhodedeus@gmail.com, matheuzinhovieira80@gmail.com, jedacosta83@gmail.com

Resumo
O mergulho recreativo proporciona contato com ambientes subaquáticos, porém submete o turista a riscos fisiológicos, sendo os principais, segundo o pneumologista Dr. Mauro Gomes (2026), a hipóxia, alterações cardíacas e a doença descompressiva. Diante disso, este projeto propõe o desenvolvimento e a avaliação preliminar de um sistema embarcado com processamento local para auxiliar no monitoramento de segurança durante a imersão. O protótipo utiliza o microcontrolador ESP32 integrado ao sensor biométrico MAX30102, para leitura da frequência cardíaca e saturação de oxigênio, e ao sensor inercial MPU6050, que atua na detecção de alterações bruscas de dinâmica corporal. Para o cálculo preciso da profundidade e da velocidade vertical, o sistema integra também o sensor de pressão hidrostática MS5837. Os dados coletados são processados e exibidos em um display OLED, acionando alertas visuais por LED e táteis via módulo de vibração ao detectar parâmetros fora dos limites de segurança. Testes preliminares de vedação, realizados com a estrutura vazia em baixa profundidade, não apresentaram infiltração.
Palavras-chave: Sistema embarcado. Mergulho recreativo. Monitoramento de segurança. Sensores biométricos.

Área do Conhecimento: Técnico.

Introdução

O mergulho recreativo destaca-se no cenário brasileiro como uma expressiva atividade turística e de lazer, praticada em importantes regiões como Arraial do Cabo, Fernando de Noronha e Abrolhos, favorecida pela ampla biodiversidade aquática do país. Entretanto, a prática submete o organismo humano a condições ambientais adversas, caracterizadas por variações bruscas de pressão, frio e esforço físico. A combinação desses fatores fisiológicos e ambientais pode resultar em intercorrências graves, como a doença descompressiva — causada pela eliminação inadequada de nitrogênio na subida rápida à superfície —, a hipóxia por baixos níveis de oxigênio, o barotrauma, o edema pulmonar por imersão e arritmias cardíacas (BOVE; DAVIS, 2003). Diante dessa vulnerabilidade, o acompanhamento e a percepção precoce de alterações físicas tornam-se determinantes para a prevenção de acidentes subaquáticos.

A identificação de situações de instabilidade física durante a atividade pode ser viabilizada pela leitura contínua de parâmetros vitais e de movimentação do turista. A frequência cardíaca reflete o nível de estresse, fadiga e esforço cardiovascular, enquanto a saturação periférica de oxigênio SpO2 permite mensurar a eficiência respiratória do indivíduo. Paralelamente, o monitoramento inercial por meio da medição de aceleração e velocidade angular possibilita identificar comportamentos anômalos de deslocamento, como taxas de subida descontroladas que desencadeiam a doença descompressiva. A integração dessas variáveis possibilita uma análise abrangente do estado de saúde e da mecânica do mergulhador.

Nesse contexto, os sistemas embarcados sobressaem-se como ferramentas computacionais dedicadas, capazes de efetuar a aquisição, o tratamento de valores biométricos e o processamento de dados em tempo real com baixo consumo energético e dimensões reduzidas. A aplicação do

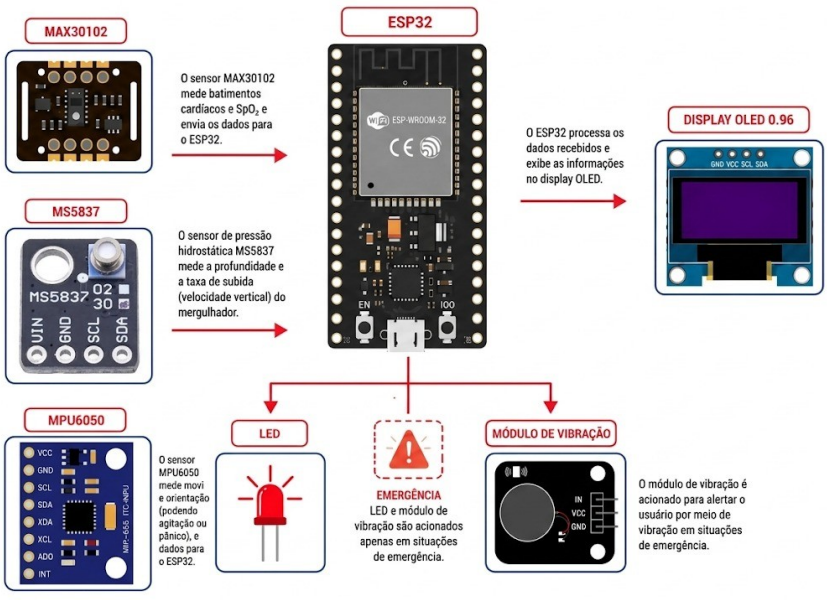
microcontrolador ESP32-WROOM32, associado à comunicação via protocolo I2C simplifica a integração de sensores como o óptico MAX30102 (responsável pelas leituras de frequência cardíaca e SpO2), o sensor MPU-6050 (acelerômetro e giroscópio de três eixos) e o sensor de pressão hidrostática MS5837 (principal componente para a prevenção da doença descompressiva). Essa arquitetura, baseada em processamento local e comparação contínua com limiares pré-programados é o que confere o caráter "inteligente" ao dispositivo, possibilitando processar os sinais coletados e alertar o usuário de forma imediata diante de anomalias detectadas.

