MONITORAMENTO REMOTO DA QUALIDADE DA ÁGUA: ESTAÇÕES FLUTUANTES DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Rafael Francis Leite[(1)]
Engenheiro Eletricista, Eng. de Segurança do Trabalho, Bacharel em Ciências Contábeis, Especialista Engenharia de Produção, Especialista em Saneamento Ambiental, Mestrando em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar
Alexandre Claus[(2)]
Agrônomo, Administrador, Mestre em Tecnologias de Bioprodutos Agroindustriais, Doutor em Produção Vegetal – UFPR
Ana Carolina Pires Moreira[(3)]
Geóloga, Eng. de Segurança do Trabalho, Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial. Doutoranda em Gestão Ambiental – Sanepar
Felipe Owczarzak De Mello E Silva[(4)]
Engenheiro Mecânico – Sanepar
Fernanda Janaina Oliveira Gomes Da Costa[(5)]
Engenharia de Alimentos, Engenharia Química, Especialista em Saneamento Ambiental . Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Doutora em Engenharia de Alimentos – Sanepar

Endereço[(1)]**:** R. Engenheiros Rebouças, 1376, Rebouças, Curitiba, Paraná, Brasil - CEP 80215-900 - Brasil - Tel: +55 (41) 99908-0063 - e-mail: rfleite@sanepar.com.br

RESUMO

O monitoramento da qualidade da água vivencia uma transição de análises laboratoriais pontuais para sistemas inteligentes, alinhados ao conceito de Saneamento 5.0. Este trabalho analisa a implantação de plataformas flutuantes no Reservatório Alagados (PR), utilizando sondas multiparamétricas (EXO3) para coleta de dados em alta frequência. Avaliaram-se dois arranjos de engenharia: uma estrutura em "H" construída com PVC reaproveitado e uma Boia Circular Compacta dotada de sinalização náutica ativa, em conformidade com as diretrizes IALA e NORMAM-601. Os resultados demonstram que o sistema atua como sentinela tecnológica, registrando variações físico-químicas a cada 15 minutos. Economicamente, a engenharia de baixo custo aplicada reduziu o CAPEX estrutural perante as soluções industriais de mercado, minimizando barreiras à expansão da rede de vigilância. Além disso, a automação reduziu o OPEX proporcionando menores deslocamentos logísticos, mitigando riscos ocupacionais e emissões de carbono. A automação das leituras *in situ* também otimiza o OPEX e mitiga riscos ocupacionais. Conclui-se que a solução pode fortalecer a resiliência operacional e a segurança hídrica. Como desenvolvimento futuro, prevê-se a integração de sistemas de telemetria para a transmissão remota de dados.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento Remoto, Saneamento 5.0, Segurança Hídrica

INTRODUÇÃO

A gestão sustentável dos recursos hídricos representa um dos maiores desafios contemporâneos para a saúde pública e a preservação ambiental, especialmente em regiões de intensa atividade antropogênica. No estado do Paraná, a implementação deste projeto fundamenta-se em frentes estratégicas voltadas para a inovação tecnológica e a segurança hídrica, buscando transitar de um modelo de monitoramento reativo para um ecossistema de inteligência ativa e autônoma.

Historicamente, o monitoramento da qualidade da água baseia-se em amostragens pontuais e análises laboratoriais que, embora normativamente necessárias, funcionam como "fotografias estáticas" de um corpo hídrico. Essa metodologia apresenta limitações críticas, como a incapacidade de capturar eventos transientes de poluição ou florações algais súbitas, o que compromete a agilidade na tomada de decisões operacionais em Estações de Tratamento de Água (ETA) e Esgoto (ETE). Em procedimentos convencionais, os métodos de amostragem manual costumam ser caracterizados como processos laboriosos, onerosos e incapazes de capturar variações dinâmicas de curto prazo devido à sua natureza descontínua.

O Saneamento 5.0 representa uma evolução paradigmática na gestão dos recursos hídricos ao integrar o avanço tecnológico da Indústria 4.0, como a Internet das Coisas (IoT), a inteligência de borda (*edge computing*) e o aprendizado de máquina a uma abordagem centrada no ser humano e no desenvolvimento sustentável (Sociedade 5.0) (SENNA *et al.*, 2021) .

A utilização de sondas multiparamétricas aliada à inteligência de borda possibilita o monitoramento contínuo dos recursos hídricos, alinhando-se aos princípios do Saneamento 5.0. O uso dessa tecnologia justifica-se pela necessidade de uma gestão integrada que assegure a conformidade ambiental e a proteção de mananciais estratégicos para o abastecimento público, o lazer e a geração de energia. Ademais, além de aferir a eficiência no tratamento de efluentes, o sistema viabiliza a identificação proativa e *in situ* de contaminações químicas e biológicas.

Dessa forma, diante dos desafios apontados, o presente artigo propõe o desenvolvimento estrutural e uso de estações flutuantes de monitoramento de alta frequência para ampliar a resiliência das redes hídricas perante os impactos do crescimento urbano e dos eventos climáticos extremos. A hipótese é que a elevada resolução temporal atue como um registro contínuo capaz de identificar contaminações episódicas normalmente invisíveis aos métodos tradicionais de amostragem. Em contraste com os sistemas fixos e centralizados, o arranjo móvel e flutuante aqui apresentado viabiliza o diagnóstico em áreas de difícil acesso, garantindo uma cobertura espacial e temporal contínua em uma maior extensão do corpo hídrico.

OBJETIVO

Esta pesquisa tem como objetivo geral desenvolver, implantar e validar diferentes protótipos de estação flutuante autônoma de monitoramento hídrico contínuo e de baixo custo, avaliando sua viabilidade técnica e econômica para a gestão de mananciais estratégicos no estado do Paraná.

