



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

TALES IGOR ALMEIDA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA ANÁLISE DE
PARÂMETROS DA QUALIDADE DA ÁGUA**

PAU DOS FERROS-RN

2026

TALES IGOR ALMEIDA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA ANÁLISE DE
PARÂMETROS DA QUALIDADE DA ÁGUA**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Sharon Dantas da Cunha, 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.

S586d Silva, Tales Igor Almeida.
Desenvolvimento de um sistema embarcado para
análise de parâmetros da qualidade da água / Tales
Igor Almeida Silva. - 2026.
87 f. : il.

Orientador: Sharon Dantas da Cunha.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2026.

1. Sensores de análise. 2. Qualidade da água.
3. Baixo custo. 4. ESP32. 5. Sensores Arduino. I.
Cunha, Sharon Dantas da, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(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.

TALES IGOR ALMEIDA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA ANÁLISE DE
PARÂMETROS DA QUALIDADE DA ÁGUA**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 25/06 /2026

BANCA EXAMINADORA

Sharon Dantas da Cunha, Prof. Dr. (UFERSA)

Presidente

Aline Mara Maia Bessa, Prof.^a Dr.^a (UFERSA)

Membro Examinador

Kytéria Sabina Lopes de Figueredo, Prof.^a Dr.^a (UFERSA)

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a quem dedico toda a honra e a glória, pela proteção, pelo cuidado ao longo de todos esses anos e pelo sustento diário em minha vida e em meu lar.

À minha mãe, dona Ceição, uma mulher guerreira, simples e extraordinária, expresso minha profunda gratidão. Seu apoio constante, cuidado e paciência foram fundamentais, especialmente nos momentos em que pensei em desistir. Ao meu pai, Alcivan Almeida, um homem admirável, agradeço pelo companheirismo, pela força e por sempre se dispor a me levar à faculdade, independentemente do dia ou do horário.

À minha avó, Maria Almeida, mulher forte e de coração enorme, que nunca deixou de torcer e de me apoiar, meu muito obrigado pelo privilégio de tê-la em minha vida. Aos meus irmãos, Bárbara, Joassey, Michelly, Nanda, Fran e Vitor, pessoas fantásticas e grandes inspirações, agradeço por toda a companhia e simplicidade. Sem vocês, essa conquista não teria o mesmo sentido.

Expresso meus sinceros agradecimentos ao meu orientador e amigo, Prof. Sharon Dantas, que me ajudou e orientou não só na realização deste trabalho, mas desde o começo da minha jornada. Além de ser uma pessoa excelente e admirável, é um exímio profissional, e sem as suas contribuições esta pesquisa não poderia ser publicada.

Aos amigos de jornada, Pedro Artur e Berg Lopes, pessoas excepcionais e inteligentes, agradeço por tornarem essa etapa mais alegre. Deixo um agradecimento especial aos 'Discípulos de Sharon', amigos que levarei para a vida, a convivência e o companheirismo de todos vocês tornaram os desafios acadêmicos muito mais leves.

Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a minha trajetória e para a conclusão desta etapa.

EPÍGRAFE

"A imaginação é mais importante que o conhecimento. O conhecimento é limitado. A
imaginação circunda o mundo."

Albert Einstein

RESUMO

A análise da qualidade da água ainda é um desafio em diversas regiões, sobretudo onde o acesso a equipamentos laboratoriais de alta precisão é limitado pelo custo elevado. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar um sistema embarcado de baixo custo para análise de parâmetros de qualidade da água, utilizando o microcontrolador ESP32 integrado a sensores de pH, turbidez, temperatura e condutividade elétrica, além de uma interface Android desenvolvida no MIT App Inventor para visualização dos dados. A pesquisa justifica-se pela necessidade de disponibilizar alternativas acessíveis para a análise da qualidade da água, reduzindo a dependência de equipamentos laboratoriais de elevado custo. A metodologia consistiu na construção do protótipo, programação do sistema na Arduino IDE, calibração dos sensores e validação experimental por meio da comparação das medições obtidas com equipamentos de referência do Laboratório de Poluição Ambiental da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), utilizando amostras coletadas na barragem do município de Pau dos Ferros-RN. Os resultados demonstraram que o sistema apresentou elevada concordância com as medições de referência para os parâmetros de pH e condutividade elétrica após o processo de calibração, evidenciando boa precisão e funcionamento estável da interface de aquisição de dados. Conclui-se que o protótipo desenvolvido constitui uma solução funcional, de baixo custo e com potencial para aplicações na análise da qualidade da água, contribuindo para ampliar o acesso a tecnologias embarcadas voltadas às atividades acadêmicas, ambientais e de pesquisa.

Palavras-chave: sensores de análise; qualidade da água; baixo custo; ESP32; sensores Arduino.

ABSTRACT

Water quality analysis remains a challenge in several regions, especially where access to high-precision laboratory equipment is limited by its high cost. Given this scenario, this work aims to develop and validate a low-cost embedded system for the analysis of water quality parameters, using the ESP32 microcontroller integrated with pH, turbidity, temperature, and electrical conductivity sensors, along with an Android interface developed in MIT App Inventor for data visualization. The research is justified by the need to provide accessible alternatives for water quality analysis, reducing dependence on high-cost laboratory equipment. The methodology consisted of building the prototype, programming the system in the Arduino IDE, calibrating the sensors, and conducting experimental validation through the comparison of the measurements obtained with reference equipment from the Environmental Pollution Laboratory of the Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), using samples collected from the dam in the municipality of Pau dos Ferros-RN. The results showed that the system presented high agreement with the reference measurements for the pH and electrical conductivity parameters after the calibration process, evidencing good accuracy and stable operation of the data acquisition interface. It is concluded that the developed prototype constitutes a functional, low-cost solution with potential for applications in water quality analysis, contributing to broaden access to embedded technologies aimed at academic, environmental, and research activities.

Keywords: analysis sensors; water quality; low cost; ESP32; Arduino sensors .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arduino Uno R3.....	21
Figura 2 - Microcontrolador ESP32.....	24
Figura 3 - Sensor Ds18b20.....	26
Figura 4 - Sensor PH-4502C.....	28
Figura 5 - Sensor de turbidez.....	29
Figura 6 - Sensor tds meter v1.0.....	31
Figura 7 - Ligações do sensor de ph com o esp32.....	37
Figura 8 - Ligações do sensor de turbidez.....	38
Figura 9 - Ligação sensor de CE.....	38
Figura 10 - Ligação sensor de temperatura.....	39
Figura 11 - Projeto montado e pronto para execução.....	39
Figura 12 - Potenciômetro sensor pH.....	41
Figura 13 - Sensor medindo tensão no ph 7.....	42
Figura 14 - Calibração via software (pH 4).....	43
Figura 15 - Valores brutos de turbidez obtidos nas amostras pelo sensor.....	44
Figura 16 - Comprovação da calibração sensor de temperatura.....	45
Figura 17 - Calibração sensor condutividade elétrica.....	46
Figura 18 - Sensor pH laboratório.....	47
Figura 19 - Sensor de ce laboratório.....	47
Figura 20 - Sensor de turbidez laboratório.....	48
Figura 21 - Organização das coletas (Amostra 1, ponto 2).....	49
Figura 22 - Dispersão ESP32 x laboratório.....	46
Figura 23 - Comparação de leituras (ESP32 x laboratório).....	46
Figura 24 - Comportamento instável do sensor de turbidez nas amostras iniciais, evidenciando os primeiros sinais de degradação do componente óptico. A figura é para a) dados do ESP32 e b) dados do laboratório.....	48
Figura 25 - Gráfico diagnóstico do sensor de turbidez falho (Leitura bruta do adc do esp32 x laboratório).....	49
Figura 26 - Dispersão e acompanhamento das amostras da CE do protótipo e da CE do equipamento de referência.....	51
Figura 27 - CE com fator de conversão $K=0,6542$	54
Figura 28 - Interface de usuário desenvolvida em ação.....	55
Figura 29 - Programação em blocos da interface web no mit app inventor. A figura é para a) inicialização do bluetooth e comunicação com o esp32. b) para leitura e coleta dos dados dos sensores e c) para desconectar o bluetooth.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de materiais e custos do protótipo.....	31
Tabela 2 - Ligação dos sensores com o ESP32.....	41
Tabela 3 - Comparativos de leituras de pH na primeira amostragem (dados descartados).....	44
Tabela 4 - Comparativo das leituras de pH: Protótipo (ESP32) vs. Equipamento de Laboratório.....	45
Tabela 5 – Comparativo inicial de Turbidez: Protótipo vs. Laboratório.....	48
Tabela 6 – Diagnóstico de falha: Leitura bruta do ADC (ESP32) vs. Laboratório.....	49
Tabela 7 - Dados correlacionados de Temperatura e Condutividade Elétrica (CE).....	50
Tabela 8 - Aplicação do Fator de Calibração ($K = 0,6542$) aos dados de Condutividade Elétrica.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC – Conversor Analógico-Digital

BLE – Bluetooth Low Energy (Bluetooth de baixo consumo)

CE – Condutividade Elétrica

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

ESP32 – Microcontrolador da Espressif Systems

ETA – Estação de Tratamento de Água

HTTP – Hypertext Transfer Protocol

IoT – Internet of Things (Internet das Coisas)

M2M – Machine to Machine (Máquina a Máquina)

MAE – Erro Absoluto Médio (Mean Absolute Error)

MAPE – Erro Relativo Médio (Mean Absolute Percentage Error)

MIT – Massachusetts Institute of Technology

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport (Telemetria por Fila de Mensagens)

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez (Nephelometric Turbidity Unit)

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONU – Organização das Nações Unidas

SA – Saída Analógica

SD – Saída Digital

SPP – Serial Port Profile (Perfil de Porta Serial)

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

TDS – Sólidos Totais Dissolvidos (Total Dissolved Solids)

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

VMP – Valor Máximo Permitido

LISTA DE SÍMBOLOS

% – Porcentagem

°C – Graus Celsius

uT – Unidade de Turbidez

uH – Unidade Hazen

± – Mais ou menos (margem de erro/tolerância)

MHz – Megahertz

V – Volts

mA – Miliamperes

mg/L – Miligramas por litro

ppm – Partes por milhão

μS/cm – Microsiemens por centímetro

K – Fator de conversão / Constante de calibração

kΩ – Quilo-ohm (referente aos resistores do divisor de tensão)

R² – Coeficiente de determinação

Hz – Hertz (taxa de atualização)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 Sistemas embarcados.....	19
2.2 Microcontroladores mais utilizados.....	20
2.2.1 Arduíno.....	21
2.2.2 ESP 32.....	22
2.2.3 PIC.....	22
2.2.4 ARM.....	22
2.3 Microcontrolador ESP32.....	23
2.4 Conectividade e Iot.....	25
2.5 Instrumentação e sensoriamento.....	25
2.5.1 Sensor de temperatura (Ds18b20).....	26
2.5.2 Sensor de pH (PH-4502C).....	26
2.5.3 Sensor de turbidez (Water Turbidity Detection).....	28
2.5.4 Sensor de condutividade elétrica (TDS METER V1.0).....	30
2.6 Interface Android e web.....	32
2.7 Aplicações em análise de água.....	34
3 METODOLOGIA.....	35
3. 1 Planejamento do sistema embarcado.....	35
3.2 Montagem do protótipo.....	36
3.2.1 Seleção dos sensores e componentes eletrônicos.....	36
3.2.2 Escolha e configuração do microcontrolador ESP32.....	37
3.2.3 Desenvolvimento do hardware do sistema embarcado.....	37
3.2.4 Desenvolvimento do software (firmware).....	40
3.2.5 Implementação da comunicação IoT.....	41
3.2.6 Calibração dos sensores.....	41
3.2.6.1 pH.....	41
3.2.6.2 Turbidez.....	43
3.2.6.3 Temperatura.....	45
3.2.6.4 Condutividade elétrica.....	45
3.3 Testes laboratoriais.....	46
3.3.1 Amostragem de água.....	49
3.3.2 Análises de água.....	50
3.4 Análise e avaliação dos dados.....	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1 Arquitetura do sistema embarcado.....	40
4.1.1 Microcontrolador central.....	41
4.1.2 Sensores integrados.....	42
4.1.3 Módulo de comunicação e fluxo de dados.....	42

4.2 Validação do sistema de monitoramento.....	43
4.2.1 PH.....	43
4.2.2 Análise de turbidez e diagnóstico de falha no hardware.....	47
4.2.3 Análise integrada de ce e temperatura.....	50
4.2 Interface de usuário.....	55
4.3 Potencial de aplicação e impacto social.....	57
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
REFERÊNCIAS.....	44
APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO PH CÓDIGO.....	47
APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO CE E TEMPERATURA CÓDIGO.....	49
APÊNDICE C – CÓDIGO PYTHON RELAÇÃO DE TURBIDEZ COM OS COFATORES.....	50
APÊNDICE D – CÓDIGO PARA LER OS VALORES BRUTOS DA TURBIDEZ E DEPOIS JOGAR NO PYTHON E OBTER OS VALORES REAIS DE A E B.....	52
APÊNDICE E – CÓDIGO PARA CALIBRAR SENSOR DE TURBIDEZ USANDO DOIS PONTOS (ÁGUA DESTILADA E ÁGUA COM TERRA).....	54
APÊNDICE F – CÓDIGO COMPLETO DO CIRCUITO E A COMUNICAÇÃO COM A INTERFACE WEB.....	59
APÊNDICE G – PROGRAMAÇÃO DA INTERFACE EM BLOCOS DO MIT APP INVENTOR.....	63

1 INTRODUÇÃO

A manutenção da qualidade da água é uma exigência essencial para a preservação da saúde pública e para o equilíbrio dos ecossistemas ambientais (SILVA, 2023). Em escala global, a Organização das Nações Unidas (ONU) reforça essa prioridade por meio do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, que determina metas claras para a gestão sustentável dos recursos hídricos (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2025). No cenário brasileiro, a segurança hídrica é regulamentada por legislações rigorosas. A Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece os padrões de potabilidade para o consumo humano (BRASIL, 2021), enquanto a Resolução CONAMA nº 357/2005 define os critérios qualitativos para a proteção da vida aquática e a classificação das bacias hidrográficas (BRASIL, 2005). Para assegurar o cumprimento dessas normativas e prevenir riscos sanitários, a medição periódica das propriedades físicas e químicas da água torna-se um procedimento obrigatório (SILVA, 2023).

Apesar da importância inquestionável desse controle, realizar análises contínuas da água esbarra em grandes dificuldades práticas e financeiras. O método tradicional exige que a água seja coletada manualmente nos mananciais e transportada até laboratórios especializados (SILVA, 2023). Nesses locais, a avaliação é feita por equipamentos de bancada muito precisos. No entanto, a literatura destaca que esses aparelhos são muito caros, exigem manutenção constante e precisam de profissionais bem treinados para operá-los (SILVA, 2023). Por causa de todas essas exigências, o processo atual acaba sendo lento, caro e totalmente dependente de uma infraestrutura laboratorial física. Além disso, o tempo de espera entre a coleta da água e a entrega dos resultados atrasa a descoberta de contaminações, o que impede uma ação rápida para proteger a população e o meio ambiente. Diante desse cenário, fica clara a necessidade de criar novas soluções tecnológicas que sejam mais acessíveis, portáteis e que funcionem de maneira automática.