Diante da necessidade de aprimorar os recursos de segurança no turismo subaquático, este estudo justifica-se pela importância de propor tecnologias assistivas complementares que auxiliem na prevenção de riscos fisiológicos e operacionais. Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e avaliar um sistema embarcado inteligente e acessível para o monitoramento contínuo, em tempo real, da frequência cardíaca, saturação de oxigênio e padrões de aceleração de mergulhadores recreativos, visando à exibição instantânea dos dados e à emissão de alertas em cenários de risco.

Metodologia

O desenvolvimento do protótipo foi estruturado a partir da integração entre componentes eletrônicos, algoritmos de processamento local e uma caixa de vedação, visando ao monitoramento de parâmetros fisiológicos e de dinâmica de movimento durante a imersão aquática. A arquitetura do hardware utiliza como unidade central o microcontrolador ESP32-WROOM32, selecionado por seu processador dual-core de 32 bits e suporte a barramentos de comunicação rápida. Para a aquisição dos dados biométricos, empregou-se o sensor óptico MAX30102, instalado em um módulo posicionado na região digital (dedo indicador) para otimizar o contato necessário à estimativa do ritmo cardíaco e da saturação periférica de oxigênio (SpO2). A dinâmica de movimentação brusca ou agitação é captada pela aceleração instantânea do MPU6050. O controle fundamental para a prevenção da doença descompressiva é realizado pelo sensor de pressão absoluta MS5837, conectado ao mesmo barramento I²C. A partir das leituras de pressão hidrostática, o ESP32 calcula a profundidade atual e a variação dessa profundidade em função do tempo, determinando a taxa de subida (velocidade vertical).

Figura 1 - Esquema didático



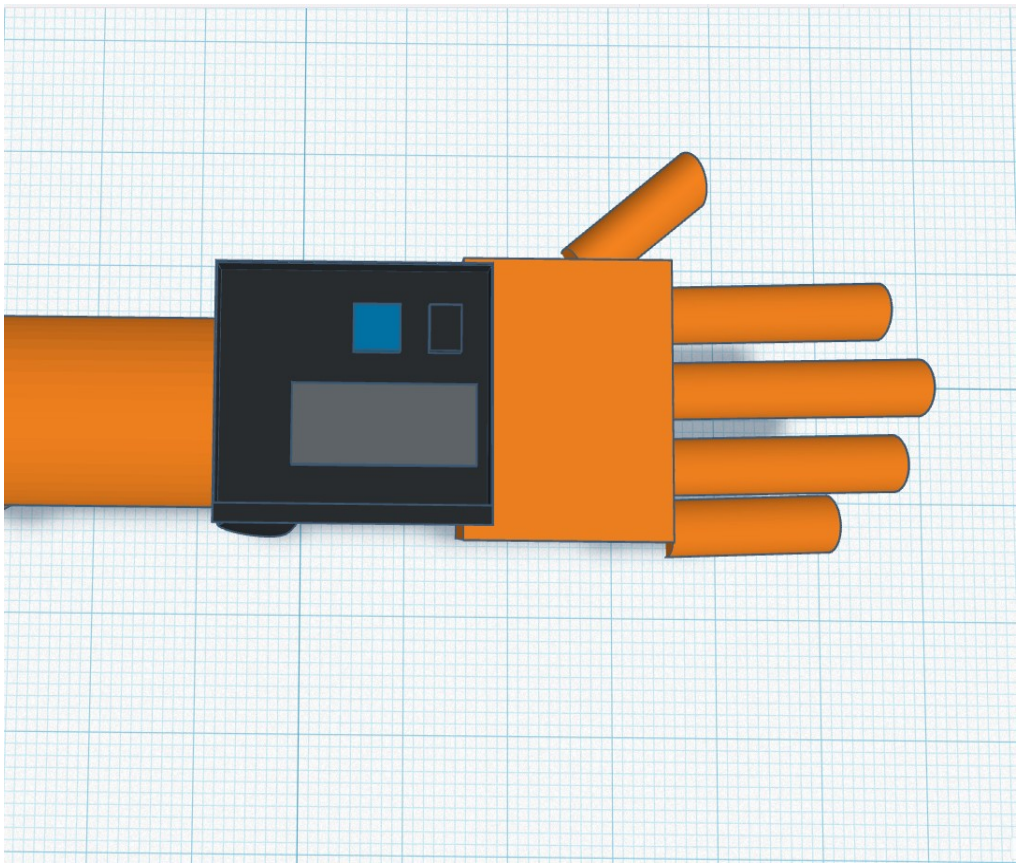
Fonte: Os autores (2026).