- Desenvolver e aplicar a engenharia de baixo custo de protótipos de Estações Flutuantes autônomas e sustentáveis;
- Realizar o monitoramento contínuo em mananciais estratégicos do estado do Paraná;
- Avaliar a viabilidade econômica (CAPEX/OPEX) desse sistema de alta frequência *in situ* frente aos métodos tradicionais de amostragem laboratorial.

METODOLOGIA UTILIZADA

A abordagem metodológica e a concepção da arquitetura das Estações Flutuantes de Monitoramento fundamentam-se estritamente nos preceitos do Saneamento 5.0. Esse paradigma transcende a mera digitalização convencional ao convergir automação avançada, economia circular através do reaproveitamento de materiais e inteligência distribuída para promover uma gestão preditiva, contínua e ativa dos recursos hídricos frente aos impactos do crescimento urbano e dos eventos climáticos extremos.

No escopo deste projeto, a infraestrutura foi projetada para assegurar uma vigilância contínua, autônoma e de alta resolução temporal da qualidade da água, apoiando-se em três pilares estruturais interdependentes: instrumentação analítica de alta precisão, inteligência de borda (*edge computing*) com armazenamento local de dados (*data logging*), e autossuficiência energética baseada em alimentação fotovoltaica. Essa configuração prioriza a amostragem inteligente *in situ*, viabilizando o agrupamento de séries históricas robustas e consistentes capazes de capturar variações dinâmicas de curto prazo e eventos transientes de poluição que passariam despercebidos em amostragens manuais convencionais. Embora o processamento primário ocorra localmente nesta etapa experimental, o arranjo estabelece a base física e lógica para a futura integração de sistemas de telemetria e transmissão remota de dados em tempo real.

A caracterização dinâmica da matriz hídrica utiliza uma sonda multiparamétrica modelo EXO3 (Xylem) da marca YSI, configurada para o registro autônomo de parâmetros físico-químicos e bio-ópticos essenciais, incluindo temperatura, pH, potencial de oxirredução (ORP), oxigênio dissolvido (OD), condutividade, salinidade, turbidez, sólidos totais dissolvidos (STD) e indicadores como ficocianina, clorofila e nitrato. Operando em conformidade com as metodologias de referência do *Standard Methods* (APHA, 2017), o sistema adota uma frequência de amostragem de 15 minutos (96 medições diárias por parâmetro), o que converte diagnósticos pontuais em uma sentinela tecnológica ininterrupta.

A investigação concentrou-se no Reservatório Alagados, localizado na região dos Campos Gerais, no município de Ponta Grossa, Paraná (Figura 1). Por se tratar de um ativo de importância estratégica para o abastecimento público, o lazer e a geração de energia, o monitoramento adotou um enfoque analítico e preventivo de alta resolução em quatro pontos de amostragem S1 (Captação), S2 (Iate), S3 (Pauleira) e S4 (Ponte). Essa relevância justifica a implementação de uma vigilância ininterrupta por meio de estações de alta frequência ao longo do corpo hídrico.

Figura 1 - Localização dos pontos de monitoramento contínuo em Ponta Grossa/PR



Fonte: Google/O autor 2026.

A caracterização dinâmica da matriz hídrica foi conduzida ininterruptamente durante 30 dias contínuos por meio de uma sonda multiparamétrica modelo EXO3 (Xylem) (Figura 2a e 2b), configurada para o registro autônomo de temperatura, pH, potencial de oxirredução (ORP), oxigênio dissolvido (OD), condutividade, salinidade e turbidez. Operando em conformidade com as metodologias de referência para análise de água (APHA, 2017), o sistema adotou uma frequência de amostragem de 15 minutos (96 medições diárias por parâmetro), atestando a eficiência da alimentação fotovoltaica e a integridade da inteligência de borda (*edge computing*) com armazenamento local de dados (*data logging*). Essa alta resolução temporal e o processamento primário no ponto de amostragem converteram diagnósticos pontuais em séries históricas de alta frequência, atuando como uma sentinela tecnológica capaz de capturar eventos transientes de poluição, variações dinâmicas de curto prazo e subsidiar a tomada de decisão preditiva.

Figura 2a - Sonda multiparâmetros modelo EXO3, Figura 2b Detalhe Sensores Sonda Multiparâmetros modelo EXO3

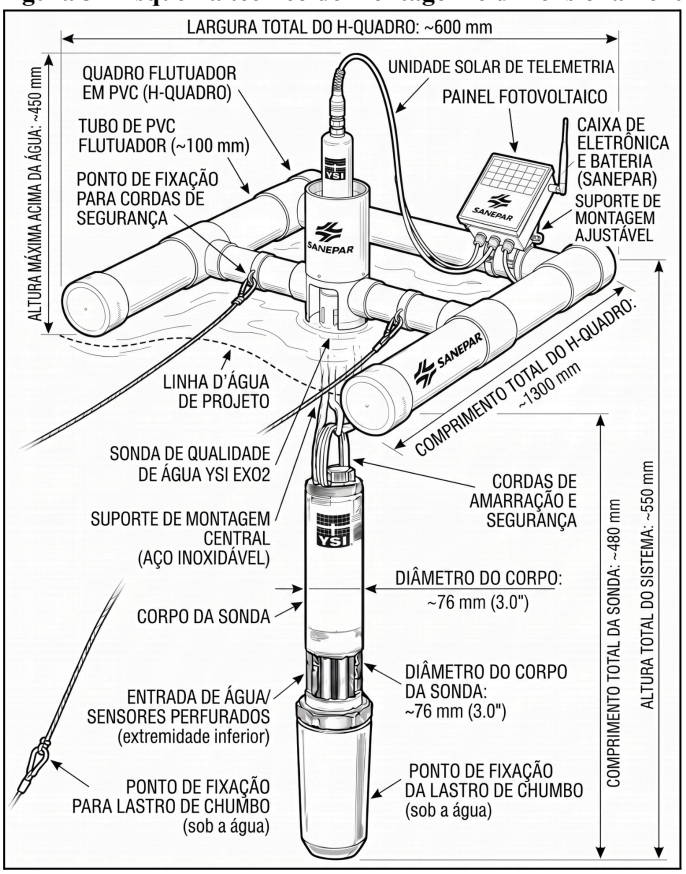


Fonte: 2a) Clean, 2016 ; 2b) O autor, 2026.