Para preencher essa lacuna, a engenharia aplicada aos sistemas digitais embarcados e à Internet das Coisas (IoT) consolida-se como a abordagem tecnológica ideal (SILVA, 2023). A utilização de microcontroladores modernos permite descentralizar a aquisição de dados, substituindo laboratórios caros por arranjos eletrônicos compactos. Pesquisas recentes vêm explorando o uso de microcontroladores de código aberto aplicados à avaliação hídrica e à rastreabilidade de parâmetros (CAMARA et al., 2021; PEREIRA, 2023; SILVA, 2022). Camara et al. (2021), por exemplo, criaram um sistema com Arduino Uno para avaliar a água

do Lago Javary (RJ) em tempo real. O protótipo usa sensores de pH, temperatura, turbidez e nível da água, enviando os dados via Bluetooth para um smartphone. Na mesma linha, Silva (2022) desenvolveu a "Sonda MAQUA", um equipamento movido a energia solar projetado para funcionar sem intervenção humana. Validado em um reservatório da usina de bioenergia da Raízen (SP), o sistema mediu remotamente o pH, a temperatura e a turbidez da água. Já Pereira (2023) utilizou o Arduino para rastrear a qualidade da água potável desde a Represa de Guarapiranga até as torneiras de residências em São Paulo (SP), medindo pH, condutividade e sólidos dissolvidos.

Embora esses trabalhos comprovem a viabilidade da IoT na gestão hídrica, eles apresentam limitações técnicas estruturais e operacionais em suas propostas. A utilização predominante de microcontroladores da família Arduino, como o Uno, exige a adição de módulos e escudos (*shields*) externos para viabilizar qualquer comunicação sem fio (seja Wi-Fi ou Bluetooth), o que aumenta consideravelmente a complexidade do circuito e cria novos pontos de falha no hardware. Além disso, as soluções presentes na literatura muitas vezes focam em nichos muito específicos, como redes de distribuição fechadas urbanas ou grandes sondas industriais autônomas, distanciando-se de um modelo verdadeiramente portátil, simplificado e de baixo custo que possa ser facilmente replicado para análises em mananciais abertos na região do semiárido. Existe, portanto, uma lacuna tecnológica evidente: a necessidade de um sistema embarcado que unifique alto poder de processamento e conectividade em uma arquitetura de hardware minimalista, sem a dependência de conversores externos complexos que frequentemente apresentam problemas de comunicação e instabilidade.

Neste contexto, o microcontrolador ESP32 destaca-se como a plataforma ideal para o preenchimento dessa lacuna e para a gestão da análise automatizada. Conforme a documentação técnica oficial, ele possui alta capacidade de processamento, conversores analógico-digitais (ADC) integrados para a leitura direta de sensores e conectividade sem fio nativa, englobando Wi-Fi e Bluetooth (ESPRESSIF SYSTEMS, 2025). A principal inovação metodológica do presente projeto consiste em aproveitar essa arquitetura de forma otimizada: a leitura dos sensores é feita diretamente pelas portas analógicas do ESP32, dispensando deliberadamente o uso de módulos conversores externos, reduzindo os gargalos de comunicação no circuito. Para contornar as variações e não linearidades físicas inerentes ao conversor interno e garantir a fidelidade dos dados hídricos, este trabalho aposta em robustas funções de correção matemática aplicadas diretamente no software do projeto, incluindo a compensação térmica em tempo real.

Diante da necessidade de superar as restrições logísticas atuais, esta pesquisa busca responder de forma prática à seguinte questão: é possível desenvolver um sistema embarcado de baixo custo aplicado à análise da qualidade da água?. Para responder a essa problemática, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver e validar um sistema digital embarcado de baixo custo para a análise da qualidade da água. O escopo do projeto foca estritamente na capacidade do hardware de mensurar, processar e exibir quatro parâmetros físico-químicos primordiais para essa caracterização: o potencial hidrogeniônico (pH), a temperatura, a turbidez e a condutividade elétrica (SILVA, 2023).

Por fim, este trabalho destaca contribuições científicas e tecnológicas substanciais para o campo da instrumentação ambiental. A principal entrega consiste no desenvolvimento de um sistema de hardware comprovadamente funcional e de baixo custo de replicação. A solução oferece a capacidade de realizar a avaliação *in loco* e a aquisição de dados analíticos em tempo real, conferindo total autonomia à operação de campo. Além de sua estabilidade técnica, o projeto democratiza a análise de dados hídricos. Essa abordagem demonstra um alto potencial de aplicação prática para a verificação da qualidade da água em pequenas comunidades, no apoio a agricultores e, sobretudo, como uma ferramenta acessível para as áreas de ensino e pesquisa acadêmica (SILVA, 2022; SILVA, 2023).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistemas embarcados

Segundo Marwedel (2021), um sistema embarcado pode ser definido como um sistema de processamento de informação que é incorporado a um produto que o envolve, atuando de forma dedicada a uma ou poucas funções específicas dentro desse produto. Diferentemente de um computador de uso geral, cuja finalidade é executar uma ampla variedade de aplicações definidas pelo usuário, um sistema embarcado é projetado para desempenhar uma tarefa determinada, muitas vezes de forma invisível ao usuário final, como ocorre em automóveis, eletrodomésticos, equipamentos médicos e sistemas industriais.

Esses sistemas apresentam um conjunto de características comuns que os distinguem de aplicações computacionais tradicionais, entre elas a necessidade de atender a restrições de tempo real, a exigência de confiabilidade (*dependability*) e a busca constante por eficiência energética e de processamento. A confiabilidade, em particular, engloba aspectos como segurança da informação, integridade dos dados, disponibilidade do sistema e ausência de riscos físicos ao usuário, sendo um requisito estrutural que deve ser considerado desde as etapas iniciais do projeto, e não como um ajuste posterior (Marwedel, 2021).

Conforme estabelece Marwedel (2021), a crescente integração entre o processamento de informação e o ambiente físico, viabilizada pela miniaturização de componentes eletrônicos, deu origem a termos correlatos, como "sistemas ciber-físicos" (*Cyber-Physical Systems – CPS*), que enfatizam a interação direta entre o mundo computacional e os processos físicos, e a "Internet das Coisas" (*Internet of Things – IoT*), que acrescenta a esse conceito a dimensão da conectividade e comunicação entre dispositivos. De modo geral, o autor afirma que tanto o CPS quanto a IoT são extensões do conceito original de sistema embarcado, ampliando-o para incluir, respectivamente, uma ênfase maior no ambiente físico dinâmico e na capacidade de comunicação em rede.

No contexto deste trabalho, o sistema desenvolvido caracteriza-se como um sistema embarcado aplicado à análise de parâmetros físico-químicos da qualidade da água, no qual um microcontrolador processa continuamente os sinais provenientes de sensores, converte esses sinais em grandezas físicas mensuráveis e os disponibiliza a um dispositivo remoto por meio de comunicação sem fio, aproximando-se, assim, tanto do conceito de sistema embarcado tradicional quanto da lógica de conectividade típica da Internet das Coisas.

2.2 Microcontroladores mais utilizados

Segundo Kerschbaumer ([s. d.]), um microcontrolador é um circuito integrado que reúne, em um único componente, todos os elementos necessários ao seu funcionamento, dependendo apenas de uma fonte de alimentação externa para operar. O autor destaca que, diferentemente de um microprocessador isolado — que concentra exclusivamente a unidade central de processamento (CPU), sem memórias ou periféricos integrados —, um microcontrolador incorpora internamente a CPU, as memórias de dados e de programa, além de uma série de periféricos como temporizadores, contadores, conversores analógico-digitais e interfaces de comunicação, podendo ser descrito como um computador completo em um único chip.

Essa integração é responsável por duas das principais vantagens dos microcontroladores: a redução do número de componentes externos necessários, o que simplifica e barateia a construção de circuitos, e a versatilidade proporcionada pela programabilidade, uma vez que o comportamento do dispositivo depende primordialmente do software nele gravado, permitindo que o mesmo componente seja empregado em uma ampla variedade de aplicações. Por essas razões, os microcontroladores são amplamente empregados em dispositivos do cotidiano, de eletrodomésticos a automóveis, e em aplicações industriais, sendo fabricados por diversas empresas, como Atmel, Microchip Technology, NXP, Texas Instruments e STMicroelectronics (Kerschbaumer, [s. d.]), além de fabricantes voltadas à Internet das Coisas (IoT), como a Espressif Systems.

Entre os aspectos arquitetônicos que diferenciam as famílias de microcontroladores, destacam-se o modelo de conexão com a memória e o conjunto de instruções empregado. Quanto à memória, o componente pode seguir a arquitetura Harvard, que utiliza barramentos separados para instruções e dados, permitindo maior velocidade de processamento; ou a arquitetura Von Neumann, que compartilha um único barramento para ambos, resultando em menor custo de produção e desempenho inferior. Já em relação ao processamento, pode-se adotar o modelo CISC (Complex Instruction Set Code), com instruções mais complexas e programas mais compactos, ou o modelo RISC (Reduced Instruction Set Code), que privilegia instruções simples executadas em um único ciclo de clock, favorecendo a velocidade do sistema (Kerschbaumer, [s. d.]).

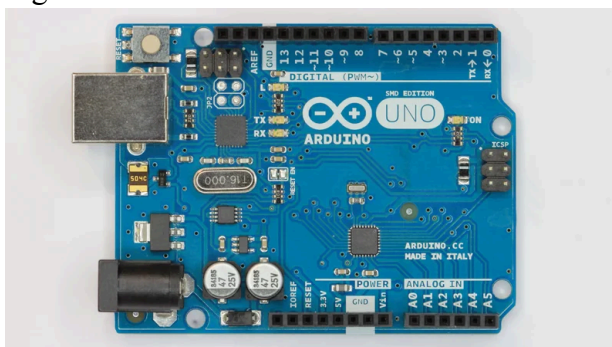
A seguir, são apresentadas as principais famílias de microcontroladores utilizadas atualmente em projetos acadêmicos e industriais, contextualizando a escolha do ESP32 como núcleo de processamento deste trabalho.

2.2.1 Arduíno

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto que populariza o uso de microcontroladores em projetos educacionais, artísticos e de automação, sendo amplamente adotado por sua facilidade de uso e ampla documentação (Arduino, 2024). De acordo com a documentação técnica oficial (Arduino, 2024), o modelo mais difundido da plataforma, o Arduino UNO R3, é construído em torno do microcontrolador ATmega328P. Trata-se de um dispositivo de arquitetura AVR de 8 bits capaz de operar a até 16 MHz, contando com 32 kB de memória Flash, 2kB de memória SRAM e 1kB de memória EEPROM, além de 14 pinos digitais de entrada e saída e 6 entradas analógicas.

Por se basear na arquitetura AVR, o Arduino UNO herda as características típicas dessa família, como a arquitetura Harvard e o conjunto de instruções RISC, o que garante bom desempenho de processamento aliado à simplicidade de programação (Kerschbaumer, [s. d.]). O próprio fabricante destaca que a placa é indicada tanto para a introdução ao mundo da eletrônica quanto para fins educacionais e projetos industriais de menor complexidade, sendo utilizada, por exemplo, como núcleo de controladores lógicos programáveis (CLPs) de baixo custo em algumas aplicações comerciais (Arduino, 2024). Sua principal limitação, no contexto de sistemas de análise de água em campo, é a ausência de conectividade sem fio nativa, o que exigiria a adição de módulos externos de comunicação — uma das razões que motivaram a escolha do ESP32 para este trabalho. A Figura 1 apresenta o Arduino Uno R3.

Figura 1 - Arduino Uno R3



Fonte: Disponível em: <https://s007hgu.s.gy/NW5fst>

2.2.2 ESP 32

O ESP32, desenvolvido pela fabricante Espressif Systems, é um microcontrolador que se destaca por integrar, em um único chip, alto poder de processamento e conectividade sem fio nativa, incluindo Wi-Fi e Bluetooth (Espressif Systems, 2025). Diferentemente das famílias baseadas em núcleos AVR (como o Arduino) ou ARM, o ESP32 utiliza um processador Xtensa dual-core de 32 bits, permitindo a execução simultânea de múltiplas tarefas, o que o torna especialmente adequado para aplicações de Internet das Coisas que exigem leitura contínua de sensores e transmissão de dados em tempo real. As características técnicas detalhadas deste componente, por se tratar do microcontrolador central utilizado neste trabalho, são apresentadas de forma aprofundada na seção 2.3 deste capítulo.

2.2.3 PIC

A família PIC, fabricada pela Microchip Technology, uma das principais fabricantes de microcontroladores do mercado (Kerschbaumer, [s. d.]), é amplamente utilizada em aplicações de automação e em projetos acadêmicos de controle. Conforme a documentação técnica oficial da fabricante, a plataforma é reconhecida por sua arquitetura de barramentos separados para dados e instruções e pela maturidade de seu ambiente de desenvolvimento integrado (MPLAB). Assim como a família AVR, os microcontroladores PIC seguem o modelo RISC de instruções, o que garante alto desempenho computacional em tempo real (Microchip Technology, 2003).

2.2.4 ARM

Diferentemente das famílias anteriores, a ARM (Advanced RISC Machine) não fabrica diretamente os microcontroladores, mas licencia núcleos de processamento de arquitetura RISC para que diferentes fabricantes — como STMicroelectronics, NXP e Texas Instruments — os integrem em seus próprios chips. Conforme a documentação oficial da STMicroelectronics (2019), os núcleos da série Cortex-M são voltados especificamente para aplicações embarcadas, proporcionando aos microcontroladores alto desempenho, eficiência energética e um conjunto de instruções otimizado. Contudo, é importante destacar que, embora o ESP32 ocupe o mesmo nicho de mercado em projetos de IoT, seu processador não

utiliza um núcleo ARM, mas sim a arquitetura de 32 bits Xtensa, desenvolvida pela Tensilica (Espressif Systems, 2025). Esse cenário demonstra a grande diversidade de arquiteturas RISC disponíveis atualmente para o desenvolvimento de sistemas embarcados.

2.3 Microcontrolador ESP32

O microcontrolador ESP32, Figura 2, desenvolvido pela Espressif Systems, é uma solução robusta e amplamente utilizada em projetos de sistemas embarcados e Internet das Coisas (IoT). O componente destaca-se por combinar alto poder de processamento e conectividade sem fio em um único chip. Internamente, ele é equipado com um microprocessador Xtensa dual-core de 32 bits LX6, arquitetura que permite executar múltiplas tarefas e processar dados de sensores em tempo real com excelente desempenho. Essa capacidade computacional torna o dispositivo ideal para atuar como o cérebro central em redes autônomas de monitoramento (Espressif Systems, 2025).

Podendo operar em frequências de até 240 MHz, o ESP32 interage com o ambiente por meio de diversas interfaces de comunicação externas, como barramentos I2C, SPI e conversores analógico-digitais (ADC) integrados. Outro recurso fundamental de seu hardware é a interface serial UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). A UART permite a comunicação assíncrona entre a placa e outros dispositivos, sendo essencial não apenas para a programação inicial e correção de erros no código, mas também para a transmissão segura dos dados coletados durante o funcionamento do sistema (Espressif Systems, 2025).

O grande diferencial prático do ESP32 é a sua conectividade nativa. O chip já vem de fábrica com suporte a Wi-Fi (compatível com os padrões 802.11 b/g/n) e Bluetooth (versões clássica e de baixo consumo – BLE). Em aplicações voltadas para a Internet das Coisas, o Wi-Fi funciona como a ponte direta entre o equipamento físico e a nuvem. Isso elimina a necessidade de conectar módulos de rede adicionais ao circuito, permitindo que o próprio microcontrolador gerencie a conexão com a internet e sincronize as leituras com plataformas online para armazenamento de dados (Espressif Systems, 2025).

