



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

ANDERSON AUGUSTO BEZERRA DE FREITAS PINTO

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA UTILIZANDO
INTERNET DAS COISAS**

PAU DOS FERROS - RN

2026

ANDERSON AUGUSTO BEZERRA DE FREITAS PINTO

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA UTILIZANDO
INTERNET DAS COISAS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Cecílio Martins de Sousa Neto,
Prof. Dr.

PAU DOS FERROS

2026

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F862s Freitas Pinto, Anderson Augusto Bezerra de.
Sistema de monitoramento da qualidade da água
utilizando internet das coisas / Anderson Augusto
Bezerra de Freitas Pinto. - 2026.
45 f. : il.

Orientador: Cecílio Martins de Sousa Neto.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia de
Computação, 2026.

1. Internet das coisas. 2. Qualidade da água.
3. Monitoramento. 4. ESP32. I. Sousa Neto, Cecílio
Martins de, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a).
Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANDERSON AUGUSTO BEZERRA DE FREITAS PINTO

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA UTILIZANDO
INTERNET DAS COISAS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Defendida em: 01/07/2026.

BANCA EXAMINADORA

Cecílio Martins de Sousa Neto, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Petrúcio Ricardo Tavares de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Alex Pinheiro Feitosa, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de inicialmente agradecer a Deus, por ter iluminado o meu caminho ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

Agradeço aos meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando, aconselhando e incentivando.

Quero agradecer a minha namorada, que mesmo nos momentos mais difíceis não me deixou desistir ou pensar negativamente, me fazendo sempre enxergar o lado positivo das coisas.

Agradeço ao meu orientador, o professor Dr. Cecílio Martins de Sousa Neto, por ter me dado a oportunidade de compartilhar ao seu lado o desenvolvimento deste trabalho, e por toda a qualidade e empenho no qual ministra as suas aulas.

Agradeço também aos professores Dr. Petrúcio Ricardo Tavares de Medeiros e Dr. Alex Pinheiro Feitosa, por disponibilizarem seu tempo e conhecimento para a apresentação deste trabalho.

Não menos importante, agradeço a todos os outros professores que em algum momento se fizeram presentes ao longo da minha graduação, por todas as aulas e por todos os ensinamentos que levarei comigo.

Agradeço aos meus amigos Gustavo e Nestor, por todos os momentos de descontração ao longo do curso, dentro ou fora da faculdade, por toda a paciência que tiveram até aqui, e por todas as lembranças compartilhadas, tendo a certeza que as carregarei comigo a todo momento.

Agradeço também aos colegas e amigos do antigo LASBIO, por tornarem meus dias mais leves e por toda descontração e troca de ensinamentos ao longo do curso.

Do mesmo modo, agradeço a todos os outros amigos e colegas, por toda a vivência ao longo da minha trajetória acadêmica.

Por fim, agradeço ao meu avô, o senhor Francisco Tarcísio Bezerra, que, embora não esteja mais entre nós, em vida nunca deixou de me apoiar e ensinar que dentre todas as coisas nessa vida, o conhecimento é algo que ninguém pode tirar de uma pessoa.

RESUMO

O monitoramento contínuo da qualidade da água é fundamental para a identificação ágil de alterações que possam comprometer o seu uso, sobretudo o consumo humano, visto que os métodos tradicionais de avaliação apresentam limitações relacionadas ao alto custo e à demora na obtenção dos resultados. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de monitoramento contínuo da qualidade da água, empregando a arquitetura da Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT). A solução integra um microcontrolador ESP32 e sensores de pH, temperatura e turbidez, responsáveis pela aquisição contínua dos dados, transmitidos via *Wi-Fi* ao *Firebase Realtime Database* e disponibilizados ao usuário por meio de uma aplicação *web* responsiva, que apresenta as informações em gráficos de linha e indicadores do tipo *gauge*. A validação foi realizada por meio da coleta contínua de dados ao longo de dez dias, totalizando 960 registros por parâmetro. Os resultados demonstraram que o sistema foi capaz de realizar a aquisição, o armazenamento e a visualização remota dos dados, evidenciando um padrão coerente para a temperatura e comportamento estável do pH, exceto por um episódio pontual de falha do sensor, além de identificar uma não conformidade persistente da turbidez frente aos padrões de potabilidade vigentes. Conclui-se que a integração entre sensores de baixo custo, microcontroladores embarcados e armazenamento em nuvem constitui uma alternativa viável e acessível ao monitoramento tradicional.

Palavras-chave: internet das coisas; qualidade da água; monitoramento; ESP32.

ABSTRACT

Continuous water quality monitoring is essential for the rapid identification of changes that may compromise its use, particularly for human consumption, given that traditional assessment methods present limitations related to high costs and delayed results. Given this scenario, this work aimed to develop a continuous water quality monitoring system based on the Internet of Things (IoT) architecture. The solution integrates an ESP32 microcontroller and pH, temperature, and turbidity sensors, responsible for the continuous data acquisition, transmitted via Wi-Fi to Firebase Realtime Database and made available to the user through a responsive web application, which presents the information by means of line charts and gauge-type indicators. The solution was validated through continuous data collection over a ten-day period, totaling 960 records per parameter. The results showed that the system was able to perform data acquisition, storage, and remote visualization of the data, revealing a consistent pattern for temperature and stable pH behavior, except for an isolated sensor failure episode, and identifying a persistent non-compliance of turbidity with the current potability standards. It is concluded that the integration of low-cost sensors, embedded microcontrollers, and cloud storage constitutes a viable and accessible alternative to traditional water quality monitoring.

Keywords: internet of things; water quality; monitoring; ESP32.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre diferentes valores de UNT	17
Figura 2 - Fluxograma da arquitetura da construção do protótipo	21
Figura 3 - Esquemático da montagem da solução	22
Figura 4 - Arquitetura ESP32-DevKitC V4	23
Figura 5 - Sensor de temperatura DS18B20	25
Figura 6 - Sensor de pH 4502C	26
Figura 7 - Sensor de turbidez KS0414.....	27
Figura 8 - Localização do ponto de coleta das amostras	29
Figura 9 - Gráficos de linha do dashboard web - temperatura, pH e turbidez.....	30
Figura 10 - Indicadores (gauges) do dashboard web - temperatura, pH e turbidez.....	30
Figura 11 - Histórico de leitura do pH no episódio mencionado.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Datasheet ESP32-WROOM-32E	24
Tabela 2 - Datasheet DS18B20	24
Tabela 3 - Datasheet PH-4502C	25
Tabela 4 - Datasheet KS0414	27
Tabela 5 - Estatísticas dos parâmetros monitorados e sua conformidade normativa	31
Tabela 6 - Custo dos componentes utilizados no protótipo.....	35
Tabela 7 - Comparação de custos entre os sensores utilizados e sensores profissionais.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IoT	<i>Internet of Things</i>
IQA	Índice de Qualidade da Água
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
RN	Rio Grande do Norte
RNQA	Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade das Águas
SEMIL	Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Objetivos.....	11
1.1.1 Objetivo Geral	11
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 Organização do Trabalho	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 Internet das Coisas (IoT)	13
2.2 Comunicação.....	14
2.3 Interface Gráfica.....	14
2.4 Legislação Brasileira Aplicada à Potabilidade da Água	15
2.5 Variáveis Físicas e Químicas da Qualidade da Água	15
2.5.1 Turbidez.....	16
2.5.2 Temperatura.....	18
2.5.3 Potencial Hidrogeniônico	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 Metodologia.....	21
3.2 Materiais Utilizados.....	23
3.2.1 Microcontrolador	23
3.2.2 Sensor de Temperatura	24
3.2.3 Sensor de Potencial Hidrogeniônico.....	25
3.2.4 Sensor de Turbidez	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1 Funcionamento da Plataforma de Visualização	30
4.2 Comportamento Geral dos Parâmetros Monitorados	31
4.2.1 Temperatura.....	31
4.2.2 Potencial Hidrogeniônico	32
4.2.3 Turbidez.....	33
4.3 Análise de Custo.....	34
4.4 Síntese dos Resultados.....	36
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) é o órgão federal responsável pela gestão dos recursos hídricos. De acordo com a ANA (2024), a água é um recurso amplamente utilizado em diversas atividades humanas, tais como abastecimento, irrigação, recreação e processos industriais, sendo que a avaliação da sua qualidade é fundamental para verificar se ela está adequada aos diferentes usos, principalmente ao consumo humano. Desta forma, a Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL), destaca que realizar o monitoramento da qualidade da água é fundamental para acompanhar suas condições ao longo do tempo e auxiliar na identificação de possíveis alterações relacionadas às atividades humanas (SEMIL, 2025).

Com base nesse contexto, a análise do Índice de Qualidade da Água (IQA) é uma ferramenta amplamente utilizada para avaliar as condições dos corpos hídricos. Esses índices permitem representar, de forma simplificada, a qualidade da água por meio de um único valor, facilitando a interpretação e o acompanhamento ao longo do tempo. Além disso, o IQA é aplicado principalmente na avaliação da água destinada ao abastecimento público após tratamento convencional (ANA, 2004).

De acordo com o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), o cálculo do IQA é baseado em parâmetros físicos, químicos e biológicos considerados relevantes para a análise da qualidade da água (IGAM, 2024). Para a avaliação da água destinada ao consumo humano, destacam-se parâmetros como o pH, a temperatura e a turbidez. Esses parâmetros permitem identificar alterações nas condições da água e auxiliar na sua classificação quanto à qualidade, o que possibilita uma avaliação mais completa, apesar de não considerar todos os possíveis contaminantes (ANA, 2004).

Diante disso, o monitoramento da qualidade da água se torna uma atividade essencial para a gestão dos recursos hídricos. A coleta contínua de dados permite identificar alterações, prevenir problemas e apoiar a tomada de decisões relacionadas ao uso da água. A obtenção dos dados utilizados para avaliar a qualidade desse recurso é realizada por meio de redes de monitoramento compostas por pontos de coleta distribuídos em rios, reservatórios e demais corpos hídricos. No Brasil, a ANA coordena a Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade das Águas (RNQA), que integra os órgãos responsáveis pelo monitoramento nos estados (ANA, 2024).