O desenvolvimento dos protótipos das Estações Flutuantes foi concebido como uma alternativa móvel e versátil para complementar as infraestruturas fixas tradicionais de monitoramento, viabilizando a vigilância de trechos habitualmente desassistidos.

Para avaliar diferentes cenários operacionais, foram projetados e construídos dois arranjos estruturais autônomos. O Sistema 1 (Figura 3) consiste em uma estrutura flutuante em formato de "H", concebida sob os preceitos da economia circular. Sua geometria foi confeccionada inteiramente a partir de sobras de tubos de PVC, os quais atuam simultaneamente como chassi flutuante e invólucro de proteção para os componentes eletrônicos.

Figura 3 - Esquema técnico de montagem e dimensionamento do Sistema 1 em formato de "H".



Fonte: Google/Adaptado pelos os autores 2026.

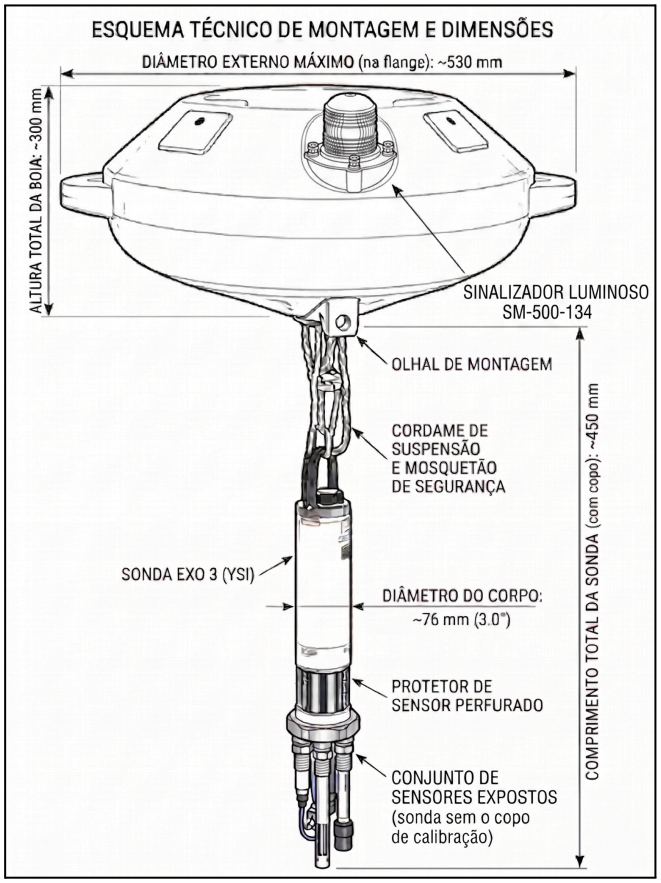
O Sistema 2 (Figura 4), consiste em uma boia circular compacta de padrão comercial, projetada para conformidade náutica e segurança patrimonial. A estrutura é formada por um flutuador em polietileno de alta densidade (HDPE) na cor amarela, equipado com painel fotovoltaico e sinalizador luminoso ativo (modelo SM-500-134) em conformidade com as normas da NORMAM e da IALA.

Para o suporte da sonda analítica EXO3, utilizou-se um olhal de montagem na parte inferior central do flutuador, conectado a um conjunto de cordame com mosquetão de segurança para a transferência de carga mecânica. Esse arranjo rebaixa o centro de gravidade na coluna d'água e mantém os sensores em um invólucro perfurado de fluxo livre, assegurando o contato ininterrupto da amostra de água com os eletrodos.

Essa evolução estrutural atende às exigências da Autoridade Marítima no que tange ao enquadramento dos equipamentos como Sistemas de Aquisição de Dados Oceânicos (ODAS). A conformidade normativa é regida pela NORMAM-601/DHN, que classifica a estação como um "Sinal Náutico Flutuante", exigindo

características específicas de sinalização visual e luminosa para garantir a segurança da navegação diurna e noturna.

Figura 4 - Esquema Técnico de Montagem e Dimensionamento



Fonte: Google/O autor 2026.

A avaliação de viabilidade financeira fundamentou-se na mensuração do impacto operacional ao longo de 12 meses, tomando como referência um ponto estratégico de amostragem no Reservatório Alagados. Para subsidiar o planejamento e garantir a replicabilidade do estudo, estabeleceu-se um balizador econômico comparativo entre os sistemas flutuantes. A compilação das faixas de investimento inicial (CAPEX) dos sistemas comerciais baseou-se em cotações junto a fabricantes de instrumentação analítica e integradores de tecnologia entre 2025 e 2026. Este banco de dados foi suplementado por consultas a editais de licitação e atas de registro de preços vigentes nos setores de saneamento e monitoramento oceanográfico/limnológico, viabilizando a categorização dos custos segundo o ambiente de aplicação e o nível de automação requerido.

RESULTADOS OBTIDOS

Desenvolvimento e Instalação dos Protótipos

A implementação e a implantação *in situ* dos dois protótipos de Estações Flutuantes confirmaram a viabilidade técnica e a eficiência operacional dos arranjos projetados, demonstrando que o monitoramento móvel e autônomo é uma alternativa robusta para complementar as redes fixas de vigilância hídrica. Ambos os sistemas foram instalados com sucesso e mantiveram bom funcionamento contínuo durante o período de avaliação operacional.