No contexto deste projeto de avaliação da qualidade da água, o ESP32 atua como a unidade exclusiva de controle e aquisição de dados. O microcontrolador faz a leitura constante de um conjunto de sensores hídricos: a temperatura, lida de forma digital via protocolo 1-Wire com o sensor DS18B20; além do pH, da turbidez e dos sólidos totais dissolvidos (TDS). Aproveitando ao máximo os recursos do chip, as tensões analógicas

geradas pelas sondas físico-químicas são lidas diretamente pelos canais ADC internos do próprio ESP32. Dessa forma, o projeto consolida a captação de todas as variáveis em um único hardware, dispensando componentes conversores intermediários (Espressif Systems, 2025).

A dinâmica do sistema consiste em ciclos contínuos de coleta, processamento e transmissão. Após ler os sinais elétricos dos sensores, o código (firmware) embarcado no ESP32 realiza cálculos de calibração para converter esses números em valores padronizados, aplicando também a necessária compensação térmica nas medições de TDS e CE. Logo após esse processamento lógico, o microcontrolador utiliza o Wi-Fi ou o bluetooth para enviar os resultados a um painel de monitoramento remoto (plataforma IoT). Essa integração em tempo real é uma vantagem expressiva para a gestão hídrica, pois permite fiscalizar a qualidade da água a distância e gerar alertas imediatos sobre eventuais problemas ambientais (Espressif Systems, 2025).

Apesar de todas as vantagens, o uso do ESP32 na engenharia exige alguns cuidados técnicos. O acionamento contínuo da antena Wi-Fi gera picos no consumo de energia, o que requer uma fonte de alimentação bem dimensionada para evitar que o sistema reinicie sozinho. Além disso, os conversores analógico-digitais (ADC) internos do microcontrolador não são perfeitamente lineares, o que significa que eles podem perder precisão nos limites inferior e superior de medição (Espressif Systems, 2025). Para contornar essa restrição do hardware e garantir a fidelidade dos dados de qualidade da água, é imprescindível implementar funções de correção matemática diretamente no software do projeto.

Figura 2 - Microcontrolador ESP32



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

2.4 Conectividade e IoT

A conectividade é um dos elementos centrais que distinguem os sistemas embarcados tradicionais dos sistemas ciber-físicos e da Internet das Coisas (IoT). Segundo Marwedel (2021), enquanto o conceito clássico de sistema embarcado concentra-se na integração entre processamento e produto, a IoT acrescenta a essa relação a capacidade de comunicação entre múltiplos dispositivos, como sensores e dispositivos móveis, por meio de esquemas de endereçamento únicos, permitindo que interajam e cooperem entre si para alcançar objetivos comuns. Essa camada de conectividade é o que possibilita, por exemplo, que os dados coletados por um sensor em campo sejam disponibilizados remotamente para visualização, análise ou tomada de decisão.

No contexto de aplicações de análise ambiental, como a proposta neste trabalho, a escolha do protocolo e da tecnologia de comunicação deve considerar as condições reais de operação do sistema. Corpos hídricos, como barragens e açudes, frequentemente se localizam em áreas remotas desprovidas de infraestrutura de internet (Wi-Fi ou rede celular), o que torna inviável a adoção de protocolos dependentes de conectividade contínua com a nuvem, como o HTTP ou o MQTT, ambos amplamente utilizados em aplicações de IoT convencionais (Kadam; Ghule, 2023; Craggs, 2026). Nesses cenários, tecnologias de comunicação local e de curto alcance, como o Bluetooth, nativamente integrado ao ESP32 (Espressif Systems, 2025), mostram-se mais adequadas, uma vez que dispensam qualquer infraestrutura de rede externa e permitem que o operador colete os dados diretamente por meio de um smartphone pareado ao dispositivo.

Essa abordagem de conectividade local não descaracteriza o sistema desenvolvido como uma aplicação de Internet das Coisas, pelo contrário, reflete uma adaptação da arquitetura de conectividade às restrições reais do ambiente de aplicação, um desafio recorrente no projeto de sistemas embarcados voltados à análise ambiental em regiões remotas.

2.5 Instrumentação e sensoriamento

A etapa de aquisição de dados fundamenta-se na utilização de equipamentos capazes de converter grandezas físico-químicas em sinais elétricos interpretados pelo microcontrolador. Para este projeto, optou-se pela utilização de sensores de baixo custo

compatíveis com a plataforma de prototipagem, visando a escalabilidade e a acessibilidade da solução.

2.5.1 Sensor de temperatura (Ds18b20)

A temperatura é um parâmetro crítico, pois influencia diretamente o nível de oxigênio dissolvido e a taxa de reações químicas na água. Para esta medição, o sensor selecionado é o DS18B20. Diferente de termistores comuns (NTC/PTC) que variam a resistência, o DS18B20, Figura 3, é um termômetro digital que opera com o protocolo de comunicação 1-Wire (Analog Devices, 2019). Isso permite que o sensor envie dados calibrados diretamente para o microcontrolador através de uma única via de dados, minimizando erros de leitura causados por ruído em cabos longos. Ele opera na faixa de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$, com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ na faixa principal de uso (Analog Devices, 2019).

Figura 3 - Sensor Ds18b20



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

2.5.2 Sensor de pH (PH-4502C)

A análise do pH (potencial hidrogeniônico) é uma etapa fundamental em diversas aplicações, como análise de qualidade da água, aquicultura e automação ambiental. Para realizar essa leitura de forma automatizada, o módulo sensor PH-4502C, Figura 4,

apresenta-se como uma solução prática e eficiente. O seu funcionamento baseia-se no método potenciométrico: a atividade dos íons de hidrogênio (H^+) na água gera uma diferença de potencial elétrico. Essa variação de tensão é diretamente proporcional à acidez ou alcalinidade do líquido, o que permite quantificar o valor do pH de forma contínua (Datasheet PH-4502C, [s. d.]; Silva, 2023).

Fisicamente, o sistema de medição é formado por três componentes principais: um eletrodo de vidro, um conector BNC e um circuito eletrônico condicionador de sinal. O eletrodo de vidro fica em contato direto com a água e funciona como o sensor primário, gerando um sinal elétrico bastante sensível. Para evitar interferências externas e garantir a integridade desse sinal, a conexão com a placa é feita por meio de um cabo com terminal BNC. Ao receber esse sinal, a placa condicionadora o amplifica e ajusta, entregando na saída uma tensão analógica limpa e proporcional ao pH medido (Datasheet PH-4502C).

Em relação às suas especificações elétricas, o módulo requer uma tensão de alimentação estável de $5 \pm 0,2$ V contínuos e possui um baixo consumo de energia, operando com correntes entre 5 mA e 10 mA. O dispositivo é capaz de ler toda a escala de pH, abrangendo valores de 0 a 14. O circuito eletrônico foi projetado para funcionar em ambientes com temperatura entre -10 °C e 50 °C. Já o eletrodo de medição suporta análises em líquidos com temperaturas que variam de 0 °C a 60 °C (Datasheet PH-4502C).

A resposta do sensor ao sistema é rápida e fornecida exclusivamente em formato analógico. Segundo a documentação, o tempo de resposta às variações da água é de até 5 segundos, enquanto a estabilização completa da leitura nominal ocorre em no máximo 60 segundos. A medição pode apresentar um erro alcalino de aproximadamente 0,2 pH (Datasheet PH-4502C). Devido a esse pequeno erro característico e ao desgaste químico natural do eletrodo de vidro ao longo do tempo, é obrigatório realizar calibrações periódicas com soluções de referência (soluções tampão) para garantir que o sistema continue registrando dados confiáveis.

A integração do módulo PH-4502C, Figura, ao ESP32 ocorre de maneira simples e direta. Como a saída do sensor é um sinal de tensão, basta conectá-la a um dos pinos conversores analógico-digitais do microcontrolador. A partir dessa leitura, o código embarcado no ESP32 aplica uma equação de calibração para transformar o nível de tensão recebido no respectivo valor de pH. Essa facilidade de implementação torna o módulo muito atrativo para o desenvolvimento de sistemas automatizados de monitoramento ambiental (Datasheet PH-4502C).

Figura 4 - Sensor PH-4502C



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

2.5.3 Sensor de turbidez (*Water Turbidity Detection*)

A análise da turbidez é uma etapa fundamental no monitoramento da qualidade da água, pois indica a quantidade de partículas sólidas em suspensão no líquido. Para realizar essa medição no sistema proposto, optou-se por um módulo sensor genérico que consiste em uma réplica exata do modelo Gravity SEN0189, Figura 6, desenvolvido originalmente pela DFRobot. Devido a essa equivalência integral de hardware, as especificações técnicas, os limites operacionais e a lógica de calibração adotados neste trabalho fundamentam-se no manual oficial da fabricante do modelo original. O funcionamento da sonda baseia-se em princípios ópticos: o dispositivo possui um emissor de luz infravermelha e um receptor (fototransistor) posicionados frente a frente em formato de "U". Quando a luz atravessa a água, as partículas em suspensão bloqueiam e espalham o feixe luminoso, alterando a quantidade de radiação que chega ao receptor e permitindo calcular o nível de turbidez da amostra (Dfrobot, [s. d.]).

Em relação às suas características elétricas, o sensor opera com uma tensão contínua de 5 V e disponibiliza os dados coletados exclusivamente por meio de uma saída de sinal analógico. A tensão elétrica entregue por essa saída apresenta um comportamento inversamente proporcional ao nível de sujeira da água sob análise. Isso significa que, em amostras de água limpa, a passagem de luz infravermelha é máxima, o que resulta em um nível de tensão elevado na saída do circuito condicionador. Por outro lado, à medida que o

fluido se torna mais turvo, a obstrução do feixe luminoso intensifica-se devido aos sólidos suspensos, fazendo com que a diferença de potencial gerada pelo sensor diminua progressivamente (Dfrobot, [s. d.]).

Apesar de se consolidar como uma excelente alternativa de baixo custo para o monitoramento de reservatórios e ecossistemas aquáticos, o módulo possui algumas restrições técnicas que podem atuar como fontes de erro nas leituras. A principal limitação reside na alta sensibilidade do fototransistor à luz ambiente. Como o dispositivo opera na faixa do infravermelho, a exposição direta à luz solar ou a fontes luminosas externas intensas pode mascarar os resultados reais (Dfrobot, [s. d.]). Somado a isso, a formação de bolhas de ar no líquido ou o acúmulo gradual de partículas nas lentes ópticas também distorcem a transmitância da luz, tornando necessárias rotinas periódicas de limpeza e calibração para assegurar a exatidão dos dados.

A integração deste sensor à plataforma embarcada ocorre de forma direta por meio do ESP32. Conectando-se o pino de saída analógica da placa condicionadora a um dos canais do conversor ADC do ESP32, o sistema torna-se capaz de quantificar as variações de tensão elétrica. A partir dessa amostragem, o código fonte desenvolvido aplica uma equação matemática de calibração para converter os valores de tensão recebidos em unidades padronizadas de turbidez, como as Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). Essa abordagem simplificada otimiza o desenvolvimento do hardware e atende perfeitamente aos requisitos de monitoramento contínuo e autônomo de recursos hídricos (Dfrobot, [s. d.]). A figura 5 mostra o sensor de turbidez.

Figura 5 - Sensor de turbidez



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

2.5.4 Sensor de condutividade elétrica (TDS METER V1.0)

A medição dos Sólidos Totais Dissolvidos (do inglês Total Dissolved Solids – TDS) é um passo importante para avaliar a qualidade da água. Esse parâmetro indica a quantidade de substâncias minerais, sais e metais diluídos no líquido, sendo expressa em miligramas por litro (mg/L) ou partes por milhão (ppm). Para realizar essa leitura no projeto, utilizou-se o sensor TDS Meter V1.0. O funcionamento dele é baseado na condutividade elétrica: como a água pura não conduz eletricidade muito bem, a presença de íons dissolvidos facilita a passagem da corrente. Assim, o sensor mede o quanto a água conduz de energia e usa essa informação para calcular a quantidade de sólidos presentes (Keyestudio, [s. d.]).

Em relação às suas características técnicas, o módulo KS0429 é bastante econômico, consumindo uma corrente de apenas 3 mA a 6 mA. Ele pode ser alimentado com tensões de 3,3 V a 5,5 V e envia os dados medidos por meio de um único pino de saída analógica, entregando um sinal que varia de 0 V a 2,3 V. Segundo a fabricante, a sonda conectada à placa é à prova d'água e consegue medir concentrações de TDS de 0 a 1000 ppm, com uma margem de erro de $\pm 10\%$. Essa precisão torna o módulo uma ótima opção para projetos de automação de baixo custo, embora não substitua equipamentos de laboratório de alta exatidão (Keyestudio, [s. d.]).

Um detalhe fundamental no uso da condutividade elétrica para medir o TDS é a forte influência da temperatura da água. A precisão de $\pm 10\%$ informada no manual do sensor só é garantida quando a amostra está a 25 °C. Se a temperatura do líquido aumentar, os íons se movimentam com maior facilidade e elevam a condutividade elétrica, mesmo que a quantidade real de sólidos continue a mesma, o que gera leituras incorretas. Para evitar esse problema, é indispensável utilizar um sensor de temperatura em conjunto com o sensor de TDS. Dessa forma, o código do sistema aplica uma compensação térmica na fórmula, corrigindo o erro e entregando o valor real da medição (Keyestudio, [s. d.]).

A integração deste sensor de TDS com o ESP32, ocorre de maneira simples e direta. Como a tensão máxima que o sensor envia na sua saída analógica é de 2,3 V, o pino de sinal pode ser conectado diretamente ao ADC do ESP32, que opera com segurança em até 3,3 V. A partir dessa leitura, o software embarcado realiza os cálculos de calibração matemática e a correção de temperatura, transformando o sinal de tensão bruta no valor final de concentração em ppm para o monitoramento contínuo (Keyestudio, [s. d.]). A Figura 6 apresenta o sensor de CE.

Figura 6 - Sensor tds meter v1.0



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

A Tabela 1 apresenta a relação dos componentes utilizados, as quantidades demandadas e os custos unitários de aquisição na data de execução do projeto, permitindo a análise do custo total do protótipo.

Tabela 1 - Relação de materiais e custos do protótipo

(Continua)			
Item	Componente / Descrição	Qtd.	Valor Total (R\$)
1	Sensor de pH (Módulo PH4502C)	1	163,62
2	Sensor de Turbidez (<i>Water Detection Turbidity</i>)	1	70,00
3	Sensor de Condutividade Elétrica e TDS (<i>CE-TDS Meter VI</i>)	1	60,00
4	Sensor de Temperatura Digital DS18B20	1	20,00

Tabela 1 - Relação de materiais e custos do protótipo

			(Conclusão)
5	Jumpers de conexão (Macho-Macho e Macho-Fêmea)	1	40,00
6	Microcontrolador ESP32	1	40,00
Total	Custo Geral do Protótipo		393,62

Fonte: Autoria própria (2026)

2.6 Interface Android e web

A análise de sistemas da Internet das Coisas (IoT) exige o desenvolvimento de aplicações eficientes que permitam a visualização contínua de dados em tempo real. No contexto de prototipagem e de projetos acadêmicos com o uso do microcontrolador ESP32, as ferramentas de desenvolvimento visual assumem grande relevância. O MIT App Inventor, por exemplo, é amplamente utilizado na criação de interfaces móveis para o sistema operacional Android, permitindo a construção de aplicativos voltados à leitura de sensores por meio de uma programação baseada em blocos lógicos. Suas principais vantagens incluem a rápida curva de aprendizado e a eliminação da necessidade de codificação textual complexa, o que torna o desenvolvimento ágil e acessível para a validação de sistemas de monitoramento em campo (Massachusetts Institute of Technology, [s.d.]).