De acordo com a ANA (2024), a configuração dessas redes variam conforme os objetivos do monitoramento, podendo incluir desde campanhas periódicas de coleta até

sistemas automatizados para acompanhamento contínuo. Em locais destinados ao abastecimento humano ou considerados críticos, são empregados equipamentos automáticos capazes de realizar medições em intervalos reduzidos, permitindo a obtenção de dados praticamente em tempo real. Esse tipo de monitoramento tem sido cada vez mais viabilizado pelo uso de sensores eletrônicos e sistemas de comunicação de dados, tornando possível o acompanhamento remoto e contínuo dos parâmetros monitorados.

Apesar dessas tecnologias, o monitoramento tradicional ainda enfrenta desafios relacionados aos altos custos e à demora das análises laboratoriais. Para superar essas barreiras, o uso da Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), surge como uma alternativa viável, pois permite o acompanhamento contínuo com maior eficiência e menor custo de operação.

Neste trabalho, a obtenção dos dados para avaliar a qualidade da água serão feitas por sensores de pH, temperatura e de turbidez conectados a um microcontrolador ESP32. As medições vão ocorrer periodicamente em amostras de água coletadas no município de Tenente Ananias - RN. Esses dados serão transmitidos para um banco de dados e em seguida direcionados para uma plataforma de monitoramento, possibilitando a visualização e o acompanhamento remoto por meio de atualização automática assim que os dados são recebidos pela plataforma, em intervalos de 15 minutos, correspondentes à frequência de envio dos dados coletados pelos sensores. Com isso, busca-se desenvolver uma solução de baixo custo para o monitoramento contínuo, contribuindo para uma análise mais rápida e eficiente dos recursos hídricos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de monitoramento da qualidade da água empregando a arquitetura da IoT, integrando a coleta de dados por meio de sensores em um microcontrolador ESP32 ao armazenamento em nuvem via *Firebase Realtime Database*, e a visualização interativa em uma plataforma *web* responsiva, a fim de prover informações em tempo real para o acompanhamento dos índices.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Projetar e implementar um módulo de hardware embarcado, composto por um microcontrolador ESP32 e sensores de pH, turbidez e temperatura, capaz de realizar a aquisição de dados da qualidade da água.
2. Estabelecer comunicação sem fio (*Wi-Fi*) para a transmissão contínua dos dados coletados pelo ESP32 para uma plataforma de armazenamento em nuvem.
3. Desenvolver uma aplicação *web* que consuma os dados armazenados no *Firebase* e os apresente de forma gráfica e intuitiva em *dashboards*.
4. Assegurar a responsividade da interface web, garantindo a acessibilidade e a usabilidade do sistema em diferentes dispositivos, como computadores e *smartphones*.

1.2 Organização do Trabalho

Além da introdução, este trabalho está organizado em mais quatro capítulos. O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico que fundamenta a pesquisa. O Capítulo 3 descreve a metodologia empregada no desenvolvimento do protótipo. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos a partir da operação do sistema. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais que sustentam o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são discutidos os princípios da IoT e das tecnologias de comunicação e armazenamento de dados empregadas em sistemas de monitoramento remoto, seguidos pelos aspectos relacionados à interface gráfica de visualização. Em seguida, é apresentada a legislação brasileira aplicada à potabilidade da água, bem como os principais parâmetros físicos e químicos, com destaque para a turbidez, a temperatura e o potencial hidrogeniônico, parâmetros monitorados neste trabalho.

2.1 Internet das Coisas (IoT)

Para Monteiro (2020), há diferentes definições que convergem para a capacidade de conectar objetos à rede de computadores, possibilitando a coleta e a transmissão de dados. Essa capacidade de conexão e transmissão de dados tem impulsionado a substituição de processos manuais por sistemas automatizados de monitoramento. Segundo Junior *et al.* (2019), a transição do modelo manual para um sistema de monitoramento em tempo real reduz falhas humanas.

A utilização de um sistema IoT para a medição da qualidade da água baseia-se na integração de sensores em um microcontrolador, em que o sensor converte em sinais elétricos e o microcontrolador adquire e processa esses sinais. O avanço dos sistemas embarcados possibilitou o surgimento de plataformas de baixo custo e alto desempenho, tornando a implementação de sistemas de monitoramento mais acessível e reduzindo a dependência de empresas de grande porte (Monteiro, 2020).

Segundo Silva (2024), uma estrutura baseada em IoT não se limita apenas ao ato de coletar dados, mas também à capacidade de os transmitir para o processamento em nuvem. Para Monteiro (2020), é essa integração entre o *hardware* utilizado em campo e os servidores remotos que possibilita a análise dos dados. Desse modo, a utilização de plataformas em nuvem atua como um pilar fundamental, garantindo que o monitoramento não seja apenas local, mas acessível de forma global e escalável, o que é essencial para sistemas modernos que visam a supervisão remota e a tomada de decisão rápida.

2.2 Comunicação

A estrutura de comunicação em sistemas de monitoramento baseados em IoT desempenha um importante papel de conectar os sensores ao seu microcontrolador e em seguida enviar os dados coletados para uma aplicação em nuvem. Segundo Duarte (2023), essa conexão possibilita que os dados que foram coletados possam ser transmitidos continuamente. Diante disso, essa fluidez na transmissão dos dados é o que viabiliza o monitoramento contínuo, uma vez que o *hardware* se torna um nó ativo na rede, capaz de fornecer dados atualizados em apoio à tomada de decisão.

Para que essa transmissão possa acontecer, a utilização do *Wi-Fi* é a solução mais comum, pois ele tem ampla disponibilidade e facilidade de integração com os microcontroladores. Para Américo e Izidorio (2022), a conectividade sem fio possibilita que os dispositivos enviem os dados diretamente para a internet, sem a necessidade de cabos de dados. Essa característica facilita a instalação em diversos locais, fazendo com que o meio de transmissão atue interligando os dispositivos ao ambiente digital.

O armazenamento e a sincronização dos dados podem ser feitas em plataformas de serviço em nuvem como o *Firebase Realtime Database*, que possibilita a conexão em tempo real entre o usuário e os dados fornecidos, recebendo atualizações com os dados mais recentes quando disponível (Google, [s.d.]). Conforme apontado por Dutra (2019), a utilização de bancos de dados em tempo real permite que as informações sejam sincronizadas entre múltiplos dispositivos simultaneamente.

2.3 Interface Gráfica

A interface gráfica tem como finalidade fazer com que os dados coletados pelos sensores e armazenados em banco de dados sejam compreensíveis para o usuário final. Segundo Duarte (2023), a importância do acompanhamento dos dados remotos reside na capacidade de supervisionar de forma centralizada. Para que isso aconteça, a democratização do acesso deve ser garantida pela responsividade da aplicação, que deve permitir visualmente o funcionamento em dispositivos fixos e móveis.

No que diz respeito à visualização, a utilização de *dashboards* com gráficos facilita a interpretação das variações dos dados coletados ao longo do tempo. Santiago *et al.* (2020) ressaltam que a combinação de um *framework* de desenvolvimento *web* com uma biblioteca de

estilização visual, como *Django* e *Bootstrap*, respectivamente, permite criar interfaces robustas e visualmente claras, nas quais torna a leitura intuitiva para o usuário.

2.4 Legislação Brasileira Aplicada à Potabilidade da Água

No que se refere aos padrões nacionais, a Portaria de Consolidação nº 5/2017, que foi estabelecida pelo Ministério da Saúde em 2017, estabelece as diretrizes fundamentais para a garantia da potabilidade da água no Brasil (Brasil, 2017). O Anexo XX desta portaria detalha os procedimentos obrigatórios para o controle e a vigilância da qualidade da água destinada ao consumo humano, estabelecendo assim limites rigorosos para assegurar a segurança sanitária em todo o território nacional (Brasil, 2017). Essas diretrizes foram inicialmente consolidadas a partir da Portaria nº 2.914/2011, onde ela já estruturava critérios técnicos para o monitoramento de parâmetros essenciais (Brasil, 2011).

Em 2021, essa regulamentação passou por uma atualização importante com a publicação da Portaria GM/MS nº 888. Esta norma foi a responsável por revisar os padrões vigentes e incorporar o monitoramento de novas substâncias, uma medida necessária para que a legislação brasileira acompanhe as constantes evoluções científicas na área de saneamento (Soares; Franco; Assis, 2021). De acordo com o que determina a legislação, a água fornecida deve ser obrigatoriamente isenta de microrganismos patogênicos e substâncias prejudiciais, o que estabelece responsabilidades claras aos prestadores de serviço quanto à manutenção desses padrões de segurança (Fortes; Barrocas; Kligerman, 2019). Para garantir essa conformidade, os critérios de avaliação são organizados em parâmetros microbiológicos, químicos, radioativos e organolépticos. Essa estrutura assegura que a água atenda não apenas aos requisitos fundamentais de saúde pública, mas também aos padrões de aceitação para o consumo (Brasil, 2021).

2.5 Variáveis Físicas e Químicas da Qualidade da Água

A avaliação da qualidade da água depende da análise de diferentes variáveis físicas e químicas, as quais fornecem informações importantes sobre as condições do recurso hídrico e sua adequação para os diversos usos. Entre os parâmetros utilizados para a medição dos índices de qualidade da água estão a temperatura, o potencial hidrogeniônico (pH) e a turbidez, que permitem identificar alterações nas características da água e auxiliar no monitoramento da sua

qualidade. Os tópicos a seguir apresentam os conceitos e a importância desses parâmetros para a avaliação das condições hídricas.

2.5.1 Turbidez

A turbidez é um parâmetro físico que determina a redução da claridade da água devido à presença de substâncias em suspensão, onde essas substâncias provocam a dispersão e a absorção da luz incidente (Correia *et al.*, 2008). Esse parâmetro faz com que a água disponha de um aspecto turvo ou opaco (Turbidez..., 2022).

Para Libânio (2010), as causas para a elevação desse índice podem possuir origem natural, estando frequentemente associadas à erosão do solo em períodos pluviais, que transporta sedimentos como argila e areia para os corpos hídricos, refletindo assim as particularidades geológicas da bacia hidrográfica. Adicionalmente, o aumento da turbidez também está ligado às ações antrópicas, destacando-se o lançamento inadequado de esgotos domésticos e efluentes industriais como fatores determinantes para a degradação da qualidade da água na natureza (Brasil, 2014).