O Sistema 1 com estrutura em "H" (Figuras 5 e 6), teve o protótipo construído com foco na economia circular, demonstrou excelente flutuabilidade e estabilidade hidrodinâmica. A reaplicação dos tubos de PVC reaproveitados cumpriu com eficácia a dupla função estrutural e protetiva onde os tubos mantiveram a

estanqueidade dos componentes eletrônicos internos contra intempéries e respingos, ao mesmo tempo em que a geometria em "H" conferiu equilíbrio em relação às marolas e correntes locais. A solução provou ser de baixíssimo custo, altamente funcional e de simples manutenção.

Figura 5 - Protótipo da estação flutuante em "H" antes da instalação.



Fonte: O autor 2026.

Figura 6 - Protótipo da estação flutuante em "H" em ambiente operacional.



Fonte: O autor 2026.

Já o Sistema 2 de Bóia Circular HDPE (Figuras 7 e 8) teve o arranjo baseado na boia comercial amarela em HDPE e apresentou conformidade rigorosa com os requisitos náuticos e operacionais. A fixação da sonda analítica EXO3 pelo olhal inferior central, aliada ao sistema de cordame e mosquetão de segurança, garantiu uma distribuição de peso eficiente, rebaixando o centro de gravidade e aumentando a estabilidade do conjunto.

O invólucro perfurado permitiu a circulação contínua do fluxo de água pelos eletrodos sem comprometer a integridade física dos sensores, mantendo a sonda sempre submersa na profundidade ideal de amostragem.

Figura 7 - Estrutura da Bóia Circular Compacta e disposição do suporte inferior.



Fonte: O autor 2026.

Figura 8 - Validação da Bóia Circular Compacta e sinalização náutica ativa em campo.



Fonte: O autor 2026.

Ambos os sistemas operaram de forma totalmente autônoma. No Sistema 2, a integração do painel fotovoltaico com o sinalizador luminoso SM-500-134 garantiu a visibilidade noturna contínua do equipamento, cumprindo com eficácia as exigentíssimas normas de segurança da NORMAM e da IALA. Esse fator foi decisivo para a segurança patrimonial dos sensores e para a prevenção de acidentes com embarcações de pequeno e médio

porte no trecho monitorado. O Sistema 2 foi projetado para incorporar requisitos rígidos de segurança patrimonial e conformidade com o balizamento aquático, agregando sistemas de sinalização ativa diretamente ao topo do chassi flutuante (Figura 8).

A autossuficiência energética foi assegurada pela instalação de um painel fotovoltaico na carenagem superior, garantindo o funcionamento contínuo dos sistemas de aquisição de dados e sinalização em áreas remotas. Este arranjo consolida o uso de tecnologias de baixo custo integradas a sensores de alta precisão, como as sondas EXO3, sem interferências eletromagnéticas entre os sistemas de balizamento e de registro analítico.

Nos protótipos a interface entre os sensores e os módulos de transmissão/armazenamento de dados funcionou sem interrupções registradas. O monitoramento contínuo viabilizou a captura de dados em trechos que anteriormente permaneciam sem cobertura pelas estações fixas, validando a mobilidade e a versatilidade do projeto para aplicações em diferentes corpos d'água e cenários ambientais.

Monitoramento da qualidade da água

Durante o período experimental de 30 dias contínuos, a rotina de amostragem de alta frequência totalizou 2.880 leituras individuais por parâmetro em cada ponto monitorado. Os valores médios e desvios-padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos estão consolidados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados do monitoramento do corpo hídrico.

Parâmetro	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Temperatura (ºC)	16,57±0,52	16,27±0,90	15,97±1,12	15,72±0,99
pH	7,42±0,08	7,34±0,13	6,61±0,12	7,15±0,10
ORP (mV)	376,12±0,12	195,92±16,52	242,79±42,57	428,01±70,22
OD (mg/L)	7,52±0,48	7,20±0,55	5,85±0,75	5,45±0,86
Condutividade (µS/cm)	57,24±1,62	59,11±2,51	64,96±3,31	66,05±5,18
Salinidade	0,03±0,00	0,03±0,00	0,03±0,00	0,03±0,00
Turbidez (NTU)	12,27 ± 1,63	N/D*	18,87 ± 5,13	21,67 ± 11,51

* Erro por falha instrumental

O Oxigênio Dissolvido (OD) apresentou um decréscimo contínuo e expressivo ao longo do gradiente espacial do rio, caindo de 7,52 ± 0,48 mg/L no Ponto 1 para 5,45 ± 0,86 mg/L no Ponto 4. Esse padrão sugere um aporte progressivo de matéria orgânica à medida que o rio flui para a jusante. O consumo do oxigênio molecular pelos microrganismos decompositores supera a taxa de reaeração atmosférica.Os valores de temperatura médios registrados no período no Ponto 1 foram de 16,57 ± 0,52 °C, reduzindo no Ponto 2 para 16,27 ± 0,90 °C e atingindo 15,97 ± 1,12 °C no Ponto 3, até alcançar o valor mais baixo no Ponto 4 de 15,72 ± 0,99 °C. A redução da temperatura em direção ao Ponto 4 pode correlacionar-se com o maior sombreamento da vegetação ou com a entrada de afluentes de cabeceira com temperaturas ligeiramente mais baixas

Os valores de ORP médios registrados no período no Ponto 1 foram de 376,12 ± 0,12 mV, reduzindo no Ponto 2 para 195,92 ± 16,52 mV e no Ponto 3 para 242,79 ± 42,57 mV e atingindo o valor mais alto no Ponto 4 de 428,01 ± 70,22 mV. A oscilação no Ponto 3 pode estar relacionado ao ambiente em transição, onde há turbulência e gera instabilidade no potencial eletroquímico. Os valores de pH médios registrados no período no Ponto 1 foi de 7,42 ± 0,08, reduzindo no Ponto 2 para 7,34 ± 0,13 e atingindo o valor mais baixo no Ponto 3 6,61 ± 0,12, antes de retornar a 7,15 ± 0,10 no Ponto 4. A queda acentuada do pH no Ponto 3 pode correlacionar-se com o decréscimo do OD no mesmo local. Durante a decomposição microbiana da matéria orgânica, há liberação de dióxido de carbono, que reage com a água formando ácido carbônico e reduz o pH. O leve aumento no Ponto 4 pode indicar um efeito de tamponamento natural ou diluição por afluentes com maior alcalinidade.

