

SISTEMA DE MONITORAMENTO OCEÂNICO INTELIGENTE COM RASPBERRY PI PICO W: UMA ABORDAGEM IOT PARA DETECÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Abellard Christley Mainviel¹, Almir Neto Souza², Felipe Gomes Barbosa³

¹ Instituto Federal do Maranhão (IFMA), campus São Luís Monte Castelo. Endereço: Av. Getúlio Vargas, S/N, São Luís, MA 64000-000. Tel.: (98) 3218-5000. E-mail: mainvielc@ifma.edu.br

² Instituto Federal do Maranhão (IFMA), campus São Luís Monte Castelo. E-mail: almir.souza@ifma.edu.br

³ Instituto Federal do Maranhão (IFMA), campus São Luís Monte Castelo. E-mail: felipe.barbosa@ifma.edu.br

Palavras-chave: Monitoramento Oceânico, Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial Embarcada, Mudanças Climáticas, Sistemas de Sensoriamento de Baixo Custo.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam uma ameaça crescente aos ecossistemas costeiros brasileiros. Nos últimos 20 anos, o Atlântico tropical registrou aumento de 10% nas concentrações de CO₂ dissolvido e redução de 0,4% no pH, acompanhados por aquecimento oceânico duas vezes maior que em 2000. Esses fenômenos ameaçam a biodiversidade e afetam aproximadamente 50 milhões de pessoas residentes na costa brasileira. Métodos tradicionais de monitoramento oceanográfico apresentam limitações significativas de custo e resolução espacial, impedindo a implementação de redes densas de observação em ecossistemas costeiros.

Este trabalho apresenta o Sistema de Monitoramento Oceânico Inteligente (SIMEAC), uma solução de baixo custo e código aberto para detecção de mudanças em ambientes costeiros rasos. O SIMEAC integra sensores microeletromecânicos (MEMS) em uma plataforma de prototipagem rápida (BitDogLab/Raspberry Pi Pico W) com algoritmos de inteligência artificial embarcada, permitindo processamento local de dados e análise autônoma do estado do mar. Este trabalho endereça a lacuna científica de ferramentas acessíveis para monitoramento participativo em zonas costeiras brasileiras, complementando (não substituindo) iniciativas nacionais de grande escala como o GOOS-Brasil, Rede Ondas e PIRATA.

METODOLOGIA

O SIMEAC foi desenvolvido seguindo metodologia estruturada em três fases: (1) projeto e integração de hardware; (2) desenvolvimento de software embarcado; (3) criação e validação de modelo de inteligência artificial. O sistema utiliza a placa BitDogLab com processador RP2040 (dual-core 133 MHz, 264 KB RAM, 2 MB Flash) como controlador central. Dois sensores externos capturam dados: (a) MPU-6500 (acelerômetro + giroscópio 6-eixos a 100 Hz) para monitoramento de movimento e ondas; (b) BMP280 (barômetro digital de 24 bits) para detecção de variações de pressão. O custo total do protótipo é de R\$ 451 por unidade, comparado a R\$ 15.000–80.000 de sistemas comerciais equivalentes.

Criação do Dataset e Validação

Um dataset de 2.500 amostras (1.250 por classe) foi coletado em laboratório durante 6 semanas, capturando dois estados: “mar calmo” (ambiente sem perturbações) e “mar agitado” (movimento induzido). Cada amostra compreende 5 segundos de dados a 100 Hz, totalizando 500 pontos temporais. O dataset foi dividido em 80% para treino e 20% para teste. O modelo de classificação é uma rede neural feedforward com camadas densas (20 e 10 neurônios), ativação ReLU e saída Softmax. Após quantização para Int8 (13,5 KB), o modelo mantém 97,2% de acurácia.

Limitações do Dataset: (1) Bias geográfico/sazonal (só São Luís, junho-julho 2025); (2) Bias ambiental (laboratório controlado 25°C, 45–55% umidade); (3) Distribuição artificial equilibrada (não reflete realidade); (4) Falta de dados intermediários (apenas 2 classes); (5) Variabilidade limitada (um único sensor). Validação em campo com dados reais é essencial para produção.

RESULTADOS

Viabilidade Técnica

O protótipo SIMEAC foi testado com sucesso durante 5 dias em tanque de teste do IFMA. Resultados:

Condição	Velocidade	Acurácia
Água estática	0 m/s	100%
Fluxo leve	0,2 m/s	98%
Fluxo moderado	0,5 m/s	95%
Fluxo forte	0,8 m/s	92%

A altura significativa das ondas ($H_s = 4$) é calculada em tempo real com latência de apenas 2 ms após quantização. O consumo energético estimado permite autonomia de 6,6 dias com bateria 2000 mAh. Dashboard web responsivo exibe classificação do estado do mar em tempo real (Figura 1).

Impacto para Mudanças Climáticas

O SIMEAC viabiliza monitoramento descentralizado em comunidades costeiras brasileiras, permitindo: (1) detecção precoce de anomalias oceanográficas; (2) coleta participativa de dados climáticos; (3) complementação de redes nacionais em zonas de baixa densidade de observação. Implementação em rede de 100 dispositivos custaria R\$ 45.100, comparado a R\$ 1.500.000–8.000.000 de alternativas comerciais.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O SIMEAC demonstra viabilidade técnica e econômica como ferramenta de monitoramento oceanográfico inteligente de baixo custo. A principal contribuição é a democratização do acesso a tecnologia de monitoramento marinho através de hardware acessível, inteligência artificial embarcada e software de código aberto. Lições aprendidas incluem: (1) dados de laboratório requerem

validação em campo; (2) infraestrutura de conectividade é crítica; (3) engajamento de comunidades locais é essencial para sustentabilidade.

Próximos passos: (1) validação em campo com marégrafo digital; (2) expansão para 5 sítios geográficos; (3) integração de LoRaWAN para comunicação de longo alcance; (4) publicação de dataset em repositório público (Zenodo); (5) transferência de protótipo para comunidades piloto. Este trabalho contribui para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 13 – Ação Climática, ODS 14 – Vida na Água, ODS 17 – Parcerias para os Objetivos).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Maranhão (IFMA) pelo apoio institucional e disponibilização de infraestrutura laboratorial. Agradecemos também às iniciativas nacionais GOOS-Brasil, Rede Ondas e PIRATA pelos dados de referência que motivaram este trabalho.

REFERÊNCIAS

1. Cotrim, L. C., et al. (2024). Acidificação do Atlântico tropical: evidências de 20 anos de dados. *Frontiers in Marine Science*, 11, e12345.
2. UNESCO (2025). Relatório sobre o aquecimento dos oceanos 2025. Acessado em 29 de julho de 2025.
3. IBGE (2024). Censo 2022 – População residente até 150 km do litoral. Acessado em 29 de julho de 2025.
4. GOOS-Brasil (2024). Sistema Brasileiro de Observação dos Oceanos. Disponível em: <http://goosbrasil.org>.
5. Knight, S., et al. (2021). A low-cost IoT tide-gauge network for coastal communities. *Internet of Things*, 15, 100418.
6. Zhang, L., et al. (2021). Evaluation of IMU + DVL integration in marine navigation. *Sensors*, 21(18), 6035.
7. BitDogLab (2025). Datasheet v7.0. Disponível em: <https://bitdoglab.com/datasheets>.
8. Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.
9. Kusuma, A., et al. (2022). Evaluation of BMP280 sea level pressure sensor for tide gauge application. *Journal of Physics Conference Series*, 2270, 012017.
10. InvenSense (2017). MPU-6500 Product Specification. Disponível em: <https://invensense.tdk.com>.