O aumento da turbidez afeta a qualidade da água e o equilíbrio da vida aquática, pois inibe a fotossíntese ao bloquear a luz solar, o que acaba por reduzir de forma prejudicial os níveis de oxigênio dissolvido no meio e aumentar a temperatura da água (Posudin, 2014). Além disso, os altos índices de partículas suspensas interferem na penetração da luz durante os processos de desinfecção, comprometendo a eficácia dos agentes desinfetantes e criando um ambiente propício à proliferação de microrganismos (Brito *et al.*, 2024).

Para a Fondriest (2014), a turbidez atua como um indicador relevante do potencial de poluição, uma vez que a sua elevação pode estar diretamente associada à presença de diversos contaminantes. Ainda segundo a Fondriest (2014), entre os elementos comumente encontrados em águas com altos índices de turbidez, destacam-se microrganismos patogênicos, nutrientes como nitratos e fósforo, além de substâncias tóxicas como pesticidas e metais pesados (ex: mercúrio e chumbo). Além disso, a presença de sólidos em suspensão de origem orgânica provenientes de matéria em decomposição ou do descarte de efluentes sanitários acarreta altos índices de microrganismos, incluindo bactérias, protozoários e vírus (Fondriest, 2014).

Para quantificar esse parâmetro, utiliza-se amplamente um turbidímetro, um instrumento óptico fundamentado no método nefelométrico. O princípio de funcionamento deste equipamento consiste na medição da intensidade da luz dispersada em um ângulo de noventa graus em relação ao feixe incidente (Digimed, 2023). A unidade padrão da turbidez é

a Unidade Nefelométrica de Turbidez (UNT) ou representada pela sigla NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*).

Com o intuito de garantir controle ambiental, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução CONAMA nº 357/2005, estabelece parâmetros rigorosos de turbidez, definindo que águas doces de classe 1 devem apresentar o limite de até 40 UNT, enquanto para as classes 2 e 3 o registro máximo permitido é de 100 UNT (CONAMA, 2005). Complementarmente, voltando-se para o consumo humano seguro, a legislação federal de potabilidade determina que a água tratada na rede de distribuição não deve ultrapassar o valor máximo permitido de 5,0 UNT (Brasil, 2017). A Figura 1 apresenta o comparativo entre amostras com diferentes níveis de turbidez, em que se percebe a diferença entre o padrão de potabilidade (5 UNT) e níveis superiores (55 e 515 UNT), que comprometem a claridade do recurso hídrico.

Figura 1 – Comparação entre diferentes valores de UNT



Fonte: Fondriest (2014).

Diante disso, o monitoramento contínuo e em tempo real através de dispositivos de IoT consolida-se como uma solução tecnológica estratégica. Para Santos *et al.* (2024), esse acompanhamento de dados de forma automatizada e remota é relevante porque alerta as autoridades sobre alterações dinâmicas na água de maneira instantânea, e consequentemente, essa agilidade possibilita intervenções rápidas. Assim sendo, percebe-se que esse índice pode indicar riscos à potabilidade do recurso, uma vez que a turbidez elevada está associada a condições que podem favorecer a proliferação de microrganismos, o que reforça a necessidade de um sistema de monitoramento capaz de identificar essas variações de forma ágil.

2.5.2 Temperatura

A temperatura de um corpo está relacionada ao grau de agitação de suas moléculas, sendo expressa fisicamente pela energia cinética molecular (Brasil, 2014). Nos ecossistemas aquáticos, a temperatura atua como um fator que influencia os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na água (Vieira, 2019).

Segundo Brasil (2014), em relação às águas destinadas ao consumo humano, temperaturas elevadas tendem a aumentar a probabilidade de rejeição ao uso. As variações desse parâmetro nos recursos hídricos decorrem de uma associação entre dinâmicas naturais do ecossistema e interferências antrópicas diretas ou indiretas (Von Sperling, 2005).

Do ponto de vista estritamente natural, a temperatura da água apresenta uma forte dependência climática, em que ela oscila de forma sazonal durante o ano e sofre variações ao longo do dia em resposta às mudanças na temperatura atmosférica (Vieira, 2019). De forma antropogênica, a mudança de temperatura nos ecossistemas aquáticos está majoritariamente atrelada ao lançamento de águas de refrigeração de máquinas e aos despejos industriais (Brasil, 2014). Somado a isso, intervenções humanas na estrutura e engenharia dos rios, como a construção de barragens, também figuram como causas relevantes, pois elas afetam os ciclos térmicos e modificam os padrões naturais de aquecimento e resfriamento (Fondriest, 2014).

Para Costa e Ferreira (2015), a temperatura é uma grandeza que a sua variação altera diretamente a taxa e a velocidade das reações químicas. Segundo Libânio (2010), o aquecimento da água favorece a proliferação de microrganismos e a formação de subprodutos nocivos durante a cloração, facilitando a dissolução de compostos orgânicos passíveis de conferir cor, sabor e odor indesejáveis ao produto final (Libânio, 2010).

Para a aferir a temperatura, especialmente em sistemas de monitoramento automatizados e de IoT, são utilizados instrumentos como sensores digitais e termistores (Ana, 2005; Pinto, 2007 apud Santos *et al.*, 2024). O funcionamento de um termistor consiste na utilização de uma resistência sensível, a qual exibe uma mudança previsível, precisa e expressiva na sua resistência elétrica quando o componente físico sofre uma variação térmica (Oliveira *et al.*, 2024). Em respeito à expressão quantitativa dessa grandeza, a unidade padrão amplamente adotada no monitoramento hidrológico nacional é o grau Celsius (°C) (Vieira, 2019).

De acordo com Libânio (2010), sobre a legislação de potabilidade brasileiro, não existem limites ou recomendações normativas de temperatura máxima para que a água seja considerada segura para o consumo humano. Da mesma forma, inexiste na legislação federal qualquer restrição térmica voltada para a água na rede de distribuição que vise garantir a sua

palatabilidade ou aceitação estética pelo consumidor final (Libânio, 2010). A completa ausência de limites fixos para a temperatura da água de abastecimento justifica-se, essencialmente, pelos insignificantes efeitos diretos dessa grandeza à saúde humana e pela extrema dificuldade técnica de se alterar artificialmente a temperatura de grandes volumes de água (Libânio, 2010).

Diante desse cenário, embora a legislação não imponha barreiras térmicas rígidas, o monitoramento contínuo desse parâmetro torna-se uma estratégia para a gestão inteligente dos sistemas de abastecimento. O fluxo constante de dados coletados através de dispositivos IoT podem conferir previsibilidade aos operadores, permitindo o ajuste automatizado e em tempo real das dosagens de produtos químicos em resposta exata às variações do meio. Desse modo, a IoT transforma a temperatura de uma variável incontornável em um indicador preditivo, mitigando os riscos operacionais e garantindo a estabilidade dos demais índices de qualidade da água.

2.5.3 Potencial Hidrogeniônico

O potencial hidrogeniônico é um parâmetro químico que consiste na medida quantitativa da concentração de íons de hidrogênio ou íons de hidróxido em uma dada solução, servindo para indicar a intensidade de suas condições ácidas, neutras ou alcalinas (Posudin, 2014).

A alteração do nível de pH na água pode ser impulsionada por processos de origem natural, a exemplo da absorção de gases da atmosfera, da atividade fotossintética e da dissolução de rochas presentes no leito, bem como por ações antropogênicas diretas, como o despejo indiscriminado de efluentes industriais e esgotos domésticos (Von Sperling, 2005). Considerando de caráter antrópico, o parâmetro é evidenciado principalmente pelo lançamento indevido de esgotos domésticos e efluentes industriais nas águas, bem como pela precipitação de chuvas ácidas originadas a partir da poluição atmosférica (Brasil, 2014).

Somado a isso, do ponto de vista físico-químico, o aumento na concentração de sólidos totais dissolvidos afeta negativamente o pH, tornando a água mais ácida e alertando para a provável presença de agentes contaminantes prejudiciais (Monteiro, 2020).

A variação do pH interfere de forma significativa nas etapas de potabilização, uma vez que a eficácia dos processos de tratamento da água dependem do controle desse parâmetro (Von Sperling, 2005). Segundo Pontes (2025), para as pessoas que utilizam água no dia a dia, as variações extremas do pH representam riscos diretos à saúde humana devido à possibilidade de causar irritações nas mucosas.

De acordo com a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA), a diminuição do pH confere um caráter ácido à água, o que eleva a sua agressividade e favorece a corrosão. enquanto o aumento do pH promove uma condição alcalina que atua de forma oposta, elevando a possibilidade de formação de incrustações prejudiciais nas estruturas dos sistemas de transporte hídrico (FUNASA, 2014).

A medição desse parâmetro é comumente realizada através da utilização de um equipamento denominado pHmetro, o qual é dotado de uma sonda composta por um eletrodo de vidro e um de referência que são submersos no líquido para a aferição (Gesser; Alves, 2018). O funcionamento do sensor é baseado na difusão dos íons de hidrogênio através de uma membrana externa, que cria uma pequena corrente e produz um potencial elétrico proporcional à diferença de concentração iônica detectada na amostra (Monteiro, 2020). Em relação a sua unidade de medida, o pH é conceituado como uma variável adimensional, ou seja, não possui uma unidade própria, de forma que a tensão elétrica captada pelo instrumento é apenas convertida e expressa em uma escala numérica que varia convencionalmente de 0 a 14.

A Resolução CONAMA nº 357/2005 determina que, para assegurar a proteção dos ecossistemas e a viabilidade dos usos previstos, as águas doces superficiais enquadradas nas categorias 1, 2 e 3 devem apresentar o seu potencial hidrogeniônico mantido obrigatoriamente na faixa restrita de 6,0 a 9,0 (CONAMA, 2005). Por outro lado, a norma técnica vigente não fixa uma faixa obrigatória de pH para a água distribuída à população (Brasil, 2021).

A obtenção do valor do pH da água em tempo real atua como uma ferramenta estratégica de gestão que viabiliza a avaliação remota das condições físico-químicas dos recursos hídricos, superando as restrições temporais e de custo inerentes aos métodos convencionais de amostragem laboratorial manual (Monteiro, 2020). Para Brito *et al.* (2025), o acompanhamento ininterrupto por meio de tecnologias possibilita a integração das medições a sistemas inteligentes capazes de analisar os dados e gerar alertas automatizados.