De forma complementar às aplicações móveis, as interfaces web são fundamentais na arquitetura da IoT. Tais plataformas funcionam como sistemas de controle que permitem a visualização remota dos dados coletados pelos sensores do ESP32, integrando o dispositivo de hardware, os servidores de nuvem e os usuários finais em uma mesma malha de comunicação. A utilização de painéis web assegura a automação do ecossistema, o monitoramento a longa distância e o armazenamento histórico das medições em bancos de dados. Essa infraestrutura consolida um ambiente tecnológico robusto, tornando-se essencial para a tomada de decisões rápidas e precisas, fundamentadas nas informações transmitidas e atualizadas em tempo real (Pelaez, 2018).

Para que as interfaces móveis e web consigam receber e enviar essas informações de modo estável, a escolha dos protocolos de comunicação é determinante. No cenário da IoT, destacam-se duas tecnologias amplamente discutidas: o Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) e o Hypertext Transfer Protocol (HTTP). O HTTP é um protocolo concebido primariamente para a transferência de documentos na rede mundial de computadores, operando de forma síncrona sob um modelo direto de requisição e resposta. Em contrapartida, o MQTT é um protocolo de comunicação focado em mensagens, estruturado de forma assíncrona sobre o modelo de publicação e assinatura (publish-subscribe), sendo projetado desde sua origem para atender aos requisitos da comunicação máquina a máquina (M2M) (COMPARATIVE..., 2023; MQTT..., [s.d.]).

Ao realizar uma comparação técnica entre ambos, observa-se que o MQTT apresenta eficiência muito superior em relação ao HTTP no tráfego de dados sensoriais. O padrão HTTP exige cabeçalhos grandes e baseia-se em texto, o que aumenta o consumo da banda de rede e gera uma maior latência a cada nova requisição efetuada, além de demandar maior capacidade de processamento para estabelecer conexões individuais continuamente (COMPARATIVE..., 2023; MQTT..., [s.d.]). Por outro lado, o MQTT utiliza cabeçalhos extremamente reduzidos e trafega dados de forma binária, diminuindo drasticamente o consumo de banda. Adicionalmente, seu modelo de comunicação permite manter uma conexão contínua e persistente com o servidor (broker), viabilizando uma alta escalabilidade e facilitando a distribuição da mesma informação de um sensor para dezenas de usuários simultaneamente (COMPARATIVE..., 2023; MQTT..., [s.d.]).

Diante dessas características arquitetônicas, justifica-se a ampla adoção do MQTT em sistemas de análise em tempo real. Por exigir menos processamento e garantir um uso otimizado da rede, o protocolo se adequa perfeitamente às restrições de energia e hardware dos dispositivos embarcados (COMPARATIVE..., 2023). Ao integrar a leveza comunicacional do MQTT com a acessibilidade de aplicativos Android e painéis web interativos, constrói-se uma arquitetura IoT coesa, capaz de transmitir medições complexas de forma contínua, rápida e confiável.

2.7 Aplicações em análise de água

A aplicação de sistemas embarcados e da Internet das Coisas (IoT) na análise de água é uma alternativa eficiente, autônoma e mais barata que os métodos tradicionais de

laboratório. Estudos recentes comprovam que essas tecnologias funcionam bem na prática, seja no monitoramento de corpos hídricos naturais, na agroindústria ou no controle da água potável urbana (Camara et al., 2021; Pereira, 2023; Silva, 2022; Silva, 2023).

No monitoramento ambiental, Camara et al. (2021) criaram um sistema com Arduino Uno para avaliar a água do Lago Javary (RJ) em tempo real. O protótipo usa sensores de pH, temperatura, turbidez e nível da água, enviando os dados via Bluetooth para um smartphone. Segundo os autores, essa análise contínua é essencial para detectar rapidamente contaminações causadas por chuvas fortes, algo que coletas de laboratório demoram a identificar.

No setor agroindustrial, Silva (2022) desenvolveu a "Sonda MAQUA", um equipamento movido a energia solar projetado para funcionar sem intervenção humana. Validado em um reservatório da usina de bioenergia da Raízen (SP), o sistema mediu remotamente o pH, a temperatura e a turbidez da água. O projeto provou a viabilidade do uso prático da IoT no campo para gerenciar o reuso da água.

Já no abastecimento urbano, Pereira (2023) utilizou o Arduino para rastrear a qualidade da água potável desde a Represa de Guarapiranga até as torneiras de residências em São Paulo (SP). Medindo pH, condutividade e sólidos dissolvidos, o estudo comparou a água entregue a diferentes bairros. Em uma escala predial, Silva (2023) aplicou o microcontrolador ESP32 para monitorar caixas d'água no Instituto Federal da Paraíba (IFPB). Os dados foram enviados continuamente para um painel na nuvem usando o protocolo MQTT, permitindo detectar problemas de forma rápida e garantindo a segurança do abastecimento.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada de forma sistemática, contemplando as etapas necessárias para o desenvolvimento e a implementação de um sistema embarcado aplicado à análise de parâmetros de água. Inicialmente, na etapa de planejamento, definiram-se os parâmetros físico-químicos a serem analisados, seguidos pela seleção dos sensores e componentes eletrônicos adequados ao trabalho. Em seguida, procedeu-se à construção do protótipo, ao desenvolvimento do firmware e à integração dos módulos de comunicação. Por fim, foram realizados testes laboratoriais, permitindo avaliar o desempenho do sistema, a precisão das medições e a confiabilidade dos dados coletados.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho pode ser classificada como aplicada, pois busca gerar uma solução prática para a análise da água por meio de um sistema embarcado. Ao mesmo tempo, caracteriza-se como descritiva e exploratória, uma vez que envolve a investigação dos parâmetros físico-químicos da água e a análise do comportamento dos sensores utilizados. Em relação à abordagem, trata-se de uma pesquisa quantitativa, devido à coleta e ao tratamento de dados numéricos provenientes dos sensores. No que se refere aos procedimentos técnicos, enquadra-se como uma pesquisa experimental, pois envolve a construção de um protótipo e a realização de testes controlados.

3. 1 Planejamento do sistema embarcado

A primeira etapa do trabalho consistiu no planejamento do sistema embarcado, na qual foram definidos os parâmetros físico-químicos que seriam objeto de análise. Considerando a relevância desses indicadores para a caracterização da qualidade da água, optou-se por contemplar o potencial hidrogeniônico (pH), a turbidez, a condutividade elétrica e a temperatura, parâmetros amplamente utilizados tanto na avaliação da potabilidade quanto na proteção de corpos hídricos (Silva, 2023).

A escolha dessas variáveis baseou-se, ainda, na consulta às normativas ambientais e sanitárias vigentes, a exemplo da Portaria GM/MS nº 888/2021 e da Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelecem os limites de referência para cada parâmetro (como a faixa de pH entre 6,0 e 9,5 e o limite de turbidez de 5,0 NTU para água potável) (Brasil, 2005; 2021). Essas referências orientaram a definição das faixas de medição que o sistema embarcado

deveria ser capaz de reconhecer, assegurando compatibilidade com os critérios de análise adotados pelos órgãos regulamentadores.

A partir desse planejamento inicial, delineou-se a arquitetura geral do sistema, definindo-se o ESP32 como unidade central de processamento e estabelecendo-se os requisitos de hardware, firmware e comunicação desenvolvidos nas etapas seguintes.

3.2 Montagem do protótipo

Concluída a fase de planejamento, iniciou-se a etapa de montagem do protótipo, que engloba a seleção dos componentes eletrônicos, a configuração do microcontrolador, a construção física do circuito, o desenvolvimento do firmware, a implementação da comunicação sem fio e os procedimentos de calibração dos sensores, detalhados nas subseções a seguir.

3.2.1 Seleção dos sensores e componentes eletrônicos

Para a aquisição dos parâmetros físico-químicos definidos na etapa de planejamento, foram selecionados sensores de baixo custo compatíveis com a plataforma de prototipagem, priorizando a acessibilidade e a escalabilidade da solução. Para a leitura do pH, optou-se pelo módulo PH-4502C, que opera por meio do método potenciométrico e entrega um sinal analógico proporcional à acidez ou alcalinidade da amostra. Para a temperatura, utilizou-se o sensor digital DS18B20, que opera pelo protocolo 1-Wire e já possui calibração de fábrica. Para a condutividade elétrica, foi empregado o módulo TDS Meter V1.0 (KS0429), que mede a condução elétrica da água e converte esse valor em sólidos totais dissolvidos (TDS). Por fim, para a análise da turbidez, foi utilizado um módulo genérico equivalente ao modelo Gravity SEN0189 da DFRobot, baseado em princípios ópticos de emissão e recepção de luz infravermelha.

A seleção desses componentes considerou, ainda, a compatibilidade elétrica com o microcontrolador adotado, garantindo que os níveis de tensão de saída dos sensores pudessem ser lidos com segurança pelas portas analógicas do sistema embarcado.

3.2.2 Escolha e configuração do microcontrolador ESP32

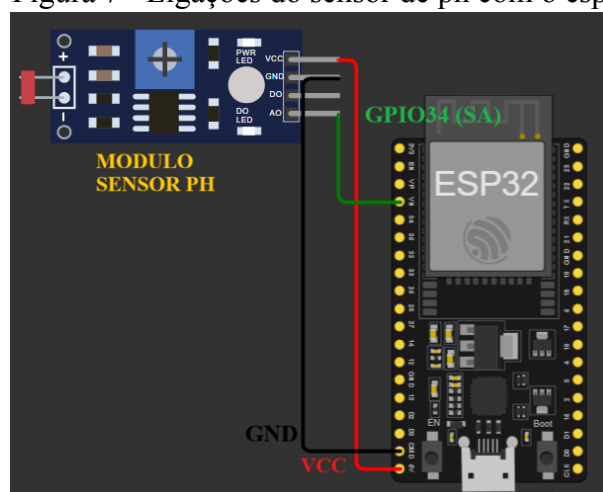
O microcontrolador escolhido para atuar como unidade central de processamento foi o ESP32, desenvolvido pela Espressif Systems. A escolha justifica-se por sua elevada capacidade de processamento, decorrente do processador Xtensa dual-core de 32 bits, e por sua conectividade sem fio nativa (Wi-Fi e Bluetooth), o que tornou o componente adequado para centralizar tanto a leitura dos sensores quanto a transmissão dos dados, dispensando módulos externos de comunicação.

A configuração do microcontrolador envolveu o ajuste da resolução do conversor analógico-digital (ADC) interno para 12 bits (0 a 4095), a definição dos pinos analógicos e digitais destinados a cada sensor e a habilitação do módulo Bluetooth para a comunicação com a interface móvel. Também foram consideradas, nesta etapa, as limitações de linearidade do ADC nos extremos da faixa de leitura, o que exigiu a posterior implementação de rotinas de correção via software.

3.2.3 Desenvolvimento do hardware do sistema embarcado

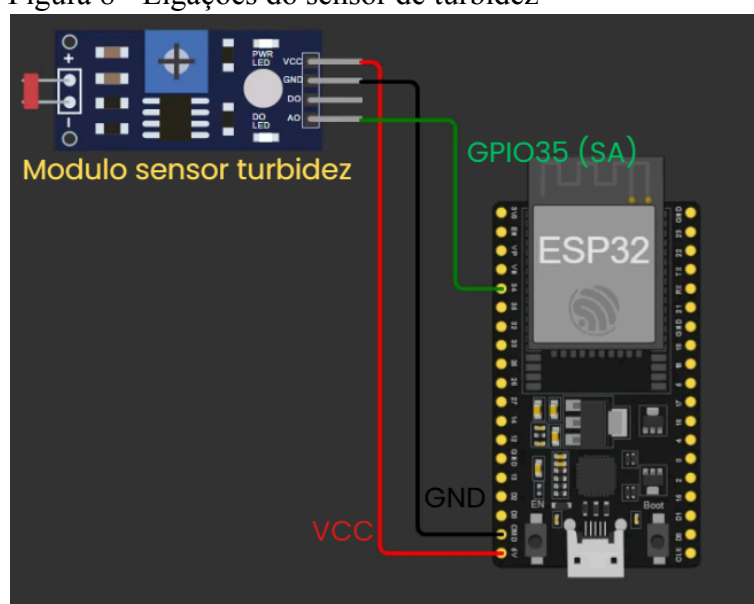
A infraestrutura física do sistema foi construída sobre uma placa de ensaio (protoboard), utilizando cabos jumper para o roteamento elétrico entre o ESP32 e os módulos de sensoriamento. O procedimento de montagem consistiu na interligação dos pinos de alimentação (VCC e GND) e de sinal de cada sensor às portas específicas do microcontrolador: o sensor de pH foi conectado à porta GPIO 34, o sensor de turbidez à porta GPIO 35, o sensor de condutividade elétrica à porta GPIO 32, e o sensor de temperatura DS18B20 à porta digital GPIO 4, por meio do protocolo 1-Wire. As Figuras 7, 8, 9 e 10 apresentam o esquema de ligações de cada sensor com o Esp32. A Figura 11 apresenta o protótipo pronto para ser calibrado.