A condutividade elétrica aumentou gradativamente de montante para jusante, variando do Ponto 1 de 57,24 ± 1,62 µS/cm até 66,05 ± 5,18 µS/cm no Ponto 4. Esse aumento indica possivelmente um acúmulo contínuo de íons dissolvidos (como nitratos, fosfatos, sódio e cloretos), decorrentes de efluentes domésticos, agrícolas ou do escoamento superficial urbano. O maior desvio padrão no Ponto 4 pode estar sinalizando oscilações

temporais ou lançamentos pontuais e descontínuos de poluentes. Já a salinidade permaneceu praticamente inalterada em todo o percurso (~0,0300), indicando estabilidade desse parâmetro.

A turbidez apresentou uma tendência de elevação, onde o Ponto 1 apresentou 12,27 ± 1,63 NTU , o Ponto 3 18,87 ± 5,13 NTU e o Poto 4 21,67 ± 11,51 NTU, indicando a presença de sólidos em suspensão. O valor negativo reportado no Ponto 2 configura uma falha instrumental ou de calibração do turbidímetro, dessa forma, os dados foram desconsiderados.

A sensibilidade diagnóstica das plataformas flutuantes foi ratificada por meio da avaliação do ciclo temporal obtido ao longo do Reservatório Alagados, constatando-se uma clara flutuação nictemeral na temperatura da água e nos níveis de Oxigênio Dissolvido (OD) nos quatro pontos monitorados (S1 a S4). Durante o período da tarde (~14:00h–18:00h), influenciados pelo incremento térmico e pelo pico de radiação solar que estimulam a fotossíntese fitoplanctônica, os índices de OD atingiram patamares máximos diários no corpo do reservatório (ultrapassando 8,5 mg/L em S1 e S2, com picos pontuais de até 9,65 mg/L). Em contrapartida, durante a noite e ao amanhecer (~07:00h–09:00h), a respiração biológica promoveu uma redução progressiva do oxigênio, registrando valores mínimos médios de 7,24 mg/L na Captação (S1) e 5,24 mg/L na Ponte (S4).

O aparato tecnológico registrou com precisão eventos de variação abrupta na turbidez, destacadamente no ponto S4 (Ponte - Rio Pitangui/Jutuba), onde a turbidez saltou de uma linha de base média de 19,18 FNU para um pico transitório de 100,81 FNU entre os dias 15 e 16 de junho. Esse pico episódico decorreu do carreamento de escoamento superficial por chuvas na bacia hidrográfica, tendo sido observado um gradiente de decantação natural ao longo do reservatório, de modo que a turbidez no ponto de Captação (S1) manteve-se controlada em uma média de 12,27 FNU (máxima de 19,61 FNU).

Ao longo do gradiente espacial do rio, observou-se uma redução do oxigênio dissolvido do Ponto 1 para o Ponto 4, evidenciando possivelmente o aporte progressivo de matéria orgânica e um consumo microbiano superior à reaeração atmosférica. Acompanhando essa tendência, a temperatura apresentou um declínio ao longo do percurso, o que pode ser atribuído ao maior sombreamento pela vegetação ciliar ou à entrada de afluentes mais frios. Por sua vez, o potencial de oxirredução exibiu variações ao longo do trajeto, com uma queda intermediária seguida por uma recuperação na porção final, destacando-se uma instabilidade no trecho do Ponto 3 associada a um ambiente de transição e turbulência.

O pH registrou uma queda no Ponto 3, que pode ser correlacionado com o consumo de oxigênio e a liberação de dióxido de carbono durante a decomposição orgânica, retornando a níveis mais neutros no trecho final por provável efeito de tamponamento ou diluição. Em contrapartida, a condutividade e a turbidez apresentaram tendências de elevação no Ponto 4, que pode estar relacionado o acúmulo gradual de íons dissolvidos e a maior presença de sólidos em suspensão decorrentes de efluentes e do escoamento superficial, com a ressalva de que os dados de turbidez do segundo ponto foram desconsiderados por falha instrumental. Por fim, a salinidade apresentou estabilidade ao longo de todo o percurso.

Viabilidade Econômica

Os resultados preliminares confirmam a eficácia dos sistemas como uma sentinela tecnológica de alta confiabilidade na detecção de variações ambientais repentinas. Em termos de investimento de capital (CAPEX), o desenvolvimento Sistema 1 com estrutura em "H" (Figuras 6 e 7) apresentou elevada eficiência de custos, pois foi construído com um montante inferior a R$ 1.000,00, empregando exclusivamente materiais de fácil acesso no comércio local como tubos e conexões PVC de 100 mm, adesivos de vedação estanque, fixadores em aço inoxidável, mosquetões e cordames para ancoragem da sonda. Quando comparada ao Sistema 2 (bóia circular em HDPE industrial) disponível no mercado, cujos valores variam entre R$8.000,00 e R$25.000,00, a estrutura customizada proporcionou uma redução de custos entre 87,5% e 96,0% no item de suporte.

Como a sonda multiparamétrica responde pela maior fração do CAPEX (variando de R$ 25.000,00 a R$ 65.000,00), a expressiva redução no custo das infraestruturas periféricas minimiza as barreiras financeiras de entrada, viabilizando a escalabilidade e a ampla expansão territorial da rede de vigilância hídrica.