Assim, pode-se afirmar que a coleta instantânea do pH é importante, pois, conforme Pontes (2025), variações extremas e repentinas no potencial hidrogeniônico servem como indicadores primários de contaminações industriais ou desequilíbrios ecológicos que prejudicam diretamente a eficácia das etapas de tratamento, especialmente a desinfecção por cloração.

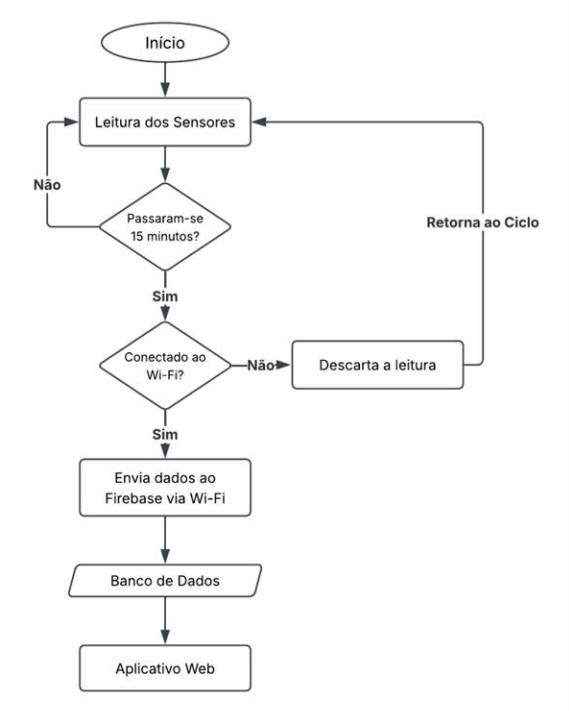
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento do sistema de monitoramento proposto, descrevendo a arquitetura geral da solução, os materiais e equipamentos utilizados na montagem do protótipo, bem como as características técnicas do microcontrolador e dos sensores empregados na aquisição dos parâmetros de qualidade da água.

3.1 Metodologia

Para o desenvolvimento da solução, foram utilizados sensores específicos para a medição de cada parâmetro, que enviam os dados para o microcontrolador. O microcontrolador exerce a função de receber essas informações, processá-las e enviá-las através da rede *Wi-Fi* para o *Firebase*, uma plataforma de banco de dados em nuvem, na qual os dados ficam armazenados com segurança e acessíveis para consulta. Após o recebimento das informações, elas são coletadas na aplicação *web*, em que ela possibilita ao usuário uma visualização gráfica através de um *dashboard* de fácil entendimento. A arquitetura dessa solução é ilustrada no fluxograma contido na Figura 2, é importante destacar que o fluxo não possui um estado de término, uma vez que o sistema opera em ciclo contínuo de monitoramento.

Figura 2 - Fluxograma da arquitetura da construção do protótipo

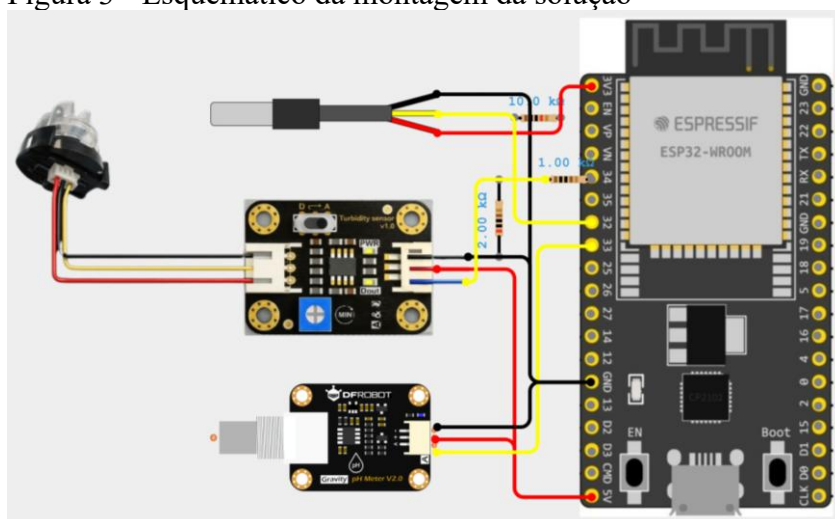


Fonte: Autoria própria (2026).

No desenvolvimento da solução, foi adotada uma abordagem experimental focada na integração de sensores físico-químicos ao microcontrolador ESP32. O código embarcado foi desenvolvido de forma sequencial, ou seja, o microcontrolador realiza a leitura contínua dos sensores de pH, turbidez e de temperatura, mas o envio desses dados é feito em intervalos de 15 minutos. Caso aconteça alguma falha na conexão *Wi-Fi* no momento do envio, a leitura correspondente a aquele bloco de tempo não é armazenada, e o programa segue para o próximo ciclo de leitura.

A arquitetura de montagem da solução, que ilustra a disposição do microcontrolador em conjunto com os módulos de interface e sensores, é apresentada através da Figura 3.

Figura 3 - Esquemático da montagem da solução



Fonte: Autoria própria (2026).

Conforme apresentado na Figura 3, o sensor de turbidez foi conectado ao pino GPIO 34, o sensor de temperatura ao pino GPIO 32, e o sensor de pH ao pino GPIO 33 do ESP32, todos configurados como entradas analógicas/digitais para a leitura dos sinais. Como o sensor de turbidez opera com saída de 5V, enquanto o ESP32 trabalha com lógica de 3,3V, foi utilizado um divisor de tensão composto por um resistor de 2,00 kΩ, ligado ao GND, e um resistor de 1,00 kΩ, ligado ao pino de GPIO, reduzindo a tensão do sinal para um nível seguro de leitura pelo microcontrolador. Já o resistor de 10,0 kΩ atua como resistor de *pull-up* na linha de dados do sensor DS18B20, conectado ao barramento 1-Wire e à tensão de 3,3V. Para a execução prática do esquemático contido na Figura 3, foram necessários os seguintes materiais.

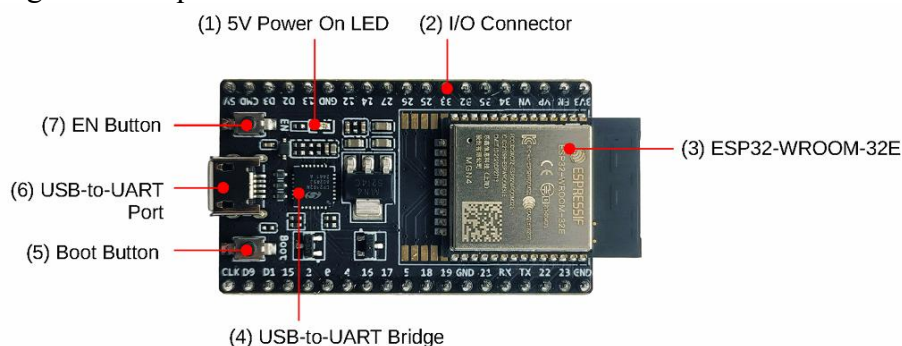
3.2 Materiais Utilizados

1. ESP32-DevKitC V4;
2. DS18B20;
3. PH-4502C;
4. KS0414 Keyestudio Turbidity Sensor V1.0;

3.2.1 Microcontrolador

O módulo microcontrolador escolhido para o desenvolvimento da solução foi o ESP32-WROOM-32E, embarcado em uma placa ESP32-DevKitC V4, desenvolvido pela empresa Espressif, cuja organização dos componentes está representada na Figura 4.

Figura 4 - Arquitetura ESP32-DevKitC V4



Fonte: Espressif (2026).

A escolha desse kit de desenvolvimento está diretamente ligada à quantidade de funcionalidades integradas em um ecossistema de baixo custo (Figueiredo; Pacheco, 2025). Além de não ser necessário hardware extra para a conectividade, pois o ESP32 possui módulo integrado de *Wi-Fi*, o dispositivo destaca-se também pelo baixo consumo energético (Saravati, 2024). O desempenho e a versatilidade do kit podem ser observados através de suas características, descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Datasheet ESP32-WROOM-32E

ESP32-WROOM-32E	
Alimentação	5V DC (via USB / Pino VIN)
Tensão Lógica (I/O)	3,3V
Conectividade Wi-Fi	802,11 b/g/n (2,4 GHz)
Pinos de I/O (GPIO)	36 GPIOs
Corrente (Deep Sleep)	10 μ A

Fonte: Espressif (2026).

Ganha destaque também a funcionalidade do modo *Deep Sleep*, em que quando ocioso o sistema desativa funções que possuem alto consumo, mantendo apenas o bloco RTC e o coprocessador ULP em atividade (Rossi, 2023). Essa redução, faz com que o microcontrolador seja uma solução prática e ideal para sistemas IoT que dependem da longa duração de baterias (Zuchriadi *et al.*, 2026).

3.2.2 Sensor de Temperatura

A escolha do sensor de temperatura para a composição do sistema de monitoramento recaiu sobre o modelo digital DS18B20. Segundo Monteiro (2020), essa escolha é justificada por sua precisão de até $\pm 0,5$ °C e pela facilidade de integração oferecida por essa solução de código aberto na prototipagem.

É relevante notar que, por ser um sensor digital, ele dispensa a necessidade de calibração manual via código, simplificando o processo de desenvolvimento. As especificações técnicas detalhadas, que permitem compreender a faixa de operação e requisitos de alimentação, estão destacadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Datasheet DS18B20

DS18B20	
Tensão de Operação	3 – 5,5V
Faixa de Medição	-55°C ~ 125°C
Precisão	$\pm 0,5$ °C entre -10°C e +85°C
Tempo de Conversão	750 ms

Fonte: Thomsen, 2026.

Para Monteiro (2020), uma característica técnica que fundamenta a preferência pelo uso deste sensor é o uso do barramento de comunicação de um fio (*1-Wire*), que demanda apenas uma linha de dados e impede que as leituras digitais sofram interferências ocasionadas pela distância do cabeamento.

A composição física desse modelo é motivada por uma estrutura blindada, o que garante a durabilidade necessária para suportar intempéries e aferir a temperatura em ambientes externos de forma segura (Medeiros, 2023). A Figura 5 mostra o modelo utilizado para o desenvolvimento da solução.