Figura 7 - Ligações do sensor de ph com o esp32



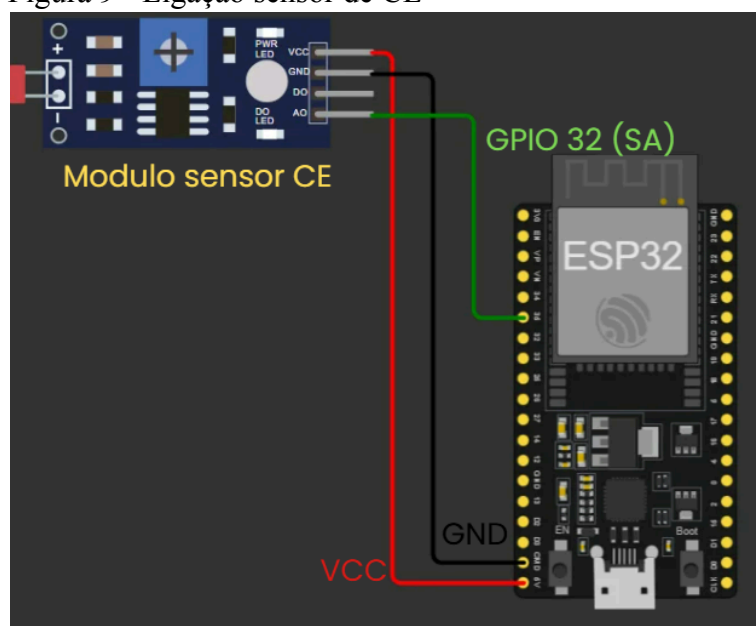
Fonte: Adaptado de Wokwi (2026)

Figura 8 - Ligações do sensor de turbidez



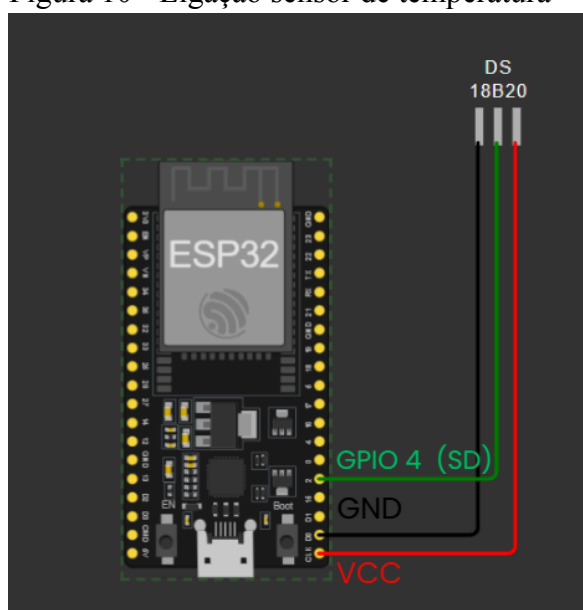
Fonte: Adaptado de Wokwi (2026)

Figura 9 - Ligação sensor de CE



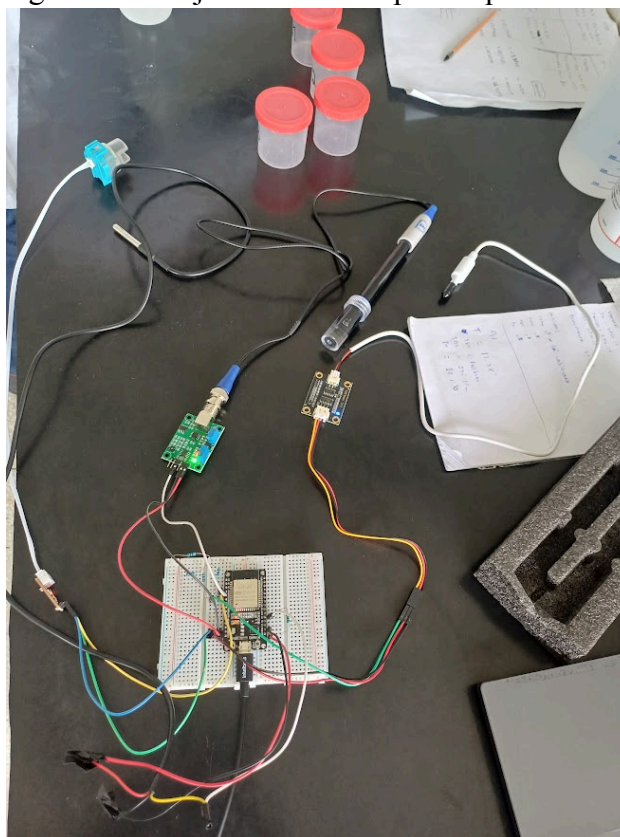
Fonte: Adaptado de Wokwi (2026)

Figura 10 - Ligação sensor de temperatura



Fonte: Adaptado de Wokwi (2026)

Figura 11 - Projeto montado e pronto para execução



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Adicionalmente, foi projetado um circuito divisor de tensão com resistores de $2\text{ k}\Omega$ e $1\text{ k}\Omega$ para compatibilizar o sinal de saída dos módulos de pH e Turbidez (que operam em 5 V) com o limite seguro do ADC do ESP32 ($3,3\text{ V}$), evitando danos ao microcontrolador.

3.2.4 Desenvolvimento do software (firmware)

O desenvolvimento do firmware foi realizado integralmente no ambiente Arduino IDE, que permitiu a escrita, a compilação e a gravação do algoritmo no ESP32. O código foi estruturado para executar, de forma cíclica, a leitura dos sinais elétricos brutos captados pelos sensores, a conversão desses sinais em valores quantitativos por meio das equações de calibração (detalhadas na Seção 3.2.6) e a compensação térmica necessária para as medições de condutividade elétrica.

Também foram implementadas rotinas específicas para tratar as limitações de hardware identificadas, como a correção matemática exigida pela não linearidade do ADC interno do ESP32 nos limites de sua faixa de operação.

3.2.5 Implementação da comunicação IoT

Para a transmissão dos dados coletados, optou-se pela utilização do protocolo Bluetooth, nativo do ESP32, operando por meio do perfil de porta serial (SPP – Serial Port Profile). Essa escolha justifica-se pelo cenário de aplicação do trabalho: a análise de corpos hídricos, como barragens e açudes, ocorre frequentemente em áreas remotas desprovidas de infraestrutura de internet (Wi-Fi ou rede celular), o que tornaria inviável a utilização de protocolos dependentes de conectividade contínua, como MQTT ou HTTP.

A interface de recepção dos dados foi desenvolvida em ambiente MIT App Inventor, plataforma de programação visual baseada em blocos lógicos, permitindo construir um aplicativo Android capaz de parear com o ESP32, receber os pacotes de dados a uma taxa de 1 Hz e exibir os valores de pH, turbidez, temperatura e condutividade elétrica em tempo real. Essa topologia local garantiu que o operador pudesse coletar as medições utilizando apenas um smartphone, assegurando a autonomia do equipamento em qualquer localização geográfica.

3.2.6 Calibração dos sensores

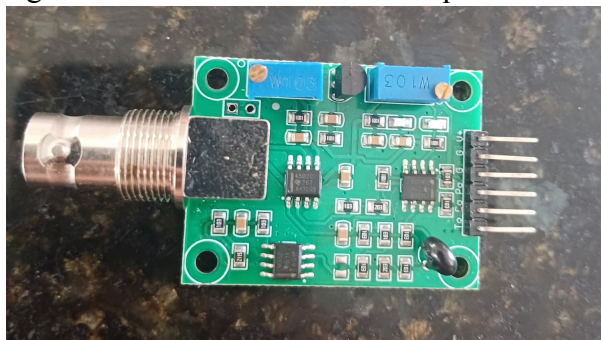
3.2.6.1 pH

Diferentemente dos demais sensores utilizados neste trabalho, o módulo PH-4502C exige uma calibração via hardware por meio de um potenciômetro integrado à placa. Esse ajuste estabelece a tensão de saída de referência para o pH 7 (ponto neutro da escala). Como o sensor opera em 5 V, o ponto neutro corresponde exatamente à metade de sua capacidade, ou seja, 2,5 V (Sensor de pH..., [s. d.]).

Embora o microcontrolador escolhido para o projeto seja o ESP32 (que possui portas analógicas limitadas a 3,3 V), a calibração do ponto neutro no módulo ainda deve ser feita em 2,5 V para que o sensor opere em sua capacidade máxima de leitura (0 a 5 V). Para compatibilizar o sinal do sensor com o ESP32 e evitar danos ao microcontrolador, projetou-se um circuito divisor de tensão com resistores de 2 k Ω e 1 k Ω . Dessa forma, a tensão que chega ao pino do ESP32 é proporcional e segura. O procedimento de calibração consistiu nos seguintes passos: primeiro, o eletrodo do sensor foi submerso em uma solução tampão com pH 7 de laboratório. Em seguida, ajustou-se o potenciômetro do módulo enquanto a tensão de

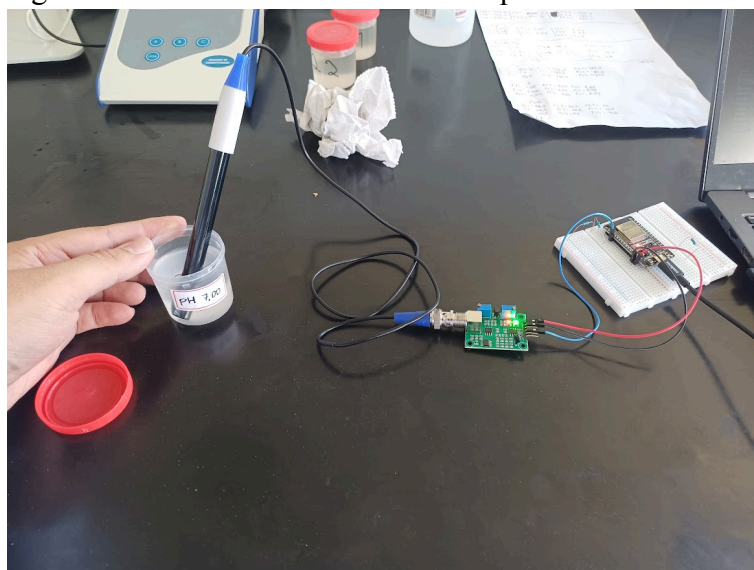
saída era medida com um multímetro, até que cravasse em 2,5 V. Com isso, assegurou-se a calibração no hardware, garantindo que o ESP32 possa ler com precisão qualquer variação de pH nas amostras coletadas para este trabalho (Sensor de pH..., [s. d.]). A Figura 12 apresenta o potenciômetro ajustado na tensão correta, a Figura 13 apresenta o sensor de pH na solução tampão 7, ponto médio da reta tensão vs pH.

Figura 12 - Potenciômetro sensor pH



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Figura 13 - Sensor medindo tensão no pH 7



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

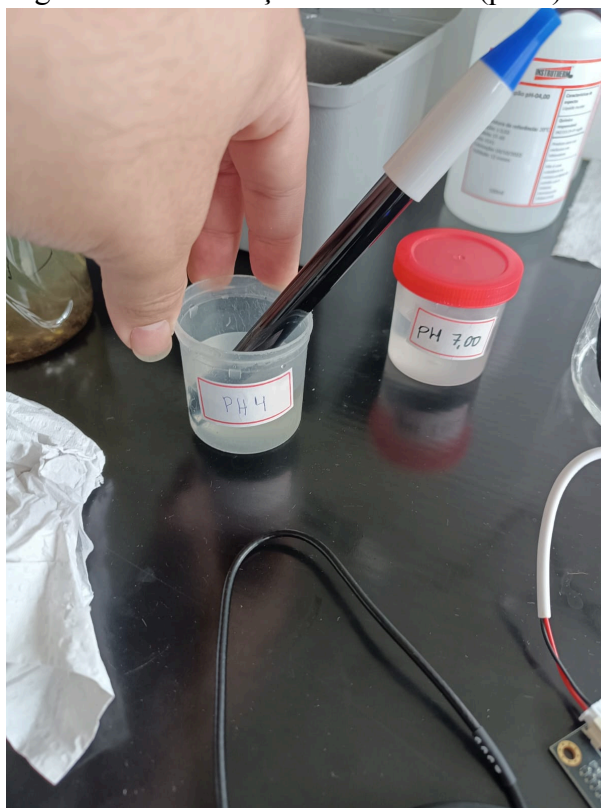
Após a configuração do hardware, a etapa de software consistiu em converter os dados originais lidos pelo conversor analógico-digital (ADC) do ESP32 em dados quantitativos de pH. Para a calibração definitiva via código, utilizaram-se soluções tampão com valores previamente conhecidos de pH 7,0 e pH 4,0.

Primeiramente, o eletrodo do sensor foi submerso na solução neutra (pH 7,0). Após a estabilização do sinal, registou-se a tensão de referência lida pelo microcontrolador para este

ponto. Em seguida, o mesmo procedimento foi repetido para a solução ácida (pH 4,0). A partir das tensões de referência obtidas nesses dois pontos, implementou-se no algoritmo uma equação linear relacionando a variação de tensão com a variação de pH.

Para validar o sistema, o sensor foi novamente inserido nas soluções tampão com o intuito de verificar se o algoritmo retorna os valores corretos de pH. Concluída essa validação, o instrumento foi considerado completamente calibrado e apto para realizar as medições nas amostras de água deste trabalho. Na Figura 14, o sensor está medindo o pH 4 e depois o pH4, calibrando o sensor por meio do software, o código usado está no APÊNDICE A.

Figura 14 - Calibração via software (pH 4)



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

3.2.6.2 Turbidez

A calibração do sensor de turbidez, Figura 15, representa o maior desafio nesta etapa do trabalho. Ao contrário dos outros parâmetros, não havia uma solução aberta com valor conhecido de NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez) para submergir o sensor. O laboratório possui um equipamento de referência, mas suas soluções padrão ficam em frascos de vidro selados, o que impediu o contato direto com a sonda do sistema desenvolvido.

Para contornar esse problema e garantir a validade dos resultados, adotou-se o método de correlação de dados. Foram testadas amostras de água e os resultados foram registrados tanto pelo equipamento do laboratório quanto pelo sensor conectado ao ESP32. Em seguida, esses valores foram inseridos em um código desenvolvido em Python para calcular os coeficientes e traçar uma relação linear entre eles. A qualidade dessa calibração foi avaliada pela proximidade do valor obtido (o R^2) ao número 1, o que indica que as leituras do sensor embarcado acompanham corretamente as medições do equipamento profissional.

Como uma segunda estratégia de ajuste, buscou-se entender os limites de leitura do componente definindo seus pontos extremos. Para encontrar a leitura de água limpa (ponto neutro de turbidez), o sensor foi submerso em água destilada. Já para definir o limite de alta turbidez, utilizou-se uma amostra de água misturada com uma grande quantidade de terra.

Essas adaptações práticas e estatísticas foram essenciais para lidar com a falta de uma solução padronizada aberta. Mesmo com essa limitação física imposta pelos frascos do laboratório, as soluções encontradas garantiram que o sistema embarcado atingisse um nível de calibração cientificamente aceitável e confiável para o monitoramento. Código em APÊNDICE C.

Figura 15 - Valores brutos de turbidez obtidos nas amostras pelo sensor



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

3.2.6.3 Temperatura

Diferente dos módulos anteriores, o sensor de temperatura DS18B20 opera de forma digital por meio do protocolo de comunicação 1-Wire, sendo independente do ADC do ESP32 e já possui calibração de fábrica. Contudo, para atestar sua precisão no contexto deste trabalho, como mostra a Figura 16, executou-se um procedimento de validação comparativa. As leituras enviadas ao microcontrolador foram confrontadas com as medições de um termômetro de referência. Esse processo validou a exatidão e a resposta térmica do sensor quando submerso nas amostras.

Figura 16 - Comprovação da calibração sensor de temperatura



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

3.2.6.4 Condutividade elétrica

O módulo sensor de TDS (Total de Sólidos Dissolvidos) mede, em sua essência, a condutividade elétrica (CE) da amostra, aplicando internamente um fator de conversão para exibir o resultado em ppm (partes por milhão) (Keyestudio, 2021). Para obter a leitura direta da condutividade elétrica da água em $\mu\text{S}/\text{cm}$, o algoritmo foi ajustado para aplicar um novo coeficiente matemático aos dados originais.

Sabendo que a condutividade elétrica é uma grandeza diretamente influenciada pela temperatura do líquido, o processo de avaliação exigiu a operação simultânea do sensor de

temperatura. Após a estabilização térmica da amostra, esse valor foi integrado ao código para realizar a compensação na medição de CE, garantindo assim resultados mais precisos.

A calibração prática seguiu um método de dois pontos. Inicialmente, o sensor foi submerso em água destilada, estabelecendo o limite inferior (ponto zero) da reta de calibração. Em seguida, utilizou-se uma solução padrão de 146 $\mu\text{S}/\text{cm}$, disponível no laboratório, para definir o limite superior. A partir dessas marcações, calculou-se o coeficiente de calibração (K), definido pela equação 1:

$$K = \frac{\text{Valor real da solução}(146 \mu\text{S}/\text{cm})}{\text{Valor lido do sensor}} \quad (1)$$

Após o cálculo, utilizando a equação (1), o novo coeficiente foi atualizado no código-fonte. A fim de validar o ajuste, o sensor foi novamente submerso na amostra de condutividade conhecida, Figura 17, atestando que a leitura final do sistema correspondia de fato aos 146 $\mu\text{S}/\text{cm}$ esperados. Código em APÊNDICE B.