Ademais, a automação do monitoramento permitiu uma redução do gasto operacional (OPEX), comprovada pela análise comparativa entre o modelo tradicional de amostragem manual e o sistema automatizado de alta

frequência. Para fins de validação econômica, mensurou-se o impacto operacional considerando a rotina de monitoramento de um ponto estratégico no Reservatório Alagados ao longo de um período de 12 meses:

- Cenário Tradicional (Amostragem Manual Semanal): Requer deslocamentos semanais de uma equipe técnica composta por dois operadores, utilizando veículo utilitário 4x4 (percurso médio de 80 km por visita) e embarcação, perfazendo 52 campanhas anuais. O OPEX anual estimado para esse modelo que consolida combustível, depreciação veicular, horas-homem (HH) de amostragem e deslocamento, insumos de amostragem e análises laboratoriais de rotina totaliza R$ 135.200,00/ano (equivalente a R$ 33.800,00 por ponto/ano).

- Cenário Automatizado (Estação Flutuante com Inspeção Mensal): O custo operacional restringe-se às rotinas de manutenção preventiva, limpeza de bioincrustação (fouling) e calibração/validação dos sensores. Com isso, a frequência de visitas a campo reduz-se para escala mensal (12 viagens/ano), mantendo-se a mesma logística de apoio (dois operadores, veículo 4x4 e embarcação).O OPEX anual do sistema automatizado — contemplando insumos de calibração, manutenção fotovoltaica, validações de bancada e HH de inspeção é estimado em R$ 40.800,00/ano (equivalente a R$ 10.200,00 por ponto/ano).

Essa transição representa uma economia anual direta de R$ 94.400,00 para o conjunto dos quatro pontos monitorados (R$ 23.600,00 por ponto/ano), o que equivale a uma redução de 69,8% no OPEX operacional e logístico. Além disso, a diminuição de 52 para 12 viagens anuais proporciona uma redução de 76,9% nas emissões de carbono associadas ao transporte terrestre e aquático, além de mitigar significativamente a exposição contínua das equipes a riscos ocupacionais em campo.

Tabela 1 - Demonstrativo comparativo de OPEX anual estimado por ponto de monitoramento (Amostragem Manual Semanal ou Sistema Flutuante)

Custo Operacional	Modelo Tradicional	Modelo Automatizado	Premissas e Considerações
Logística de Deslocamento	R$ 31.200,00	R$ 7.200,00	Redução de 77% nos deslocamentos rodoviários e navegação
Horas-Homem (HH)	R$ 41.600,00	R$ 9.600,00	R$ 800,00/visita: Diária técnica completa para 2 operadores (~9h/dia incluindo trânsito rodoviário, navegação entre os 4 pontos e amostragem/inspeção
Insumos de Coleta / Manutenção	10.400,00	R$ 14.400,00	Tradicional: R$ 50,00/ponto x 4 pontos x 52 semanas. Automatizado: R$ 300,00/ponto/mês x 4 estações x 12 meses (soluções de calibração, reposição e anti-fouling).
Análises Laboratoriais / Calibração	R$ 52.000,00	R$ 9.600,00	Tradicional: Pacote 7 parâmetros (R$ 250,00 x 4 pontos x 52 semanas). Automatizado: Validação/Aferição mensal (R$ 200,00 x 4 pontos x 12 meses).
Opex Total Anual	**R$ 135.200,00**	**R$ 40.800,00**	**Economia global de R$ 94.400,00/ano (~70% de redução no OPEX)**

Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base nos custos operacionais padronizados de monitoramento hídrico e manutenção de ativos.

As estimativas de custos analíticos apresentadas fundamentam-se nas tabelas públicas e referências de preços praticados por laboratórios universitários de referência (a exemplo do LPH/UFPR e do LASAM/UEM) e por laboratórios comerciais acreditados na ABNT NBR ISO/IEC 17025 pela Cgcre/Inmetro. As metodologias operacionais e de bancada seguem rigorosamente os ensaios padronizados do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMWW), compêndio internacional de referência para caracterização físico-química de águas e efluentes. Esse enquadramento normativo garante rastreabilidade metrológica, repetibilidade e validade legal aos laudos emitidos, refletindo os custos reais envolvidos em reagentes, insumos certificados, manutenção preventiva de bancada e amostragem de controle.

Sob a perspectiva do OPEX indireto evitado, o envio contínuo de dados possibilita que a Estação de Tratamento de Água (ETA) reaja preventivamente a variações bruscas de qualidade da água (ex.: picos de turbidez ou florações algais), otimizando a dosagem de insumos químicos de alto custo, como o Carvão Ativado Pulverizado (CAP) e coagulantes, evitando sobredosagens desnecessárias.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A validação operacional dos dois protótipos de Estações Flutuantes *in situ* comprovou a viabilidade técnica e a eficiência dos arranjos projetados, estabelecendo o monitoramento móvel e autônomo como uma alternativa robusta e complementar às redes fixas de vigilância hídrica. Durante o período de teste, ambos os sistemas demonstraram funcionamento estável e contínuo, com ressalva para a interrupção pontual do sensor de condutividade no Ponto 2. Essa dinâmica evidenciou soluções de engenharia distintas e eficazes para o monitoramento remoto de dados ambientais.

O Sistema 1, caracterizado por sua estrutura em "H" desenvolvida sob os preceitos da economia circular, destacou-se pela excelente flutuabilidade e estabilidade hidrodinâmica. O reaproveitamento de tubos de PVC desempenhou com sucesso um papel duplo, pois atuou como elemento estrutural flutuante e garantiu a segurança dos componentes eletrônicos contra intempéries.