Figura 5 – Sensor de temperatura DS18B20



Fonte: Prabhu (2018).

3.2.3 Sensor de Potencial Hidrogeniônico

O sensor utilizado para aferir o pH foi uma mini sonda semelhante à sonda da fabricante Atlas Scientific. A preferência por esse dispositivo justifica-se pela sua notável facilidade de implementação na prototipagem de sistemas embarcados, uma vez que ele é comercializado com um conector SMA macho e uma interface dedicada que garante uma adaptação simples e direta à porta de entrada analógica de qualquer microcontrolador (Monteiro, 2020). Os detalhes técnicos do sensor estão detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 – Datasheet PH-4502C

PH-4502C	
Tensão de Operação	DC 5V
Faixa de Medição	pH 0-14
Precisão	± 0.1 pH
Tempo de Resposta	≤ 60 segundos
Saída Analógica	0-5V

Fonte: CimpleO (2026).

A calibração do sensor PH-4502C foi realizada no laboratório da própria instituição, utilizando soluções-tampão de pH certificado. Inicialmente, o sensor foi submerso em uma solução de pH 6,86, ajustando-se o potenciômetro do módulo até que a tensão de saída correspondesse a 2,5V, valor de referência para a condição de neutralidade do sensor. Em seguida, foram realizadas medições da tensão de saída nas soluções-tampão de pH 4,01 e pH 9,18, permitindo a obtenção de três pontos de referência distribuídos ao longo da escala de medição. A partir desses valores, foi realizada uma linearização por meio de regressão linear, obtendo-se a equação característica da curva de conversão entre a tensão medida pelo sensor e o valor correspondente de pH.

O princípio de operação desse sensor apoia-se em uma membrana de vidro que permite a passagem e a difusão dos íons de hidrogênio do líquido avaliado para a sua superfície externa, enquanto retém os íons de maior tamanho na solução (Monteiro, 2020). Como consequência dessa seletividade, estabelece-se uma diferença na concentração iônica entre o ambiente interno e o externo da sonda, o que induz a criação de uma pequena corrente elétrica no componente (Monteiro, 2020). Essa corrente atua de forma diretamente proporcional à quantidade de íons de hidrogênio presentes na solução aquosa, permitindo que a intensidade da tensão medida pelo dispositivo seja lida e convertida para a escala final que determina o nível de acidez ou alcalinidade da água (Monteiro, 2020). O aspecto físico deste sensor pode ser conferido através da Figura 6.

Figura 6 – Sensor de pH 4502C



Fonte: Aislan, 2024.

3.2.4 Sensor de Turbidez

A escolha do sensor de turbidez para a composição do protótipo de monitoramento da qualidade da água baseou-se em critérios práticos de custo, confiabilidade e facilidade de uso. Segundo Monteiro (2020), priorizar componentes de baixo custo, com confiabilidade de

informações e que possuam baixa complexidade para o uso prático em sistemas embarcados, são ideais para esse tipo de solução.

O modelo escolhido foi o KS0414 fabricado pela Keyestudio, as características técnicas do módulo, fundamentais para o correto condicionamento do sinal e programação, estão detalhadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Datasheet KS0414

KS0414 Keyestudio Turbidity Sensor V1.0	
Tensão de Operação	DC 5V
Faixa de Medição	0% - 3.5% (0 – 4550 NTU)
Faixa de Erro	$\pm 0.5 \% F \cdot S$
Tempo de Leitura	Não especificado pelo fabricante

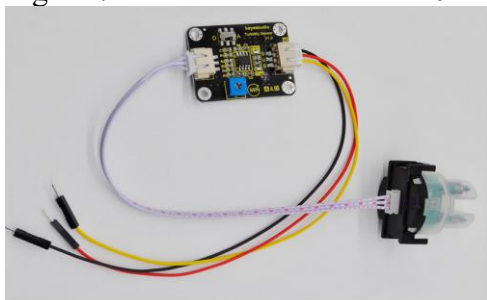
Fonte: Keyestudio (2026).

É importante destacar que o sensor opera em uma faixa de tensão de 5V, exigindo atenção na conexão com o ESP32, que opera em 3,3V, sendo necessário o uso de divisores de tensão ou ajuste na leitura analógica para garantir a integridade do microcontrolador.

O método de operação do componente ocorre por meio de infravermelho, em que a turbidez é quantificada calculando-se a dificuldade que o feixe de luz encontra para conseguir atravessar o líquido que contém as partículas em suspensão (Rosa; Rall, 2025)

A estrutura física do KS0414 é composta por uma sonda de imersão e uma placa de interface que realiza o processamento preliminar do sinal. O módulo possui saída tanto analógica quanto digital, selecionável por meio de uma chave deslizante; neste trabalho, optou-se pela saída analógica, realizando a leitura do valor bruto do conversor analógico-digital (ADC) do ESP32. A configuração física do sensor é ilustrada através da Figura 7.

Figura 7 – Sensor de turbidez KS0414



Fonte: Keyestudio (2021).

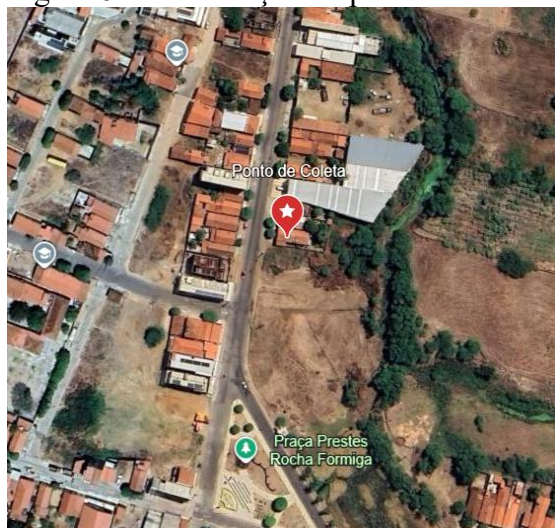
Embora o módulo disponha de um potenciômetro para ajuste de sensibilidade, este não foi utilizado, uma vez que a calibração do sensor foi realizada de forma manual, submergindo-o em uma amostra de água o mais pura disponível, posteriormente, em uma amostra de água com turbidez elevada, até que o valor do ADC não apresentasse mais variação significativa. A partir desses dois valores extremos, foi realizado um mapeamento linear para a faixa de 0 a 4550 NTU, especificada pelo fabricante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da operação do protótipo de monitoramento da qualidade da água. O sistema foi energizado poucos minutos antes do início da coleta, permitindo a estabilização do sensor de pH, que apresenta tempo de até 60 segundos para se estabilizar, conforme especificado na Tabela 4, previamente ao registro da primeira leitura. Os dados foram coletados de forma contínua, em intervalos de 15 minutos, entre as 00h00 do dia 11 de junho de 2026 e às 23h45 do dia 20 de junho de 2026, totalizando 960 registros, sendo 96 leituras diárias para cada um dos três parâmetros monitorados (pH, temperatura e turbidez). As análises a seguir contemplam tanto o comportamento individual de cada parâmetro ao longo do período de coleta quanto a sua relação com os padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação brasileira e por normativas ambientais, discutidas na seção 2.4 e na seção 2.5 deste trabalho.

É importante destacar que as amostras analisadas correspondem à água tratada, fornecida pela companhia de abastecimento, coletada diretamente no ponto de consumo, sem qualquer reservatório doméstico intermediário entre a rede de distribuição e o sensor de turbidez. Por esse motivo, os valores apresentados refletem as condições reais da água que chega ao consumidor final, sendo diretamente comparáveis aos limites de potabilidade estabelecidos pela legislação federal, o que torna especialmente relevante a discussão dos índices de turbidez observados ao longo de todo o período analisado. A Figura 8 apresenta a localização geográfica do ponto de coleta das amostras, no município de Tenente Ananias – RN, obtida por meio da plataforma Google Earth.

Figura 8 – Localização do ponto de coleta das amostras



Fonte: Google Earth (2026).

4.1 Funcionamento da Plataforma de Visualização

A aplicação *web* desenvolvida disponibiliza o acompanhamento dos três parâmetros monitorados por meio de dois formatos complementares de visualização: gráficos de linha, que possibilitam o acompanhamento da variação temporal de cada grandeza, e indicadores do tipo *gauge* (medidor), que apresentam o valor mais recente de cada parâmetro de forma instantânea e intuitiva, facilitando a leitura rápida das condições atuais da água pelo usuário. A Figura 9 apresenta os gráficos de linha referentes à temperatura, ao pH e à turbidez, respectivamente.

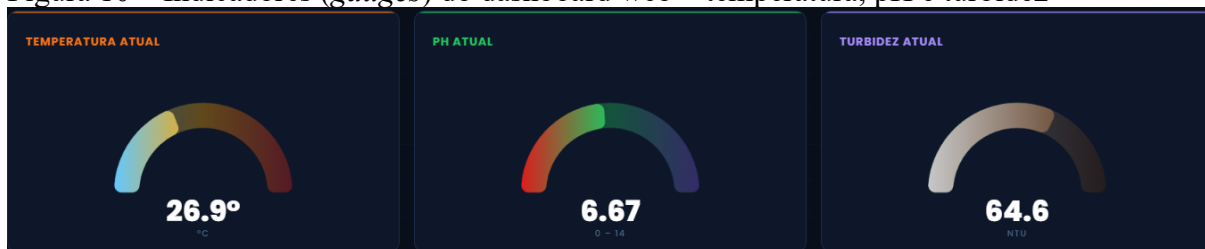
Figura 9 – Gráficos de linha do dashboard web – temperatura, pH e turbidez



Fonte: Autoria própria (2026).

Complementarmente, a Figura 10 apresenta os indicadores em formato de *gauge*, que exibem em tempo real o último valor recebido pela plataforma para cada um dos parâmetros monitorados, permitindo que o usuário identifique rapidamente se a água encontra-se dentro das faixas esperadas de operação.

Figura 10 – Indicadores (*gauges*) do dashboard web – temperatura, pH e turbidez



Fonte: Autoria própria (2026).

A interface foi desenvolvida de forma responsiva, de modo a manter a usabilidade e a legibilidade dos gráficos e indicadores tanto em computadores quanto em dispositivos móveis, o que permite assegurar a acessibilidade do sistema em diferentes dispositivos. Essa característica está de acordo com Duarte (2023) e por Santiago *et al.* (2020), segundo os quais a democratização do acesso aos dados de monitoramento depende diretamente da responsividade da aplicação.