Figura 17 - Calibração sensor condutividade elétrica



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

3.3 Testes laboratoriais

Os testes laboratoriais foram conduzidos com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema embarcado em condições controladas, assegurando a precisão das medições antes da

aplicação em campo. Essa etapa permitiu verificar o comportamento dos sensores, identificar possíveis interferências e validar a calibração realizada previamente. As análises foram executadas utilizando a infraestrutura do laboratório de poluição ambiental da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), campus Pau dos Ferros-RN, com amostras de água coletadas em diferentes pontos, de modo a captar variações reais dos parâmetros físico-químicos analisados.

Como referencial de excelência, os dados do protótipo foram comparados aos resultados obtidos por equipamentos comerciais de alta precisão do laboratório de poluição ambiental da instituição: o pHmetro de bancada LUCA-210, o condutivímetro microprocessado MCA-150 e o turbidímetro digital DLT-WV. As Figuras 18, 19 e 20 apresentam os equipamentos de referência do laboratório de Poluição Ambiental.

Figura 18 - Sensor pH laboratório



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Figura 19 - Sensor de ce laboratório



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Figura 20 - Sensor de turbidez laboratório

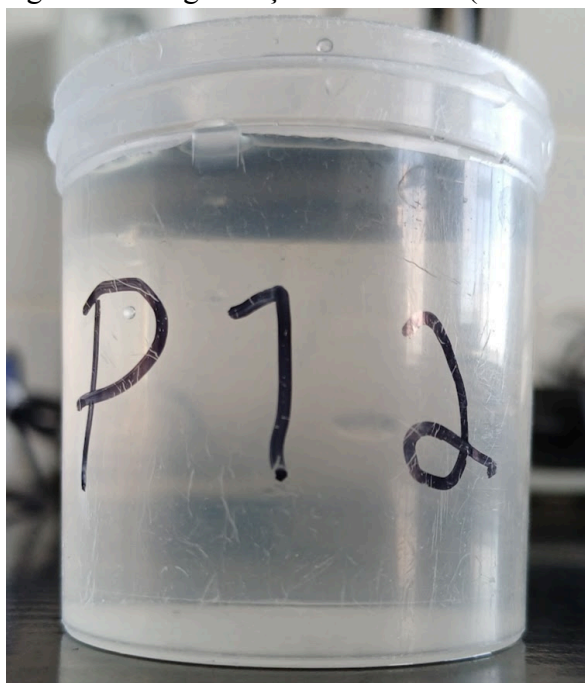


Fonte: Arquivo pessoal (2026)

3.3.1 Amostragem de água

A coleta das amostras foi realizada no açude público Dr. Pedro Diógenes Fernandes do município de Pau dos Ferros-RN. Foram definidos três pontos de coleta distintos ao longo da extensão do reservatório, retirando-se três amostras independentes em cada um deles. Para organizar o registro e a análise, adotou-se uma codificação padronizada, na qual o primeiro número identifica o ponto de coleta e o segundo indica a amostra correspondente (ex.: "P12" = Ponto 1, Amostra 2). A Figura 21 apresenta essa organização da pesquisa na amostra de água.

Figura 21 - Organização das coletas (Amostra 1, ponto 2)



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

A coleta ocorreu de forma simultânea: imediatamente após a medição dos parâmetros de uma amostra pelos equipamentos de alta precisão do laboratório, essa mesma porção de água era avaliada pelos sensores do protótipo, minimizando interferências externas e assegurando uma base de dados confiável para a comparação da exatidão do sistema desenvolvido.

3.3.2 Análises de água

As análises foram conduzidas de forma pareada, confrontando-se, para cada amostra, os valores obtidos pelo sistema embarcado com os valores de referência do laboratório. Para o pH e para a condutividade elétrica, foram realizadas 15 e 23 medições comparativas, respectivamente, ao longo de diferentes datas de coleta (13, 21 e 27 de maio). Já para a turbidez, foram registradas oito amostras entre os dias 13 e 21 de maio. Em todos os casos, o procedimento foi o mesmo: submersão simultânea das sondas do protótipo e dos equipamentos de laboratório na mesma amostra, registro dos valores brutos e posterior organização dos dados para o cálculo dos indicadores estatísticos de exatidão.

3.4 Análise e avaliação dos dados

O tratamento e a interpretação quantitativa dos dados obtidos durante os testes laboratoriais foram realizados por meio do Google Planilhas, que viabilizou a organização tabular das medições, a análise descritiva dos dados amostrais e a geração dos gráficos de dispersão e de acompanhamento apresentados no capítulo 4.

Para avaliar a exatidão do sistema embarcado em relação aos equipamentos de referência, foram utilizados três indicadores estatísticos: o Erro Absoluto Médio (MAE), que expressa a diferença média entre os valores medidos pelo protótipo e os valores de referência; o Erro Relativo Médio (MAPE), que expressa essa diferença em termos percentuais; e o coeficiente de correlação de Pearson (r), utilizado para avaliar o grau de associação linear entre as duas séries de dados, especialmente nos casos em que a exatidão nominal apresentou desvios sistemáticos. Os resultados dessa análise estatística são apresentados e discutidos detalhadamente no capítulo 4 deste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos durante as etapas de testes laboratoriais e em campo, realizados com o sistema embarcado desenvolvido para o monitoramento da qualidade da água. Os dados coletados pelos sensores foram organizados em tabelas e gráficos, permitindo avaliar o desempenho do protótipo quanto à precisão das medições, estabilidade operacional e eficiência da comunicação. A análise comparativa entre os valores registrados pelo sistema e aqueles obtidos por instrumentos laboratoriais de referência possibilitou verificar a confiabilidade das leituras e identificar eventuais limitações, contribuindo para a validação técnica da solução proposta.

4.1 Arquitetura do sistema embarcado

Esta seção apresenta a arquitetura geral do sistema embarcado desenvolvido, descrevendo como o hardware (microcontrolador, sensores e módulo de comunicação) e o software (firmware embarcado e aplicativo móvel) se articulam para transformar grandezas físico-químicas da água em informações legíveis pelo usuário final. Enquanto os capítulos anteriores tratavam individualmente dos princípios de funcionamento de cada componente, o objetivo aqui é apresentar a integração completa desses elementos no protótipo efetivamente construído.

De forma geral, o funcionamento do sistema segue um fluxo contínuo de quatro etapas: (i) aquisição, na qual os sensores convertem as grandezas físicas da água (potencial hidrogeniônico, turbidez, condutividade elétrica e temperatura) em sinais elétricos; (ii) processamento, no qual o ESP32 realiza a leitura desses sinais por meio de seus canais analógico-digitais (ADC) ou de sua interface digital 1-Wire, aplicando as equações de calibração e as compensações térmicas descritas no capítulo 3 ; (iii) transmissão, na qual os valores já convertidos são enviados via Bluetooth ao dispositivo móvel; e (iv) apresentação, na qual o aplicativo desenvolvido no MIT App Inventor recebe, interpreta e exibe os dados ao operador em tempo real.

4.1.1 Microcontrolador central

O ESP32 atua como a unidade central de todo o sistema, sendo responsável simultaneamente pela aquisição, pelo processamento e pela transmissão dos dados, sem a necessidade de módulos externos adicionais de conversão ou de comunicação, conforme discutido no capítulo 2. Essa centralização foi possível graças à combinação de dois recursos nativos do chip: os canais ADC de 12 bits, utilizados para a leitura dos sensores analógicos, e o módulo Bluetooth integrado, utilizado para a transmissão sem fio dos dados já processados. A Tabela 2 resume o mapeamento de pinos do ESP32 utilizado neste trabalho, consolidando as ligações individuais já apresentadas nas Figuras 7 a 10 (Seção 3.2.3).

Tabela 2 - Ligação dos sensores com o ESP32

Sensor	Tipo de sinal	Pino do ESP32	Protocolo
pH (PH-4502C)	Analógico	GPIO 34	ADC
Turbidez (SEN0189)	Analógico	GPIO 35	ADC
Condutividade elétrica (TDS Meter V1.0)	Analógico	GPIO 32	ADC
Temperatura (DS18B20)	Digital	GPIO 4	1-Wire

Fonte: Autoria própria (2026)

Essa distribuição de pinos evidencia uma característica central da arquitetura: três dos quatro sensores dependem do conversor analógico-digital interno do ESP32 para gerar valores digitais a partir de tensões elétricas, ao passo que o sensor de temperatura comunica-se de forma nativamente digital, dispensando conversão adicional. Essa diferença justifica, inclusive, por que o DS18B20 não sofreu com as limitações de não linearidade do ADC que afetaram os demais sensores.

4.1.2 Sensores integrados

O sistema integra quatro sensores físico-químicos, já caracterizados individualmente na Seção 2.5 (Instrumentação e sensoramento): o módulo de pH PH-4502C, o sensor de turbidez baseado no princípio óptico do SEN0189, o módulo de condutividade elétrica TDS Meter V1.0 e o sensor digital de temperatura DS18B20. Do ponto de vista arquitetural, o papel de cada sensor no sistema pode ser resumido da seguinte forma:

- O sensor de pH fornece a leitura primária de acidez/alcalinidade da amostra, servindo como parâmetro independente de calibração via hardware (potenciômetro) e via software (equação linear de dois pontos).
- O sensor de turbidez opera de forma independente dos demais, sem dependência de compensação térmica, mas exigindo calibração por correlação de dados devido à ausência de soluções padrão abertas.
- O sensor de condutividade elétrica depende diretamente da leitura simultânea do sensor de temperatura para a aplicação da compensação térmica em tempo real, constituindo o único caso de dependência funcional entre dois sensores no sistema.
- O sensor de temperatura cumpre um papel duplo na arquitetura: além de fornecer uma leitura própria ao usuário, atua como entrada auxiliar indispensável para a correção matemática da condutividade elétrica.

Essa interdependência entre temperatura e condutividade elétrica é um ponto central da arquitetura de software do sistema, uma vez que o firmware precisa garantir que ambas as leituras estejam sincronizadas antes de aplicar a fórmula de compensação (Apêndice B).

4.1.3 Módulo de comunicação e fluxo de dados

A transmissão dos dados processados pelo ESP32 até o usuário final é realizada por meio do módulo Bluetooth nativo do microcontrolador, operando sob o perfil de porta serial (SPP), conforme justificado no capítulo 2. Do lado do firmware, a comunicação é implementada por meio da biblioteca BluetoothSerial, que encapsula os quatro valores medidos (pH, temperatura, turbidez e condutividade elétrica) em uma única string de texto, separados por vírgula, transmitida a cada ciclo de 1 segundo (Apêndice F).

Do lado do dispositivo móvel, o aplicativo desenvolvido no MIT App Inventor implementa a lógica complementar de recepção: um temporizador (Clock) verifica

periodicamente a disponibilidade de bytes recebidos via Bluetooth, e, ao identificar uma nova mensagem completa, separa a string recebida em uma lista de quatro elementos (função `repartir texto`), atribuindo cada valor ao respectivo rótulo (label) da interface — pH, temperatura, turbidez e condutividade elétrica (Apêndice G, Figura 30b). Essa arquitetura de comunicação unidirecional (ESP32 → smartphone) mostrou-se suficiente para os objetivos deste trabalho, uma vez que o sistema não requer o envio de comandos do aplicativo de volta ao microcontrolador.

A integração completa desses três elementos — microcontrolador, sensores e módulo de comunicação — é o que permite ao sistema operar de forma autônoma em campo, sem dependência de infraestrutura de rede externa, cumprindo o objetivo de oferecer uma solução portátil e de baixo custo para a análise da qualidade da água, conforme proposto nos objetivos deste trabalho.

4.2 Validação do sistema de monitoramento

4.2.1 PH

Os dados adquiridos nas primeiras amostragens foram descartados por apresentarem inconsistências técnicas que inviabilizaram as análises científicas deste trabalho. A calibração inicial do sensor de pH foi parametrizada com base em sistemas com nível lógico de 5 V, assumindo que o ponto neutro (pH 7) resultaria em uma tensão de saída de 2,5 V. Contudo, o conversor analógico-digital (ADC) do microcontrolador ESP32 opera com uma tensão máxima de referência de 3,3 V.

Como o valor de 2,5 V já ocupava grande parte da capacidade máxima de leitura do ADC, o sistema ficou impossibilitado de mensurar corretamente as variações na amostra, limitando severamente a precisão da leitura, especialmente em faixas que geram tensões superiores. Após a identificação desta divergência de dimensionamento elétrico, os parâmetros de calibração no código foram reajustados para respeitar o limite de 3,3 V do ESP32. Em seguida, procedeu-se com uma nova etapa de coleta de dados utilizando a água da barragem, assegurando assim a exatidão, a confiabilidade e a validade científica dos resultados apresentados.

Para evidenciar o impacto da divergência nos níveis de tensão de referência, a Tabela 3 apresenta as leituras registradas pelo protótipo antes da correção do código, em comparação com os dados aferidos simultaneamente pelo equipamento de referência do laboratório.

Tabela 3 - Comparativos de leituras de pH na primeira amostragem (dados descartados)

Amostra	Leitura do Protótipo (Calibração Inicial - 5 V)	Leitura de Referência (Equipamento do Laboratório)	Erro Absoluto
P11	7,10	8,39	1,29
P12	7,76	8,45	0,69
P13	8,04	8,38	0,34
P21	8,12	8,81	0,69
P22	8,13	8,72	0,59
P31	8,11	8,70	0,59
P32	8,13	8,79	0,66
P33	8,12	8,67	0,55

Fonte: Autoria própria (2026)

A análise da Tabela 3 revela o comportamento limitado do sensor sob a parametrização incorreta. Nota-se que as leituras do equipamento de laboratório variaram até o pico de 8,81, indicando o caráter real da amostra da barragem. Em contrapartida, as medições do protótipo estagnaram no limite de 8,13. Essa saturação nos dados comprova a limitação do conversor analógico-digital do ESP32 quando submetido a uma equação de calibração projetada para lógicas de 5 V, justificando o descarte desta primeira rodada de testes e a necessidade da readequação algorítmica do sistema.

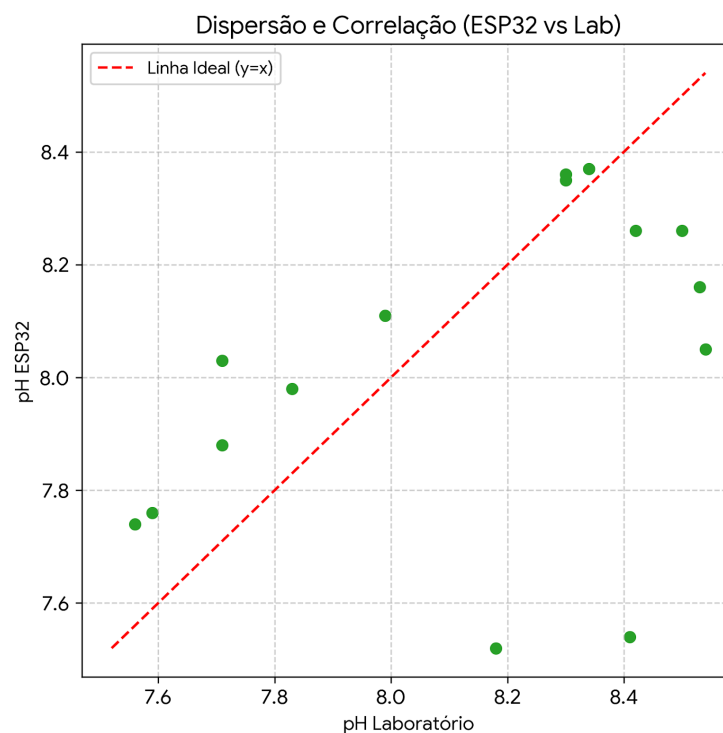
Com o sensor de pH devidamente calibrado, podemos avaliar a exatidão e a viabilidade do sistema de monitoramento desenvolvido. Para isso, as leituras de pH obtidas pelo microcontrolador ESP32 foram confrontadas com os dados gerados por um medidor de bancada do laboratório da universidade, considerado como padrão de calibração. Assim, os dados registrados foram organizados na Tabela 4, que apresenta a comparação pareada de 15 amostras coletadas na barragem.