O tratamento dos sinais e a lógica do sistema foram programados para execução em tempo real na central (ESP32). As variáveis processadas são comparadas continuamente com valores pré-definidos no software para testar o funcionamento do protótipo: saturação de oxigênio (SpO2) abaixo de 90%,

alterações críticas na frequência cardíaca e aceleração vertical superior a 2 m/s². Cabe ressaltar que a aceleração instantânea medida pelo MPU6050 atua no sistema como um indicador de movimentos bruscos ou agitação (como em situações de pânico), e não como uma medida direta da taxa de subida. Caso a taxa de subida (medida pelo sensor MS5837) ultrapasse os limites experimentais de segurança recomendados, o sistema interpreta como uma ascensão perigosa. Diante da superação de qualquer um desses limiares, o dispositivo aciona simultaneamente um mecanismo de alerta visual (LED) e um aviso tátil (módulo vibratório), além de exibir as medições em um display OLED de 0,96 polegada 128x64.

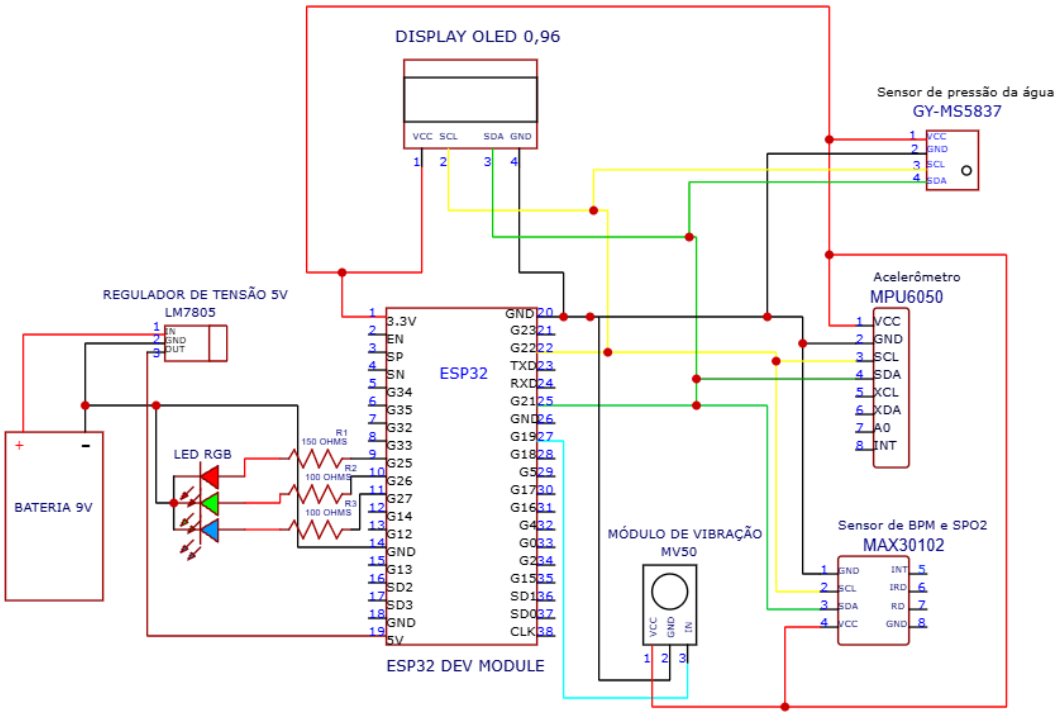
A autonomia e a gestão de energia do circuito portável são providas por uma bateria recarregável de 9V. A alimentação de 3,3V estáveis exigida pelo ESP32 passa por um regulador de tensão de 5V LM7805 para maior segurança do regulador de tensão linear (LDO) integrado na própria placa do microcontrolador que regulará para 3.3V. A vedação hermética da eletrônica contra os efeitos da imersão foi desenvolvida com base em um invólucro impresso em 3D com filamento de Polietileno Tereftalato Glicol (PETG), escolhido por sua alta resistência mecânica e estabilidade em ambientes úmidos. O selamento do case utiliza anéis o-rings, juntas de silicone e uma janela óptica com acrílico para a passagem de luz dos sensores biométricos. Para permitir o carregamento e a regravação do firmware sem a necessidade de abertura do gabinete, incorporou-se um conector impermeável passa-muro do tipo USB-C.