4.2 Comportamento Geral dos Parâmetros Monitorados

A Tabela 5 sintetiza os valores médios, os intervalos observados e a conformidade de cada parâmetro frente aos respectivos limites normativos discutidos no referencial teórico.

Tabela 5 – Estatísticas dos parâmetros monitorados e sua conformidade normativa

Parâmetro	Média ($\pm$ Desvio padrão)	Intervalo observado	Limite normativo	Conformidade
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	26,54 ($\pm$ 0,39)	25,75 a 27,44	Sem limite normativo (Libânio, 2010)	Não aplicável
pH	6,69 ($\pm$ 0,20)	5,86 a 7,36	6,0 a 9,0 (CONAMA, 2005)	99,5%
Turbidez (NTU)	64,36 ($\pm$ 1,88)	57,70 a 69,55	$\leq$ 5,0 (Brasil, 2017)	0% (não conforme)

Fonte: Autoria própria (2026).

4.2.1 Temperatura

A temperatura da água variou entre 25,75 $^{\circ}\text{C}$ e 27,44 $^{\circ}\text{C}$, com média de 26,54 $^{\circ}\text{C}$ e desvio padrão de 0,39 $^{\circ}\text{C}$, apresentando, portanto, baixa variabilidade ao longo dos dez dias de coleta. Observou-se um padrão bem definido ao longo do dia, em que a média horária mais baixa ocorreu por volta das 11h (25,96 $^{\circ}\text{C}$), enquanto a média mais alta foi registrada próximo às 20h (27,07 $^{\circ}\text{C}$).

Esse comportamento é compatível com o que descreve Vieira (2019), segundo o qual a temperatura da água apresenta forte dependência climática, variando ao longo do dia em resposta às oscilações da temperatura atmosférica. O atraso entre o horário de maior incidência solar e o horário de temperatura máxima da água, evidenciado pelo pico ocorrendo no início da noite, é consistente, considerando que a água absorve o calor ao longo do dia e o libera mais lentamente do que a atmosfera ao seu redor.

Conforme discutido anteriormente neste trabalho, a legislação brasileira de potabilidade não estabelece limites normativos para a temperatura da água, dada a dificuldade técnica de alteração artificial dessa grandeza em grandes volumes e seus efeitos diretos limitados à saúde humana (Libânio, 2010). Ainda assim, o monitoramento contínuo desse parâmetro mostrou-se relevante neste trabalho, na medida em que permitiu identificar o padrão cíclico diário de forma automatizada, informação que, em um cenário de operação real, poderia cooperar no ajuste preditivo de dosagens de produtos químicos em estações de tratamento.

4.2.2 Potencial Hidrogeniônico

Desconsiderando o episódio de instabilidade que será discutido a seguir, o pH apresentou comportamento estável ao longo do período de coleta, com média de 6,69 e desvio padrão de apenas 0,20, variando entre 5,86 e 7,36. Nessa condição, 99,5% das leituras permaneceram dentro da faixa de 6,0 a 9,0 estabelecida pelo CONAMA, ainda que não exista um limite atualmente específico de pH para a água tratada distribuída, o que caracteriza, em média, uma água com comportamento levemente ácido próximo do neutro.

Durante o processamento dos dados, foram identificados cinco episódios distintos em que o pH registrado caiu abaixo de 6,0, totalizando 27 das 960 leituras (2,8% do total). O mais expressivo desses episódios ocorreu entre às 22h15 do dia 18 de junho e as 4h15 do dia 19 de junho, no qual o valor de pH chegou a 3,37, sendo uma queda muito acentuada e isolada frente à estabilidade observada no período de medição.

A análise do comportamento desse episódio aponta para uma falha de leitura do sensor, e não para uma alteração real da acidez da água. Esse entendimento é sustentado por três observações. Primeiramente, os outros parâmetros monitorados, temperatura e turbidez, não apresentaram qualquer alteração simultânea durante o mesmo intervalo, permanecendo dentro de seus padrões normais. Em segundo lugar, a oscilação ocorreu de forma inconsistente e com elevada variabilidade ponto a ponto, alternando entre leituras coerentes e leituras extremas em intervalos de poucos minutos, que pode ser conferido a partir da Figura 11, padrão característico de ruído elétrico ou de instabilidade momentânea do sinal analógico, e não de uma transição gradual esperada. Por fim, a magnitude observada (pH 3,37) está fora de qualquer faixa plausível para o recurso monitorado ao longo de todo o período de coleta, sem qualquer precedente nos demais dias analisados.

Figura 11 – Histórico de leitura do pH no episódio mencionado



Fonte: Autoria própria (2026).

Adicionalmente, não houve renovação da amostra de água durante o intervalo em que o episódio ocorreu, permanecendo a mesma porção de água monitorada imediatamente antes, durante e após a queda registrada. Esse fator reduz significativamente a plausibilidade de uma contaminação química real nesse intervalo, uma vez que não haveria via de introdução de um agente contaminante na amostra sem qualquer intervenção externa, reforçando a hipótese de falha de leitura do sensor.

Tecnicamente, esse comportamento é compatível com as limitações já esperadas para o sensor PH-4502C. Por se tratar de um sensor analógico, cuja leitura depende da conversão de um potencial elétrico para a escala de pH (Monteiro, 2020), esse tipo de componente está sujeito a interferências como ruído elétrico na alimentação, oxidação ou mau contato nos conectores, formação de bolhas na membrana de vidro do eletrodo e, principalmente, à necessidade de calibração periódica, ausente em sensores analógicos de baixo custo quando comparados a soluções comerciais como as da Atlas Scientific, conforme mencionado pela própria literatura consultada (Monteiro, 2020). Embora não seja possível confirmar com absoluta certeza qual dessas interferências específicas gerou o episódio observado, a fragilidade documentada do sensor a esse tipo de falha, associada aos indícios apresentados anteriormente, sustenta a hipótese de falha de leitura como a explicação mais plausível para o comportamento registrado.

Esse achado evidencia uma limitação técnica relevante do protótipo desenvolvido e aponta para a necessidade de, em trabalhos futuros, implementar rotinas de tratamento de sinal, como filtros de mediana, que são eficazes na rejeição de leituras de ruídos (outliers), ou descarte de leituras com variação abrupta entre amostras consecutivas, bem como protocolos periódicos de recalibração do sensor de pH, de modo a aumentar a confiabilidade das medições e reduzir a ocorrência de falsos alertas em um cenário de uso real do sistema.

4.2.3 Turbidez

Ao longo dos dez dias de monitoramento, a turbidez apresentou valor médio de 64,36 UNT, com desvio padrão de 1,88 UNT, variando entre um mínimo de 57,70 UNT e um máximo de 69,55 UNT. A reduzida dispersão em torno da média indica que esse parâmetro manteve-se elevado e relativamente estável durante todo o período avaliado, sem oscilações bruscas, o que sugere uma condição contínua de turbidez na água recebida, e não um evento isolado.

Quando comparados aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos hídricos superficiais, a totalidade das leituras situou-se acima dos 40 UNT estabelecidos para a Classe 1, embora nenhuma leitura tenha ultrapassado os 100 UNT

definidos para as Classes 2 e 3 (CONAMA, 2005). Contudo, esse parâmetro normativo aplica-se a corpos hídricos naturais, e não à água já tratada destinada ao consumo humano, sendo apresentado aqui apenas como referência comparativa.

O dado normativo central deste resultado é outro: a totalidade das 960 medições excederam o limite de 5,0 UNT estabelecido pela Portaria de Consolidação nº 5/2017 para a água potável fornecida na rede de distribuição (Brasil, 2017), chegando a registrar valores médios mais de doze vezes superiores ao limite legal. Tratando-se de água já submetida a processos de tratamento convencional pela companhia de abastecimento responsável pelo município, esse resultado configura uma não conformidade relevante e persistente frente ao padrão de potabilidade, e não um comportamento esperado, como seria o caso de uma amostra de água bruta.

Esse achado é especialmente relevante porque, segundo Brito *et al.* (2024), índices elevados de turbidez comprometem a eficácia dos agentes de desinfecção durante o tratamento e favorecem a proliferação de microrganismos, o que pode representar um risco à saúde dos consumidores quando observado já na água de consumo. Como o sensor foi instalado diretamente no ponto de consumo, sem qualquer reservatório doméstico intermediário, esse resultado não pode ser atribuído a um eventual acúmulo de sedimentos em caixa d'água residencial, apontando para causas situadas na própria rede de distribuição. Embora não tenha sido possível confirmar a causa exata dessa não conformidade junto à companhia de abastecimento responsável, a literatura aponta como hipóteses plausíveis para esse tipo de ocorrência a movimentação ou o rompimento de sedimentos depositados ao longo da tubulação, decorrentes de manobras na rede, falhas momentâneas na operação da estação de tratamento de água, ou problemas de vedação e infiltração em trechos da rede de distribuição que atende à residência monitorada (Libânio, 2010).

4.3 Análise de Custo

Além da avaliação técnica do funcionamento do protótipo, é relevante discutir a viabilidade econômica da solução desenvolvida, uma vez que um dos argumentos que justificam o uso de sistemas baseados em IoT no monitoramento da qualidade da água é o seu baixo custo em comparação aos métodos tradicionais de análise laboratorial.

A Tabela 6 apresenta o custo individual de cada componente empregado no desenvolvimento da solução, incluindo o microcontrolador e os sensores de temperatura, pH e de turbidez. Vale ressaltar que os valores contidos nessa tabela, são referentes aos preços pagos

e/ou estimados no período de aquisição dos componentes utilizados no desenvolvimento do protótipo.

Tabela 6 – Custo dos componentes utilizados no protótipo

Componente	Valor (R\$)
ESP32-DevKitC V4	49,00
Sensor de Temperatura (DS18B20)	10,50
Sensor de pH (PH-4502C)	87,00
Sensor de Turbidez (KS0414)	61,59
Total	208,09

Fonte: Autoria própria (2026).

Conforme evidencia a Tabela 6, o custo total dos componentes de hardware utilizados no protótipo foi de R\$208,09. Para efeito de comparação, a Tabela 7 apresenta os valores de mercado de sensores e equipamentos profissionais disponíveis comercialmente no Brasil, referentes a cada um dos três parâmetros monitorados neste trabalho.