Tabela 4 - Comparativo das leituras de pH: Protótipo (ESP32) vs. Equipamento de Laboratório

Data	Amostras	pH protótipo	pH referência	erro absoluto	erro relativo(%)
27 maio	P11	7,52	8,18	0,66	8,07
27 maio	P12	8,16	8,53	0,37	4,34
27 maio	P13	8,26	8,42	0,16	1,90
27 maio	P21	8,11	7,99	0,12	1,50
27 maio	P22	7,98	7,83	0,15	1,92
27 maio	P23	8,03	7,71	0,32	4,15
27 maio	P31	7,88	7,71	0,17	2,20
27 maio	P32	7,74	7,56	0,18	2,38
27 maio	P33	7,76	7,59	0,17	2,24
21 maio	P21	7,54	8,41	0,87	10,34
21 maio	P22	8,05	8,54	0,49	5,74
21 maio	P23	8,26	8,5	0,24	2,82
21 maio	P31	8,36	8,3	0,06	0,72
21 maio	P32	8,35	8,3	0,05	0,60
21 maio	P33	8,37	8,34	0,03	0,36

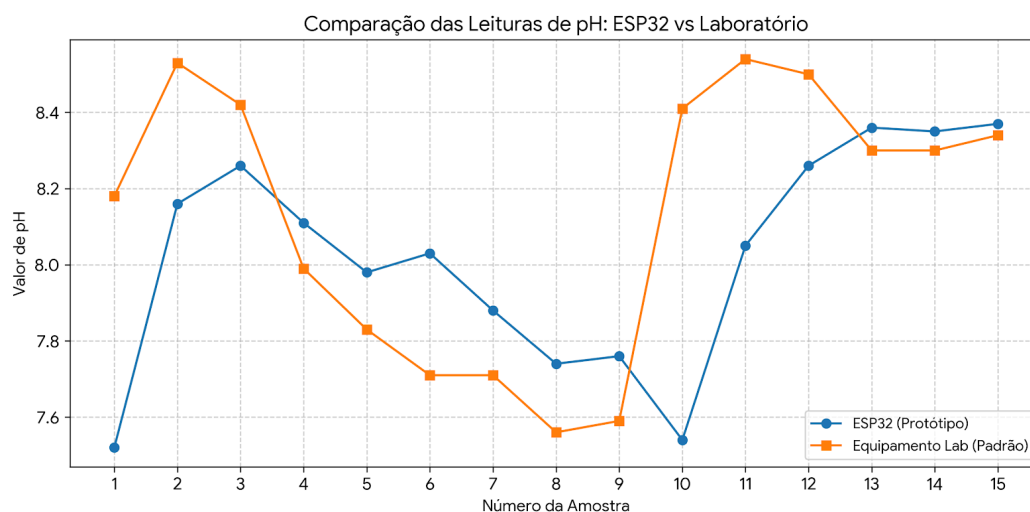
Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 22 - Dispersão ESP32 x laboratório



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 23 - Comparação de leituras (ESP32 x laboratório)



Fonte: Autoria própria (2026)

A análise estatística dos dados, figuras 22 e 23, revela um desempenho altamente satisfatório do protótipo de baixo custo. O Erro Absoluto Médio (MAE) do sistema foi de apenas 0,26 unidades de pH, o que demonstra que o sensor acoplado ao ESP32 conseguiu acompanhar de perto a alcalinidade das amostras reais. Quando analisado sob a ótica do Erro Relativo Médio (MAPE), o sistema apresentou uma variação de apenas 3,28% em relação ao

equipamento profissional do laboratório. Considerando a aplicação do projeto em monitoramento ambiental de águas de barragem, onde as variações não costumam exigir a precisão de casas decimais estritas de processos químicos industriais, essa margem de erro atesta a confiabilidade técnica da solução proposta.

Destaca-se o excelente desempenho do protótipo nas amostras finais (Amostras P31, P32 e P33 de 21 de Maio), onde os erros relativos foram inferiores a 1% (0,72%, 0,60% e 0,36%, respectivamente). Esse comportamento sugere que, após um período adequado de estabilização do eletrodo na solução, a precisão do sensor se aproxima significativamente do equipamento laboratorial.

No entanto, observam-se desvios pontuais mais expressivos, como é o caso da amostra P21 de 21 de Maio, que apresentou o maior erro relativo (10,34%), com o protótipo registrando 7,54 enquanto o laboratório indicou 8,41. Em instrumentação eletrônica de baixo custo, anomalias isoladas como esta são previstas e podem ser atribuídas a fatores externos durante a medição, como o tempo de estabilização insuficiente da sonda na amostra, presença de bolhas de ar no bulbo de vidro do eletrodo, ou até mesmo interferências de ruído no conversor Analógico-Digital (ADC) do ESP32 naquele instante específico.

De modo geral, a validação comprova que o sistema desenvolvido com o ESP32 não apenas é capaz de realizar a leitura do pH de forma coerente, mas também mantém uma precisão suficiente para atuar como uma ferramenta de monitoramento contínuo e preventivo para corpos hídricos.

4.2.2 Análise de turbidez e diagnóstico de falha no hardware

Durante a etapa final de validação das amostras, o sensor de turbidez apresentou uma degradação de sinal que culminou em uma falha de hardware irreversível no componente. No entanto, o registro dos dados preliminares e o diagnóstico técnico da falha fornecem apontamentos relevantes sobre a instrumentação óptica de baixo custo. Antes da paralisação total do módulo, foi possível realizar uma coleta inicial contendo oito amostras, calibrando o sensor previamente em água destilada. Na tabela 5, e na figura 24, é possível perceber que os dados de referência do laboratório para este lote demonstraram uma variação estreita e estável da turbidez, oscilando entre 30,9 NTU e 40,0 NTU. Em contrapartida, as leituras medidas pelo protótipo apresentaram alta dispersão (variando de 43,7 NTU a 91,8 NTU) e um comportamento irregular, sem correlação linear com o padrão. Essa ausência de linearidade já

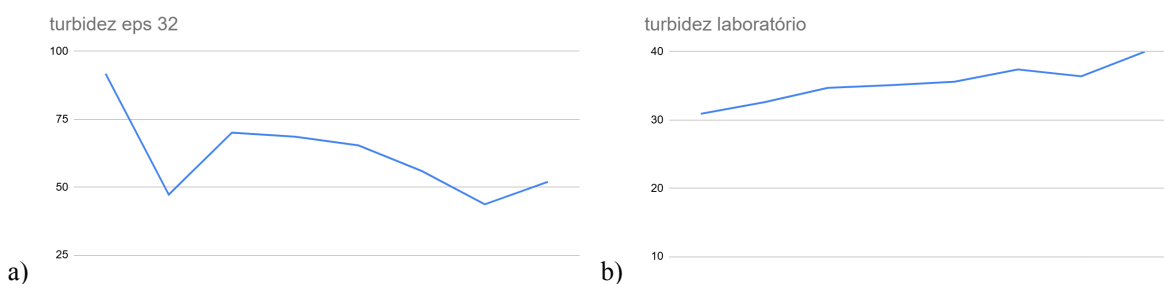
indicava o início do processo de degradação do emissor infravermelho ou do receptor óptico do componente.

Tabela 5 – Comparativo inicial de Turbidez: Protótipo vs. Laboratório

Amostra	Turbidez Protótipo (NTU)	Turbidez Laboratório (NTU)
P11	91,80	30,90
P12	47,25	32,60
P13	70,07	34,70
P21	68,60	35,10
P22	65,40	35,60
P31	56,00	37,40
P32	43,70	36,40
P33	52,00	40,00

Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 24 - Comportamento instável do sensor de turbidez nas amostras iniciais, evidenciando os primeiros sinais de degradação do componente óptico. A figura é para a) dados do ESP32 e b) dados do laboratório



Para investigar a anomalia e comprovar a integridade do microcontrolador e das conexões físicas (chicote de fios e isolamento contra umidade), procedeu-se com uma segunda bateria de testes. Os novos dados foram organizados na tabela 6 e esta etapa consistiu em isolar o processamento lógico e ler os dados originais diretamente das portas analógicas do ESP32 (resolução de 12 bits, intervalo de 0 a 4095).

Tabela 6 – Diagnóstico de falha: Leitura bruta do ADC (ESP32) vs. Laboratório

Data	Amostra	Leitura Bruta do ADC (ESP32)
21 maio	P21	2045
21 maio	P22	2045
21 maio	P23	2047
21 maio	P31	2044
21 maio	P32	2044
21 maio	P33	2042

Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 25 - Gráfico diagnóstico do sensor de turbidez falho (Leitura bruta do adc do esp32 x laboratório)



Nota: O Sinal Bruto ADC do ESP32 exibe uma resposta estática (aprox. 2045), confirmando a falha do módulo sensor, enquanto a referência do laboratório mostra variação.

Fonte: Autoria própria (2026)

Com a análise da tabela 6 e da figura 25, nota-se que enquanto a turbidez das amostras reais variava progressivamente no equipamento laboratorial (25,8 a 32,0 NTU), a leitura bruta do ADC do ESP32 permaneceu estável na faixa de 2042 a 2047. O congelamento do sinal digitalizado exatamente no ponto médio da escala de leitura (equivalente a uma tensão nominal constante e sem modulação) demonstra cientificamente que o microcontrolador operava de maneira correta, mas o módulo sensor perdeu a capacidade de converter a refração da luz em uma variação de tensão proporcional. Descartada a ausência de danos por água ou ruptura do cabeamento, conclui-se que o componente sofreu uma falha intrínseca de semicondutor em seu conjunto óptico.

Embora o parâmetro de turbidez não tenha atingido a validação de exatidão esperada para o monitoramento contínuo neste primeiro escopo, a arquitetura do sistema provou-se capaz de identificar anomalias sistêmicas. Em desenvolvimentos futuros, recomenda-se a substituição do atual modelo por sondas ópticas industriais que possuam encapsulamento mais robusto e imunidade a ruídos de operação.

4.2.3 Análise integrada de ce e temperatura

A Tabela 7 e a figura 26 apresenta os dados consolidados das 23 amostras coletadas na barragem, relacionando a temperatura compensada pelo microcontrolador ESP32 com as leituras de Condutividade Elétrica (CE) do protótipo e do equipamento de referência.

Tabela 7 - Dados correlacionados de Temperatura e Condutividade Elétrica (CE)

(Continua)

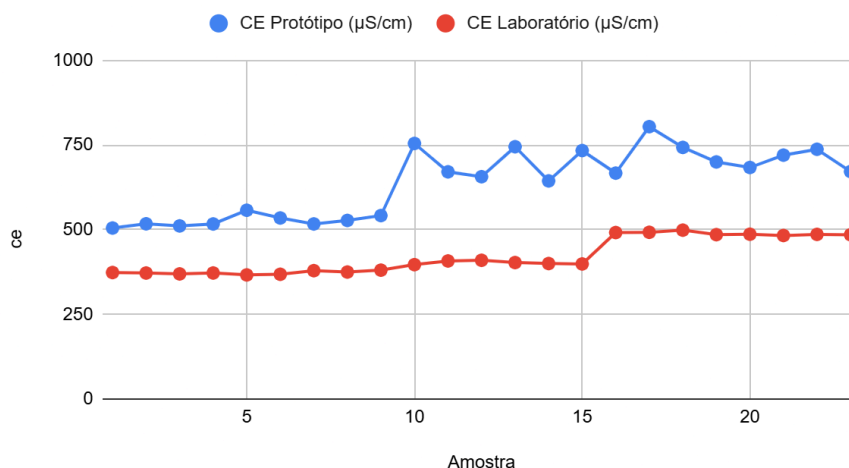
Data	Amostra	Temperatura Protótipo (°C)	CE Protótipo ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE Laboratório ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	erro absoluto
27 maio	P11	24,4	504,86	373,5	131,36
27 maio	P12	23,81	517,34	372	145,34
27 maio	P13	23,87	511,10	369,4	141,7
27 maio	P21	23,75	516,88	372,1	144,78
27 maio	P22	23,56	557,40	366,4	191
27 maio	P23	22,69	534,53	368,3	166,23
27 maio	P31	22,98	516,92	379	137,92
27 maio	P32	23,19	527,30	374,9	152,4
27 maio	P33	22,37	541,67	380,5	161,17
21 maio	P21	26,1	754,60	396,7	357,9
21 maio	P22	26,1	670,80	407,6	263,2
21 maio	P23	25,6	656,40	409,6	246,8
21 maio	P31	26,1	744,90	402,9	342
21 maio	P32	26	644,00	400	244
21 maio	P33	25,9	733,60	398,8	334,8

Tabela 7 - Dados correlacionados de Temperatura e Condutividade Elétrica (CE)

					(Conclusão)
13 maio	P11	25,4	667,00	491,5	175,5
13 maio	P12	25,6	804,20	492,3	311,9
13 maio	P13	25,4	742,90	498,6	244,3
13 maio	P21	25,6	700,00	485,3	214,7
13 maio	P22	25,7	683,65	486,6	197,05
13 maio	P31	25,6	720,09	482,8	237,29
13 maio	P32	25,5	737,42	486,1	251,32
13 maio	P33	25,8	671,69	485,1	186,59

Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 26 - Dispersão e acompanhamento das amostras da CE do protótipo e da CE do equipamento de referência



Fonte: Autoria própria (2026)

A análise combinada da temperatura e da condutividade elétrica (CE), figura 26, revela dinâmicas importantes sobre o comportamento termo-dependente dos íons dissolvidos na água da barragem e valida a robustez lógica implementada no protótipo. Ao todo, foram avaliadas 23 amostras coletadas em campo.

No que diz respeito à temperatura, as amostras apresentaram uma variação contida, oscilando entre a mínima de 22,37 °C e a máxima de 26,10 °C. Essa oscilação térmica, embora sutil, exerce influência direta sobre a atividade iônica do fluido, alterando a viscosidade da água e a mobilidade dos íons. Na prática laboratorial convencional, a comparação da CE foi executada sob condições térmicas de ambiente, sem correções manuais imediatas para as variações térmicas ocorridas ao longo do período de teste. Em contrapartida, o firmware desenvolvido para o microcontrolador ESP32 realizou a compensação térmica

dinâmica em tempo real, normalizando matematicamente todas as leituras de condutividade para a temperatura de referência de 25 °C.

Essa diferença metodológica entre os dois sistemas de medição reflete-se nos valores brutos da CE. O protótipo apresentou uma média de leitura nominal superior à do equipamento analítico do laboratório, resultando em um Erro Absoluto Médio (MAE) de 216,49 $\mu\text{S/cm}$ e um Erro Relativo Médio (MAPE) de 51,53%. Contudo, a aplicação do coeficiente de correlação de Pearson sobre os dois conjuntos lineares resultou em um índice de 0,7376. Este coeficiente indica uma correlação positiva forte, provando que o sensor acoplado ao ESP32 possui excelente sensibilidade e fidelidade de resposta, reproduzindo com precisão as tendências de aumento ou redução da salinidade iônica do corpo hídrico.