Figura 2 - Modelo 3D caixa de vedação



Fonte: Os autores (2026).

Figura 3 - esquema elétrico.



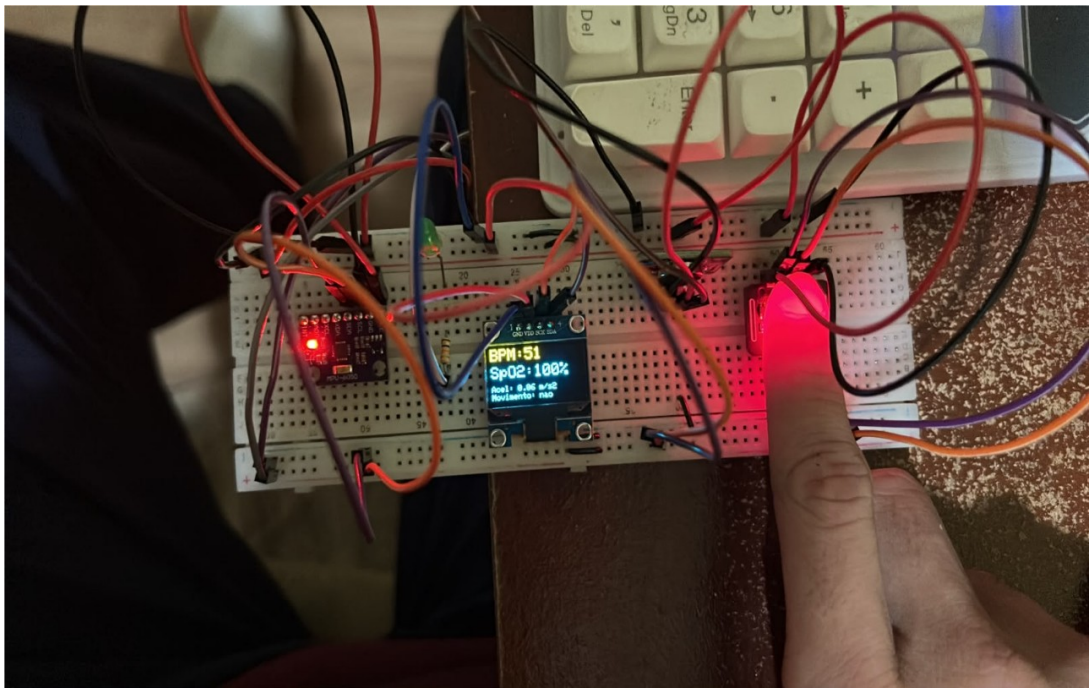
Fonte: Os autores (2026).

Resultados

O protótipo do dispositivo demonstrou resultados satisfatórios nos testes preliminares de bancada e nas avaliações iniciais de vedação. A estrutura, confeccionada em PETG e tratada com resina para reforço da impermeabilização, contou também com o uso de um o-ring e fechamento com parafusos em aço inox, não apresentando infiltrações nas condições avaliadas.

Os testes de vedação foram conduzidos com a estrutura vazia (sem os componentes eletrônicos instalados), submersa em um recipiente de água em profundidade rasa durante um período de até uma hora, tempo compatível com a duração de um mergulho recreativo. Em todas as sete repetições realizadas, observou-se ausência de infiltração de água no interior do case, indicando um comportamento positivo do conjunto o-ring/resina/parafuso para estas condições. Ressalta-se que a validação definitiva da estanqueidade com o circuito embarcado, bem como sua eficácia em pressões hidrostáticas maiores de mergulho, ficam como próximas etapas para o desenvolvimento futuro.