Tabela 7 – Comparação de custos sensores utilizados e sensores profissionais

Parâmetro	Valor Protótipo (R\$)	Valor Profissional (R\$)
Temperatura	10,50	179,99
pH	87,00	2.484,00
Turbidez	61,59	8.150,00

Fonte: Autoria própria (2026).

Os valores contidos na Tabela 7 tiveram como base equipamentos profissionais como o turbidímetro portátil HI93703C (Hanna Instruments) para turbidez, o sensor de temperatura Pt100 (Novus) para temperatura, e o eletrodo industrial de pH HI6100405 (Hanna Instruments) para o pH. É importante destacar que essa comparação tem caráter de referência de mercado, e não representa necessariamente os equipamentos utilizados pela companhia de abastecimento responsável pelo município onde as amostras foram coletadas.

Observa-se que, para os três parâmetros monitorados, os sensores de baixo custo utilizados no protótipo representam uma fração pequena do valor de mercado dos equipamentos profissionais equivalentes. É importante ressaltar que essa comparação não é estritamente

equivalente do ponto de vista metrológico, onde os equipamentos profissionais citados possuem certificação, maior durabilidade e precisão superiores às dos sensores de baixo custo utilizados no protótipo, sendo destinados a aplicações industriais e a processos que exigem maior rigor analítico.

Cabe destacar também que o armazenamento em nuvem utilizado, foi empregado neste trabalho dentro do seu plano gratuito, não gerando custos adicionais para o desenvolvimento e a operação do protótipo durante o período de coleta.

De modo geral, o baixo custo dos componentes utilizados, ainda que associado a uma menor precisão em comparação aos equipamentos profissionais, evidencia que a integração entre sensores de baixo custo, microcontroladores embarcados e plataformas gratuitas de armazenamento constitui uma alternativa financeiramente acessível para o monitoramento contínuo da qualidade da água, especialmente em aplicações de triagem, acompanhamento preliminar de tendências e identificação ágil de alterações, nas quais o custo elevado dos métodos tradicionais pode inviabilizar um monitoramento mais frequente e distribuído.

4.4 Síntese dos Resultados

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que o sistema desenvolvido foi capaz de realizar a aquisição contínua dos parâmetros de qualidade da água propostos, atendendo aos objetivos específicos estabelecidos. A integração entre o microcontrolador ESP32, o banco de dados em nuvem *Firebase Realtime Database* e a aplicação *web* desenvolvida permitiu o armazenamento, a visualização gráfica e o acompanhamento remoto dos dados, validando a arquitetura proposta na metodologia.

Os resultados de turbidez revelaram uma não conformidade persistente e relevante frente aos padrões de potabilidade vigentes, com valores médios mais de doze vezes superiores ao limite legal de 5,0 UNT, mesmo se tratando de água já submetida a tratamento pela companhia de abastecimento responsável pelo município. Esse achado demonstra, na prática, o valor do monitoramento contínuo proposto neste trabalho, capaz de identificar de forma automatizada uma condição que, em um cenário de monitoramento convencional e pouco frequente, poderia passar despercebida por períodos prolongados. Os resultados de temperatura revelaram um padrão diário coerente com a literatura consultada, sem indícios de anomalias relacionadas a interferências antrópicas diretas. Já os resultados de pH demonstraram comportamento estável na grande maioria do período avaliado, mas evidenciaram uma limitação técnica importante do protótipo, relacionada à sensibilidade do sensor analógico

empregado a interferências elétricas, sinalizando um ponto relevante para o aprimoramento do sistema em trabalhos futuros.

Adicionalmente, a análise de custos evidenciou a viabilidade econômica da solução desenvolvida, cujo valor total dos componentes correspondem a uma pequena fração do custo de equipamentos profissionais equivalentes disponíveis no mercado nacional.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de monitoramento da qualidade da água baseado na arquitetura da IoT, integrando a coleta de dados por meio de sensores em um microcontrolador ESP32, ao armazenamento em nuvem via *Firebase Realtime Database* e a visualização interativa em uma plataforma *web* responsiva. A partir dos resultados apresentados, é possível afirmar que o objetivo foi atingido de forma satisfatória, uma vez que o protótipo desenvolvido foi capaz de realizar a aquisição contínua dos parâmetros de pH, temperatura e turbidez, transmiti-los de forma remota e disponibilizá-los ao usuário por meio de uma interface gráfica de fácil compreensão.

Quanto aos objetivos específicos, todos foram alcançados. O módulo de hardware embarcado, composto pelo microcontrolador ESP32 e pelos sensores KS0414, PH-4502C e DS18B20, mostrou-se capaz de realizar a aquisição dos dados de qualidade da água de forma contínua e automatizada. A comunicação sem fio via *Wi-Fi* possibilitou a transmissão ininterrupta dos dados coletados para o *Firebase Realtime Database*, validando a arquitetura de nuvem proposta na metodologia. A aplicação *web* desenvolvida demonstrou-se capaz de consumir os dados armazenados e apresentá-los de forma gráfica e intuitiva, por meio de gráficos de linha e indicadores do tipo *gauge*. Por fim, a responsividade da interface foi assegurada, permitindo o acompanhamento dos dados tanto em computadores quanto em dispositivos móveis, sem perda de usabilidade.

Entre os principais resultados obtidos, destaca-se o comportamento do parâmetro de temperatura, que apresentou um padrão cíclico diário bem definido e coerente, evidenciando a sensibilidade do sistema para capturar variações naturais e previsíveis da água monitorada. Da mesma forma, o pH manteve-se estável durante a quase totalidade do período avaliado, embora um episódio de instabilidade do sensor analógico utilizado tenha sido identificado e discutido como uma limitação técnica relevante do protótipo, e não como uma alteração real da água monitorada. Já o parâmetro de turbidez revelou uma não conformidade persistente frente aos limites de potabilidade vigentes, o que reforça, na prática, a relevância de soluções de monitoramento contínuo como a desenvolvida neste trabalho para a identificação ágil de alterações na qualidade da água.

De forma geral, conclui-se que a integração entre sensores de baixo custo, microcontroladores embarcados e plataformas de armazenamento em nuvem constitui uma alternativa viável e acessível para o monitoramento contínuo dos índices de qualidade da água, em comparação aos métodos tradicionais de amostragem laboratorial, caracterizados por maior

custo e menor frequência de coleta. O sistema desenvolvido demonstrou potencial para subsidiar a identificação ágil de alterações na água monitorada, contribuindo para a gestão dos recursos hídricos e para a segurança no consumo humano.

Por fim, destaca-se que, embora o protótipo desenvolvido tenha atendido aos objetivos propostos, as limitações identificadas ao longo do trabalho, especialmente quanto à sensibilidade do sensor de pH a interferências elétricas, evidenciam que ainda há espaço para o aprimoramento da solução, de modo a aumentar a confiabilidade das medições em um cenário de operação contínua e de longo prazo.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de medições em outros pontos de coleta situados em diferentes distâncias do ponto de distribuição da rede de abastecimento, o que possibilita avaliar se as não conformidades de turbidez identificadas neste trabalho estão relacionadas a características específicas do trecho da rede ou se representam um comportamento mais amplo do sistema de distribuição como um todo. Sugere-se, também, a coleta da água bruta diretamente da fonte de captação, antes do processo de tratamento, de modo a permitir uma comparação mais completa entre as condições da água bruta e da água tratada, contribuindo para uma análise mais abrangente da eficácia do tratamento realizado pela companhia de abastecimento. Recomenda-se ainda o contato direto com a concessionária responsável pelo abastecimento, a fim de verificar possíveis causas operacionais para a não conformidade de turbidez identificada, como manobras na rede de distribuição ou falhas momentâneas na estação de tratamento. Por fim, sugere-se a implementação de um mecanismo de armazenamento local (buffer) no microcontrolador, de modo que, em caso de falha na conexão Wi-Fi, os dados coletados não sejam perdidos, podendo ser enviados posteriormente assim que a conexão for restabelecida.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Indicadores de Qualidade - Índice de Qualidade das Águas (IQA)**. 2004. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/portaldpnqa/indicadores-indice-aguas.aspx>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Qualidade da Água**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/qualidade-da-agua>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- AISLAN, Saulo. **Monitorando o pH de líquidos com ESP32 e Sensor PH-4502c**. Blog Eletrogate, 8 ago. 2024. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/monitorando-o-ph-de-liquidos-com-esp32-e-sensor-ph-4502c/>. Acesso em: 17 jun. 2026.
- AMERICO, Gabriel Michels; IZIDORO, Cleber Lourenço. Sistema de baixo custo para monitoramento do consumo de água. **Revista Vincci – Periódico Científico do UniSATC**, v. 7, n. 1, p. 292-317, 2022.
- ANDRADE, João Carlos de. Química analítica básica: os conceitos acido-base e a escala de pH. **Revista Chemkeys**, Campinas, SP, n. 1, p. 1–6, 2018. DOI: 10.20396/chemkeys.v0i1.9642. Disponível em: <https://econtents.sbu.unicamp.br/inpec/index.php/chemkeys/article/view/9642>. Acesso em: 7 jun. 2026.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde (FUNASA). **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2014. 112 p. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manualcont_quali_agua_tecnicos_trab_emetas.pdf. Acesso em: 31 mai. 2026.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2017. Disponível em: http://www.portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf. Acesso em: 27 mai. 2026.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 31 mai. 2026.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2011. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acesso em: 27 mai. 2026.

BRITO, William Marreiro *et al.* Sistema em Tempo Real de Monitoramento da Qualidade de Água e Prevenção de Mosquitos. In: SEMINÁRIO INTEGRADO DE SOFTWARE E HARDWARE (SEMISH), 52., 2025, Maceió. **Anais [...]**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2025. p. 537-548. ISSN 2595-6205. DOI: <https://doi.org/10.5753/semish.2025.9243>.