Em contrapartida, o Sistema 2, concebido a partir de uma boia circular comercial em polietileno de alta densidade (HDPE), atendeu rigorosamente aos requisitos operacionais e às exigências de sinalização náutica. A fixação da sonda analítica EXO3 pelo olhal inferior central, integrada a um sistema de cordame com mosquetão de segurança, otimizou a distribuição de peso e rebaixou o centro de gravidade da estrutura, elevando sua estabilidade. O uso de um invólucro perfurado viabilizou o fluxo contínuo da água pelos eletrodos, mantendo a sonda na profundidade ideal de amostragem e protegendo fisicamente os sensores sem comprometer a precisão das leituras.

A autossuficiência energética e a segurança patrimonial representaram pontos centrais no desempenho de ambos os protótipos. No Sistema 2, a inclusão de um painel fotovoltaico acoplado ao sinalizador luminoso SM-500-134 assegurou a operação ininterrupta da aquisição de dados e da sinalização visual noturna em locais remotos. Esse arranjo cumpriu integralmente as diretrizes de balizamento da NORMAM e da IALA, prevenindo colisões com embarcações e preservando a integridade dos equipamentos instalados. Vale destacar que a convivência entre os módulos de alimentação/sinalização e a instrumentação analítica ocorreu sem qualquer interferência eletromagnética na sonda EXO3.

Por fim, a comunicação contínua entre os sensores e os módulos de transmissão e armazenamento de dados confirmou a estabilidade do sistema de telemetria em campo, sem registros de falhas ou interrupções. A capacidade de gerar dados em tempo real em trechos historicamente desprovidos de estações fixas valida a mobilidade, a versatilidade e o elevado potencial de replicação dessas plataformas flutuantes para a gestão e o monitoramento de múltiplos corpos d'água.

O monitoramento dos parâmetros físico-químicos por meio das sondas analíticas foi realizado viabilizando a obtenção e o registro contínuo dos dados operacionais para cada um dos pontos amostrais monitorados. A instrumentação apresentou resposta eficiente em campo, permitindo mapear as variações espaciais e a dinâmica da qualidade da água ao longo do trecho avaliado.

Em síntese, as plataformas flutuantes desenvolvidas demonstraram alta eficiência técnica e viabilidade econômica, atuando como sentinelas tecnológicas para a gestão preventiva de mananciais. Destaca-se que o monitoramento in situ de alta frequência não substitui o controle laboratorial microbiológico e físico-químico exigido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 e Resolução CONAMA nº 357/2005, mas o complementa estrategicamente. Essa integração otimiza o OPEX, reduz a exposição de equipes a riscos ocupacionais e direciona as coletas manuais de forma assertiva diante de inconformidades operacionais.

A inovação operacional desse modelo reside na otimização dos fluxos de trabalho: enquanto o sistema automatizado monitora a estabilidade do manancial 24 horas por dia e pode ser programado para disparar alertas preditivos em caso de anomalias, a rotina de amostragens laboratoriais passa a ser direcionada de forma estratégica e pontual. Isso ocorre porque análises complexas não cobertas pela instrumentação *in situ*, como

parâmetros microbiológicos e biológicos (coliformes totais, *E. coli*, contagem de cianobactérias e toxinas algais) e físico-químicos específicos (metais pesados, DBO, DQO, compostos orgânicos, agrotóxicos, fósforo total e frações de nitrogênio), continuam dependendo da coleta manual e do processamento no laboratório central. Essa integração reduz coletas de rotina desnecessárias, otimizando investimentos operacionais (OPEX) e mitigando riscos ocupacionais para as equipes técnicas, garantindo maior resiliência aos sistemas de vigilância (FLORES-IWASAKI et al., 2025). Além disso, a flexibilidade técnica das plataformas flutuantes permite ajustar com agilidade a localização dos pontos, a frequência de leitura e os indicadores de interesse segundo as criticidades de cada bacia hídrica

Esse padrão de comportamento demonstra que a rede de plataformas flutuantes cumpriu integralmente seu papel de sentinela tecnológica. A alta resolução temporal capturou com precisão flutuações e picos episódicos que passariam completamente despercebidos em amostragem manual pontual e descontínua (semanal ou mensal). Essa recuperação e análise confirmatória garantem que o sistema operou conforme o planejado e está apto a subsidiar decisões operacionais em tempo real na captação.

As ações desenvolvidas no Reservatório Alagados visam identificar episódios de instabilidade hídrica, priorizando o reconhecimento antecipado de florações algais em múltiplos pontos da bacia (Figura 5). A alta resolução temporal obtida funciona como um registro contínuo e dinâmico, essencial para registrar eventos críticos de poluição e picos de contaminação episódicos que ocorrem nos intervalos das coletas manuais convencionais.

A escolha deste sítio experimental permitiu validar a transição estratégica de um modelo de monitoramento reativo para um ecossistema de inteligência ativa e autônoma, capaz de identificar variações dinâmicas de curto prazo e eventos transientes de poluição que métodos convencionais de amostragem manual, caracterizados por serem laboriosos e onerosos, falham em capturar. Adicionalmente, a infraestrutura implementada permite o acompanhamento ininterrupto de parâmetros bio-ópticos e físico-químicos, transformando propriedades ópticas da água em dados digitais acionáveis para a tomada de decisão estratégica.

A integração da sonda às Estações Flutuantes (Sistemas 1 e 2) manteve o conjunto de sensores constantemente exposto ao fluxo contínuo de amostragem sem acúmulo excessivo de bioincrustações (biofouling) nos eletrodos durante a janela de testes. Isso assegurou menor desvio instrumental e alta repetibilidade nas medições. A autonomia do equipamento eliminou os erros associados à degradação de amostras durante o transporte e armazenamento, consolidando o método como uma solução confiável e de baixo custo operacional para a vigilância ambiental contínua.