Figura 4 - Circuito Funcionando na protoboard



Fonte: Os autores (2026)

Discussão

A validação do protótipo em bancada confirmou a viabilidade técnica da arquitetura baseada no microcontrolador ESP32 para o processamento síncrono de dados biométricos e cinemáticos em tempo real. O sistema proposto apresenta potencial como uma alternativa experimental para auxiliar no monitoramento da segurança subaquática, embora ainda requeira análise sistemática de custos, calibração biomédica e validação em uso real para ser diretamente comparado aos computadores de mergulho comerciais consolidados no mercado.

A abordagem integrada do protótipo foi desenvolvida com o objetivo de auxiliar na percepção de alterações fisiológicas, como sinais iniciais indicativos de hipóxia (Kiboub et al., 2021). Cabe destacar que os valores de referência biométricos operaram neste estudo como limiares experimentais para testar a lógica dos alertas multissensoriais, e não como limites clínicos definitivos. A detecção de aceleração elevada pelo MPU6050 demonstrou utilidade restrita para sinalizar agitação ou pânico. No entanto, atendendo aos princípios físicos do mergulho, a medição da velocidade vertical constante (taxa de subida) passou a ser mensurada de forma direta e confiável pelo sensor de pressão MS5837. Como a variação brusca de pressão é a principal responsável pela doença descompressiva (Vann et al., 2011), o cálculo da taxa de subida baseado na pressão confere alto rigor científico e adequação funcional ao monitoramento preventivo embarcado.

O uso de alertas táteis em conjunto com indicações visuais demonstra ser uma lógica promissora para garantir a percepção do usuário mesmo em águas de baixa visibilidade. Dentre as limitações observadas, destaca-se a sensibilidade do sensor MAX30102 a ruídos gerados pelo movimento do corpo e da água (Konieczny et al., 2022), o que exigirá a evolução contínua dos filtros digitais no firmware. Para trabalhos futuros, sugere-se o teste sistemático de estanqueidade da estrutura em câmara hiperbárica sob pressões reais de mergulho, além da implementação de modelos de aprendizado de máquina para reconhecimento de padrões de estresse do mergulhador.

Conclusão

O desenvolvimento e a avaliação preliminar comprovaram a viabilidade técnica de construir um protótipo de sistema embarcado, de caráter experimental, voltado ao auxílio no monitoramento do mergulho recreativo. A integração do microcontrolador ESP32 aos sensores MAX30102, MPU-6050 e ao sensor de pressão MS5837 demonstrou a capacidade de realizar a leitura local e síncrona dos parâmetros, possibilitando a emissão de alertas multissensoriais imediatos em cenários de simulação de risco, incluindo subidas descontroladas em direção à superfície.

Ademais, o encapsulamento apresentou ausência de infiltrações nos testes preliminares realizados em baixa profundidade. Portanto, o sistema representa uma prova de conceito promissora para tecnologias de assistência aquática. Como continuidade, trabalhos futuros devem focar na calibração dos limiares clínicos, no aperfeiçoamento da filtragem de ruídos do sensor óptico durante a natação e no teste de estanqueidade sob maiores pressões.

Referências

GOMES, Mauro. Cuidados respiratórios com mergulho autônomo. Dr. Mauro Gomes, 2026. Disponível em: https://www.drmaurogomes.com.br/tire-duvidas/cuidados-respiratorios-com-mergulho-autonomo-29. Acesso em: 8 set. 2026.

KIBOUB, F. Z. et al. Using Underwater Pulse Oximetry in Freediving to Extreme Depths. Frontiers in Physiology, v. 12, p. 651629, 2021.

KONIECZNY, E. et al. Wearable Pulse Oximeter for Swimming Pool Safety. Sensors, v. 22, n. 10, p. 3823, 2022.

PARAGON DIVE GROUP. How to Avoid Decompression Sickness: Tips for Safe Ascents. 2026. Disponível em: https://www.paragondivestore.com. Acesso em: 8 set. 2026.

VANN, R. D. et al. Decompression illness. The Lancet, v. 377, n. 9760, p. 153-164, 2011.

BOVE, A. A.; DAVIS, J. C. Bove and Davis' diving medicine. 4. ed. Philadelphia: Saunders, 2003.

NOAA. NOAA Diving Manual: Diving for Science and Technology. 5. ed. Best Publishing Company, 2013.