CIMPLEO GROUP. **Arduino pH Meter with PH-4502C: wiring, calibration & code guide**. Disponível em: <https://cimpleo.com/blog/arduino-ph-meter-using-ph-4502c/>. Acesso em: 17 jun. 2026.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Apêndice D – Índices de Qualidade das Águas**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2016. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/dx/api/dam/v1/collections/d583e90b-c01c-49b5-b3a9-9a3a31c742bf/items/16aae8fa-2cd3-409f-a6d1-c24af53340f0/renditions/1ea3a1af-8c8f-4600-82a5-f402a0791b62?binary=true>. Acesso em: 10 jun. 2026.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Diário Oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso em: 03 jun. 2026.

CORREIA, A. *et al.* Análise da turbidez da água em diferentes estados de tratamento. In: ENCONTRO REGIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 8., 2008, Natal. **Anais [...]**. Natal, 20 a 22 nov. 2008.

CORREIA, Jornandes Jesús. Definições de temperatura em fontes didáticas. **Revista Binacional Brasil-Argentina: Diálogo entre as ciências**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 201-220, 2026. DOI: 10.22481/rbba.v6i1.1520. Disponível em: <https://periodicos2.uesb.br/rbba/article/view/1520>. Acesso em: 03 jun. 2026.

COSTA, Fernando Barbosa; FERREIRA, Vanderlei de Oliveira. Análise de parâmetros que compõem o índice de qualidade das águas (IQA) na porção mineira da bacia do rio Paranaíba. **Revista Eletrônica de Geografia**, v. 7, n. 18, p. 22-47, 2015.

DIAS, Dimária Aparecida Fernandes; GONÇALVES, José Augusto Costa. Índice de Qualidade da Água-IQA no médio curso rio Piracicaba (MG) para os anos de 2011 e 2020. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 6, p. 4575-4595, 2024.

DIGIMED. **Técnica de Análise de Turbidez**. 13 mar. 2023. Disponível em: https://www.digimed.ind.br/br/suporte/blog/tecnica_de_analise_de_turbidez. Acesso em: 03 jun. 2026.

DIMENSIONAL. **Sensor Temperatura Pt100 Cabeçote Grande Isolado Rosca BSP 1/2" 0 a 100 Graus 100mm Aço Inox AISI 316 – Novus**. Disponível em: <https://www.dimensional.com.br/sensor-temperatura-pt100-cabecote-grande-isolado-rosca-bsp-1-2-0-a-100-graus-100mm-aco-ino-aisi-316-pt-8830007750-novus/p>. Acesso em: 03 jul. 2026.

DUARTE, T. D. **Sistema integrado de monitoramento de consumo de água residencial**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

DUTRA, M. M. **Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Baixo Custo e Aplicativo Móvel para Medição do Consumo de Água**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-DevKitC V4: user guide**. Espressif, 2026. Disponível em: https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32/devkitc/user_guide.html. Acesso em: 28 mai. 2026.

FIGUEIREDO, Lucca Amaury Lopes; PACHECO, Maria Dos Anjos Fernandes. Automação residencial de baixo custo. **RevistaFT**, v. 29, ed. 151, 25 out. 2025. DOI: 10.69849/revistaft/ni10202510251523. ISSN 1678-0817.

FONDRIEST ENVIRONMENTAL, INC. **Turbidity, Total Suspended Solids and Water Clarity**. Fundamentals of Environmental Measurements, 13 jun. 2014. Disponível em: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/>. Acesso em: 01 jun. 2026.

FONDRIEST ENVIRONMENTAL, INC. **Water Temperature**. Fundamentals of Environmental Measurements, 7 fev. 2014. Disponível em: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/water-temperature/>. Acesso em: 03 jun. 2026.

FORTES, Ana Carolina Chaves; BARROCAS, Paulo Rubens Guimarães; KLIGERMAN, Débora Cynamon. A vigilância da qualidade da água e o papel da informação na garantia do acesso. **Saúde em Debate**, [S. l.], v. 43, n. esp. 3, p. 20–34, dez. 2019. Disponível em: <https://saudeemdebate.org.br/sed/article/view/2666>. Acesso em: 6 jun. 2026.

GESSER, Kelly Cristini; ALVES, Anderson. CUSTOMIZAÇÃO E REDUÇÃO DE CUSTO EM UM PRODUTO DE MEDIÇÃO DE PH. **Revista Ilha Digital**, Florianópolis, v. 7, p. 104–115, 2018. Disponível em: <https://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/index.php/ilhadigital/article/view/105>. Acesso em: 7 jun. 2026.

GOOGLE EARTH. **Google Earth**. 2026. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 03 jul. 2026.

GOOGLE. **Firestore Realtime Database**. [s.d.]. Disponível em: <https://firebase.google.com/docs/database?hl=pt-br>. Acesso em: 2 abr. 2026.

HANNA INSTRUMENTS DO BRASIL. **Eletrodo Industrial de pH para propósitos gerais – HI6100405**. Disponível em: <https://hannainst.com.br/produto/hi6100405-eletrodo-industrial-ph-geral/>. Acesso em: 03 jul. 2026.

HANNA INSTRUMENTS DO BRASIL. **Turbidímetro Portátil (Método ISO) com maleta de transporte – HI93703C**. Disponível em: <https://hannainst.com.br/produto/hi93703c-turbidimetro-portatil-metodo-iso-com-maleta-de-transporte/>. Acesso em: 03 jul. 2026.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Índice de qualidade das águas – IQA**. 2024. Disponível em: <https://igam.mg.gov.br/w/indice-de-qualidade-das-aguas-iqa>. Acesso em: 22 mar. 2026.

KEYESTUDIO. **KS0414 Keyestudio Turbidity Sensor V1.0**. Keyestudio Wiki, 2021. Disponível em: https://wiki.keyestudio.com/KS0414_Keyestudio_Turbidity_Sensor_V1.0. Acesso em: 14 jun. 2026.

LAMON, A. W. **Aplicação de microssores no monitoramento de oxigênio dissolvido, potencial REDOX e temperatura em estudos limnológicos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

LEAL JUNIOR, Wilmar Borges; ARAUJO, Humberto Xavier de; TAVARES, Fabiano Medeiros. Monitoramento da qualidade da água utilizando plataforma de internet das coisas. **Humanidades & Inovação**, v. 7, n. 9, p. 46-53, 2020.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas: Átomo, 2010. 494 p.

MEDEIROS, Átila de Souza. **Monitoramento e medição de água em um campus inteligente com plataformas de IoT**. 2023. 132 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia da Informação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2023.

MONTEIRO, Lucas Nunes. **Sistema de monitoramento da qualidade da água em tempo real**. Universidade Estadual Paulista (Unesp), São Paulo, 2020.

OLIVEIRA, Edilani Viana *et al.* Sensor de monitoramento de umidade do solo com arduino. In: **Internet das coisas e sustentabilidade: propostas tecnológicas**. 1. ed. Belo Horizonte: Poisson, 2024. cap. 5, p. 37-45.

PONTES, Oseias Paes. HYDROSAFE: sistema de monitoramento da qualidade da água baseado em sensores e microcontroladores. **RevistaFT**, v. 29, ed. 151, 11 out. 2025. DOI: 10.69849/revistaft/pa10202510110822.

POSUDIN, Yuriy. **Methods of Measuring Environmental Parameters**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.

PRABHU, Shreepad. **Interfacing DS18B20 1-Wire Digital Temperature Sensor with Arduino**. Last Minute Engineers, 29 dez. 2018. Disponível em: <https://lastminuteengineers.com/ds18b20-arduino-tutorial/>. Acesso em: 16 jun. 2026.

ROSA, Evandro de Assis; RALL, Ricardo. Protótipo de sistema embarcado IoT de coleta de turbidez da água utilizando o microcontrolador ESP32 LoRa. **Tekhne e Logos**, Botucatu, SP, v. 16, n. 1, maio 2025. ISSN 2176-4808.

ROSSI, Guilherme. **ESP32 Low-Power: maximizando a eficiência de seus projetos IoT**. Microprogramador, 6 jul. 2023. Disponível em: <https://www.microprogramador.com.br>. Acesso em: 28 mai. 2026.

SANTIAGO, Cynthia Pinheiro *et al.* Desenvolvimento de sistemas Web orientado a reuso com Python, Django e Bootstrap. **Sociedade Brasileira de Computação**, v. 25, 2020.

SANTOS, R. M. *et al.* Sistema de monitoramento da qualidade da água usando internet das coisas. In: **Internet das coisas e sustentabilidade: propostas tecnológicas**. 1. ed. Belo Horizonte: Poisson, 2024. cap. 4, p. 28-36.

SARAVATI. **Explorando o Potencial do ESP32 em Projetos IoT**. Blog Saravati, 15 jan. 2024. Disponível em: <https://blog.saravati.com.br>. Acesso em: 28 mai. 2026.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA. SEMIL. **IQA – Índice da Qualidade da Água**. 2025. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/iqa-indice-da-qualidade-da-agua/>. Acesso em: 23 mar. 2026.

SILVA, Jonatha Bizerra. **Sistemas IoT e processamento de dados baseados em inteligência artificial para monitoramento de pressões e vazões na rede de distribuição de água**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2024.

SOARES, Alexandra Fátima Saraiva; FRANCO, Rafaela; ASSIS, Jéssica Maria Guimarães de. Análise preliminar da nova portaria de potabilidade da água (PRT GM/MS nº 888/2021). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 12., 2021, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: IBEAS, 2021.

THOMSEN, Adilson. **Medindo temperatura debaixo d'água com sensor DS18B20**. MakerHero, 2 jun. 2015. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/sensor-de-temperatura-ds18b20-arduino/>. Acesso em: 16 jun. 2026.

TURBIDEZ e sólidos suspensos totais. Água & Efluentes, 20 dez. 2022. Disponível em: <https://www.aguaeeffluentes.com.br/post/turbidez-e-s%C3%B3lidos-suspensos-totais>. Acesso em: 29 mai. 2026.

VIEIRA, Maurrem Ramon. Os principais parâmetros monitorados pelas sondas multiparâmetros são: pH, condutividade, temperatura, turbidez, clorofila ou cianobactérias e oxigênio dissolvido. Disponível em: https://www.agsolve.com.br/news_upload/file/Parametros%20da%20Qualidade%20da%20Agua.pdf.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 452 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1).

ZUCHRIADI, Achmad *et al.* Module-level power consumption analysis of ESP32 wroom and ESP32 dfrobot under normal and deep sleep operation. **Jurnal Mantik**, v. 9, n. 4, fev. 2026. ISSN 2685-4236.