Na prática, indicadores como condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos atuam como ferramentas eficazes na detecção precoce de descargas irregulares ou alterações na mineralização da água (LEITE et al., 2024). Essa geração contínua de dados subsidia diagnósticos ambientais preditivos, apoia políticas públicas de gestão integrada e alinha a operação às metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 da ONU. Em suma, a modernização do monitoramento hídrico via tecnologias automatizadas amplia a capacidade de resposta a eventos extremos e fortalece a gestão adaptativa. A convergência entre inovação digital e rigor normativo consolida uma transição paradigmática rumo a um ecossistema de inteligência hídrica ativa, autônoma e sustentável.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

A modernização do monitoramento hídrico por meio de tecnologias inteligentes e automatizadas amplia significativamente a gestão adaptativa e a capacidade de resposta das companhias de saneamento perante eventos extremos de contaminação. A convergência entre o cumprimento rigoroso das normas nacionais e a inovação tecnológica sustentável ratifica a relevância de ecossistemas autônomos e digitalizados na preservação dos mananciais. Diante da eficácia técnica e da vantajosa relação custo-benefício observadas, recomenda-se a escala e a replicação do protótipo em PVC reciclado, visto que esta estratégia de baixo custo, fundamentada na economia circular, minimiza o investimento de capital (CAPEX) e impulsiona a expansão territorial da rede de vigilância.

Paralelamente, o projeto da Bóia Circular Compacta com Sinalização Náutica revelou um potencial promissor para aplicações industriais e navegação, aliando conformidade com o balizamento aquático (NORMAM-601/IALA) e segurança patrimonial dos ativos. Como próximo passo fundamental para o

amadurecimento tecnológico do projeto, recomenda-se a integração de módulos de telemetria para a transmissão remota de dados em tempo real, consolidando em sua plenitude uma vigilância ambiental de caráter preditivo.

Por fim, cabe salientar que, embora a validação experimental dos protótipos tenha sido conduzida no Reservatório Alagados, ambiente essencialmente lêntico, a arquitetura modular das estações flutuantes apresenta elevada flexibilidade e aplicabilidade técnica para captações situadas em rios de fluxo livre. Para a transição a ambientes lóticos sujeitos a correntes de alta energia, recomenda-se a implementação de adaptações mecânicas de engenharia, tais como a adoção de ancoragem reinforced e redundante por poitas duplas dispostas a montante e jusante ou fixação por linha de vida entre as margens para contrabalançar as forças de arrasto da correnteza, a adição de anteparos perfurados e defletores ao redor da gaiola dos sensores para resguardar os eletrodos contra impactos de materiais flutuantes em suspensão, e o encurtamento preventivo das rotinas de manutenção manual e inspeção dos limpadores automáticos (wipers) das lentes ópticas em rios com elevada carga sedimentar e picos de turbidez.

O cumprimento dessas diretrizes de proteção e estabilização mecânica consolida a viabilidade do sistema em corpos d'água lóticos, ratificando o arranjo flutuante como uma solução móvel, versátil e escalável. Cabe ressaltar que a utilização das sondas multiparamétricas in situ não visa substituir o monitoramento limnológico e de potabilidade tradicional, mas atuar como uma complementação estratégica às rotinas de fiscalização sanitária. Enquanto as análises laboratoriais de bancada permanecem indispensáveis para atestar o cumprimento integral dos requisitos legais frente às normas de amostragem, como os parâmetros microbiológicos, metais pesados e compostos orgânicos regidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 e Resolução CONAMA nº 357/2005, o sistema automatizado atua como uma sentinela de vigilância ininterrupta. Essa alta resolução temporal permite identificar variações transientes de curto prazo e disparar alertas em tempo real, direcionando as coletas manuais de forma assertiva, otimizando os recursos operacionais (OPEX) e fortalecendo a segurança hídrica global do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 23. ed. Washington: APHA, 2017.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO/IEC 17025**: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018

3. BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. **Introdução ao sensoriamento remoto da qualidade da água**. 2019.

4. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005.
5. BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, n. 85, p. 127, 7 maio 2021.

6. FLORES-IWASAKI, A. et al. Monitoramento inteligente e resiliência em sistemas hídricos de alta frequência. **Journal of Water Security**, v. 12, n. 2, 2025.

7. INTERNATIONAL ASSOCIATION OF MARINE AIDS TO NAVIGATION AND LIGHTHOUSE AUTHORITIES (IALA). **IALA Guideline G1098**: On the Buoyage System and Aids to Navigation. Saint-Germain-en-Laye: IALA, 2021.

8. LEITE, R. F. et al. Sistema autônomo de monitoramento de qualidade da água (Acqua Station). In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (SILUBESA), 21., 2024, Recife. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: ABES, 2024.

9. MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). **NORMAM-601/DHN**: Normas da Autoridade Marítima para Auxílios à Navegação. Niterói: DHN, 2023.

10. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6: Água Potável e Saneamento. Nova York: ONU, 2015.

11. SENNA, Diego Augustus; SENNA, Priscylla Pavlowa; PEREIRA, Luiz Philippe; ROLAND, Nathalia; REZENDE, Sonaly. Saneamento e sociedade 5.0: inovações tecnológicas para a realização dos direitos humanos à água e ao saneamento. In: ENCONTRO NACIONAL PELOS DIREITOS HUMANOS À ÁGUA E AO SANEAMENTO, 2., 2021, Online. Anais [...] [S. l.: s. n.], 2021. DOI: https://doi.org/10.46848/950038.

12. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ (UEM). Centro de Tecnologia (CTC). Laboratório de Saneamento Ambiental (LASAM). **Análises de Água e Serviços Analíticos**. Maringá: UEM, 2026. Disponível em: https://ctc.uem.br/lasam/laboratorios/labsaneamento/analises-de-agua. Acesso em: 12 jun. 2026

13. VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1).

14. YSI INCORPORATED. **EXO Sondes User Manual.** Yellow Springs: YSI, 2023. Disponível em: https://www.ysi.com/file%20library/documents/manuals/exo-user-manual-web.pdf. Acesso em: 12 jun. 2026.