O comportamento paralelo dos sistemas fica evidente ao observar a transição entre os blocos de amostras: quando o equipamento de laboratório registrou uma elevação de patamar (saltando de uma média de $\sim 373 \mu\text{S/cm}$ nas primeiras amostras para patamares de $\sim 485 \mu\text{S/cm}$ nas amostras finais), o protótipo gerenciado pelo ESP32 identificou o mesmo fenômeno proporcional, elevando suas leituras de $\sim 515 \mu\text{S/cm}$ para a faixa de $\sim 700 \mu\text{S/cm}$.

A constância desse desvio de escala nominal mostra que o sensor de baixo custo opera de forma altamente linear, necessitando apenas de um ajuste fino em sua constante de célula (K) por meio de programação. A modelagem matemática por mínimos quadrados estabeleceu que a aplicação de um fator de correção estático de $K = 0,6542$ às leituras do protótipo minimiza o desvio sistemático, reduzindo o erro relativo médio para a faixa operacional de 8,73%.

Portanto, a integração de software para compensação de temperatura e a calibração por fator de escala conferem ao sistema embarcado uma confiabilidade técnica compatível com as exigências de monitoramento ambiental contínuo e preventivo, superando as limitações físicas do hardware genérico empregado.

A divergência nos valores nominais entre o protótipo e o equipamento de laboratório pode ser tecnicamente fundamentada pela metodologia de calibração adotada na fase de bancada. O sensor de condutividade do sistema embarcado foi calibrado utilizando dois pontos de referência: água destilada ($0 \mu\text{S/cm}$) e uma solução padrão de baixa concentração ($146 \mu\text{S/cm}$). No entanto, as amostras reais da barragem apresentaram uma condutividade significativamente superior, operando na faixa de 360 a $500 \mu\text{S/cm}$.

Ao submeter o sensor a leituras muito distantes de seu limite superior de calibração, o sistema operou em regime de extrapolação de escala. Devido à característica não-linear inerente do ADC interno do ESP32, essa extrapolação amplificou o distanciamento da reta

ideal de leitura, gerando o desvio nominal observado. Essa limitação instrumental, contudo, valida-se pela alta correlação estatística dos dados, confirmando que a solução para implementações futuras reside na calibração em múltiplos pontos ou com uma solução padrão mais próxima da realidade do corpo hídrico estudado (como soluções de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Para comprovar a eficácia da calibração via software, a Tabela 8 e a figura 27 apresenta os dados de condutividade elétrica após a aplicação do fator de correção $K = 0,6542$ sobre as leituras nominais do protótipo, evidenciando a redução substancial do erro relativo .

Tabela 8 - Aplicação do Fator de Calibração ($K = 0,6542$) aos dados de Condutividade Elétrica

(Continua)

Data	Amostra	Temperatura Protótipo ($^{\circ}\text{C}$)	CE Protótipo ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE Laboratório ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	erro absoluto
27 maio	P11	24,4	330,28	373,5	43,22
27 maio	P12	23,81	338,44	372	33,56
27 maio	P13	23,87	334,36	369,4	35,04
27 maio	P21	23,75	338,14	372,1	33,96
27 maio	P22	23,56	364,65	366,4	1,75
27 maio	P23	22,69	349,69	368,3	18,61
27 maio	P31	22,98	338,17	379	40,83
27 maio	P32	23,19	344,96	374,9	29,94
27 maio	P33	22,37	354,36	380,5	26,14
21 maio	P21	26,1	493,66	396,7	96,96
21 maio	P22	26,1	438,84	407,6	31,24
21 maio	P23	25,6	429,42	409,6	19,82
21 maio	P31	26,1	487,31	402,9	84,41
21 maio	P32	26	421,3	400	21,3
21 maio	P33	25,9	479,92	398,8	81,12
13 maio	P11	25,4	436,35	491,5	55,15
13 maio	P12	25,6	526,11	492,3	33,81
13 maio	P13	25,4	486,01	498,6	12,59
13 maio	P21	25,6	457,94	485,3	27,36

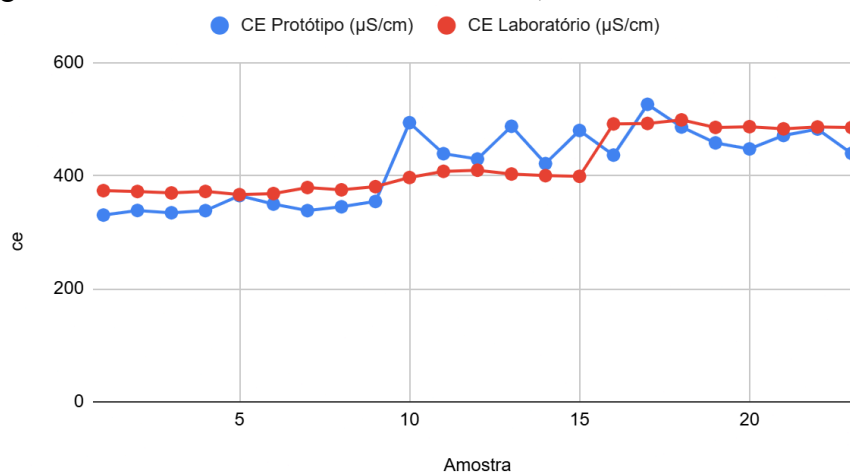
Tabela 8 - Aplicação do Fator de Calibração ($K = 0,6542$) aos dados de Condutividade Elétrica

(Conclusão)

13 maio	P22	25,7	447,24	486,6	39,36
13 maio	P31	25,6	471,08	482,8	11,72
13 maio	P32	25,5	482,42	486,1	3,68
13 maio	P33	25,8	439,42	485,1	45,68

Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 27 - CE com fator de conversão $K=0,6542$

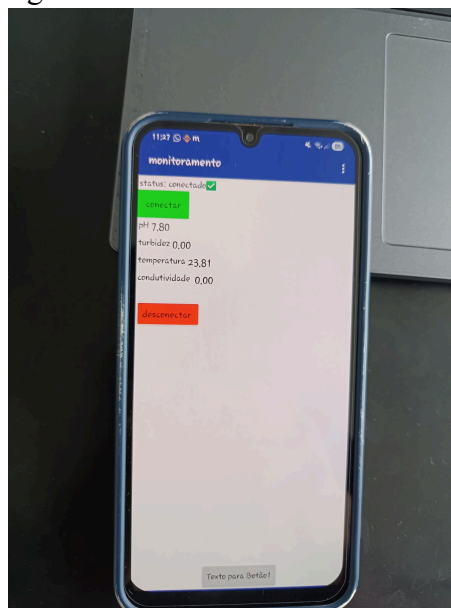


Fonte: Autoria própria (2026)

4.2 Interface de usuário

Para viabilizar a interação do usuário com os dados coletados em campo, desenvolveu-se um aplicativo móvel utilizando o ambiente de programação visual MIT App Inventor. A interface foi projetada com foco em usabilidade, exibindo de forma simultânea e clara os parâmetros monitorados pelo sistema embarcado: pH, turbidez, temperatura e condutividade elétrica. A Figura 28 apresenta o layout da aplicação em execução.

Figura 28 - Interface de usuário desenvolvida em ação



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Do ponto de vista da arquitetura de comunicação, optou-se pela utilização do protocolo Bluetooth integrado de forma nativa ao microcontrolador ESP32. A escolha por uma topologia de rede local e offline justifica-se pelo cenário de aplicação do projeto: o monitoramento de corpos hídricos, como barragens e represas, ocorre frequentemente em áreas remotas desprovidas de infraestrutura de internet (Wi-Fi ou rede celular). Através do perfil de porta serial (SPP - Serial Port Profile) do Bluetooth, o sistema garante que o operador possa coletar os dados utilizando apenas um smartphone pareado ao dispositivo, assegurando a autonomia do equipamento em qualquer localização geográfica.

O microcontrolador foi programado para processar as leituras dos sensores e transmitir os pacotes de dados para o aplicativo com uma taxa de atualização de 1 segundo (1 Hz). Graças à capacidade de processamento do ESP32, foi possível manter a rotina de varredura contínua das portas analógicas, a execução dos cálculos de compensação térmica e a transmissão em tempo real via Bluetooth de forma simultânea. Essa arquitetura evitou gargalos de processamento, garantindo uma telemetria fluida, sem travamentos na interface do usuário, e consolidando o protótipo como uma ferramenta prática para o trabalho de campo.

4.3 Potencial de aplicação e impacto social

Os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento e da validação deste protótipo comprovam que, apesar das restrições inerentes à instrumentação de baixo custo, o sistema é funcional, portátil e escalável. Esse panorama de viabilidade técnica responde diretamente à problematização que motivou este estudo: a necessidade de democratizar o acesso ao monitoramento da qualidade da água. Sendo assim, o projeto apresenta alto potencial de aplicação prática em três esferas principais:

a) **Aplicação Comunitária e Saúde Pública:** comunidades rurais ou que dependem de corpos hídricos não tratados (como a barragem objeto deste estudo) frequentemente sofrem com a falta de dados atualizados sobre a água que consomem ou utilizam. Equipamentos comerciais de multiparâmetros possuem custos proibitivos para associações de bairro ou pequenas cooperativas. O protótipo desenvolvido, com seu custo reduzido e operação simplificada via smartphone (Bluetooth), empodera essas comunidades, fornecendo um sistema de alerta preliminar que pode identificar contaminações bruscas ou variações atípicas de pH, atuando como uma ferramenta preventiva de saúde pública.

b) **Uso Educacional (Escolas e Instituições Técnicas):** no âmbito educacional, a escassez de laboratórios práticos e equipamentos didáticos limita o ensino de ciências da natureza. Este protótipo pode ser facilmente replicado em escolas públicas e privadas como uma ferramenta de metodologia ativa (educação STEM - Science, Technology, Engineering, and Mathematics). Através de sua interface visual e atualização em tempo real (1 Hz), os alunos podem visualizar conceitos abstratos de química e física, como o impacto da temperatura na condutividade elétrica, estimulando a conscientização ambiental através do monitoramento de rios e lagos locais.

c) **Agricultura, Aquicultura e Pequenas Indústrias:** setores produtivos de pequeno porte, como a piscicultura e a agricultura familiar, dependem estritamente da qualidade da água para garantir a produtividade de suas safras e viveiros. A variação de poucos graus na temperatura ou frações de pH pode resultar em perdas financeiras severas. O sistema embarcado no ESP32 pode ser instalado como um monitoramento de triagem (screening), onde a precisão de laboratório de alto custo não é estritamente necessária, mas a capacidade de identificar tendências de degradação da água em tempo real é fundamental para a tomada de decisão gerencial rápida.

Em suma, a validação deste projeto não apenas atesta a capacidade técnica da arquitetura baseada no ESP32, mas entrega à sociedade um modelo open-source de instrumentação analítica, transpondo a tecnologia dos laboratórios fechados para o campo de aplicação real.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho desenvolveu um sistema embarcado automatizado, integrando o microcontrolador ESP32, sensores físico-químicos e interface Bluetooth para análise da qualidade da água, avaliando pH, temperatura, condutividade elétrica e turbidez. Nos testes práticos com amostras do açude público de Pau dos Ferros-RN, o sistema apresentou desempenho altamente satisfatório para o pH, com Erro Absoluto Médio de 0,26 unidade e Erro Relativo Médio de 3,28% em relação ao equipamento laboratorial de referência. A condutividade elétrica registrou, inicialmente, desvios expressivos (51,53% de erro), mas, após a aplicação de fator de calibração corretivo, o erro reduziu para 8,73%, com coeficiente de correlação de Pearson de 0,7376, confirmando que o protótipo acompanhou fielmente as tendências reais da amostra. Assim, o sistema valida-se como uma ferramenta confiável de triagem em tempo real para identificar anomalias e contaminações, sem a pretensão de substituir a exatidão de equipamentos certificados.

Apesar dos resultados positivos nos parâmetros principais, o protótipo apresentou limitações técnicas. A mais significativa foi a falha irreversível de hardware no sensor de turbidez, devido à degradação de seu conjunto óptico infravermelho na etapa final da coleta, o que impossibilitou sua validação estatística. Outras limitações incluíram a não linearidade do conversor ADC interno do ESP32, que exigiu correções matemáticas via software; a necessidade de extrapolação da curva da condutividade pela distância entre a solução padrão laboratorial e a realidade hídrica local; e o alcance restrito da comunicação Bluetooth, que exige a presença física de um operador em campo e impede o monitoramento remoto contínuo.

Como diretrizes para versões futuras, recomenda-se a substituição do sensor de turbidez por sondas de padrão industrial ou com encapsulamento mais robusto, além de calibrações de campo da condutividade com soluções padrão mais próximas da realidade hídrica estudada. No aspecto da conectividade, sugere-se a investigação de soluções híbridas que combinem a autonomia do Bluetooth local com a sincronização posterior em nuvem. Recomenda-se, por fim, expandir o escopo de testes para outros ambientes reais, como rios e lagos, consolidando a estabilidade do dispositivo sob variadas condições ambientais.

A principal contribuição desta pesquisa reside na viabilização prática de um sistema embarcado de baixo custo para análise de parâmetros de qualidade da água, tecnicamente confiável e centrado em um único microcontrolador. O projeto diferencia-se da literatura ao

adotar o Bluetooth local como alternativa ao Wi-Fi convencional, adequando-se perfeitamente a corpos hídricos isolados no semiárido brasileiro. Adicionalmente, o detalhamento do diagnóstico da falha optoeletrônica e a comprovação quantitativa da indispensabilidade da calibração empírica rigorosa oferecem referências valiosas para o desenvolvimento de instrumentação acessível, promovendo a democratização da análise da água em comunidades rurais, instituições de ensino e pequenos produtores.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores. 3. ed. Brasília: ANA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/ods6>. Acesso em: 8 jul. 2026.

ANALOG DEVICES. DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS18B20.pdf> . Acesso em: 8 jul. 2026.

ARDUINO. Arduino UNO R3: datasheet. [S. l.]: Arduino, 2024. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf> . Acesso em: 8 jul. 2026.

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**, Brasília, DF, maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562#conteudo> . Acesso em: 7 jun. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. 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, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 maio 2011.

CAMARA, P. W. L. et al. Monitoramento da qualidade da água via Arduino. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, 18., 2021, Poços de Caldas. Anais [...]. Poços de Caldas: GSC Eventos Especiais, 2021.

CRAGGS, I. MQTT Vs. HTTP for IoT. [S. l.]: HiveMQ, 2026. Disponível em: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-vs-http-protocols-in-iiot/> . Acesso em: 8 jul. 2026.

DFROBOT. Gravity: analog turbidity sensor for Arduino (SEN0189) - datasheet. [S. l.]: DFRobot, [s. d.]. Disponível em: <https://www.alldatasheet.net/datasheet-pdf/view/2215746/DFROBOT/SEN0189.html> . Acesso em: 6 jun. 2026.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 Series: datasheet v5.2. Shanghai: Espressif Systems, 2025. Disponível em: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf . Acesso em: 8 jul. 2026.

KADAM, Sanaya; GHULE, Swati. Comparative study of MQTT and HTTP. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, [S. l.], v. 12, n. 6, jun. 2023. Disponível em: https://www.ijirset.com/upload/2023/june/86_Comparative_NC.pdf. Acesso em: 8 jul. 2026.

KERSCHBAUMER, R. Microcontroladores. Luzerna: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Catarinense – Câmpus Luzerna, [s. d.].

KEYESTUDIO. KS0429 TDS Meter V1.0 Sensor Module: datasheet. [S. l.]: Keyestudio, [s. d.]. Disponível em: <https://electronperdido.com/wp-content/uploads/2021/12/KS0429-keyestudio-TDS-Meter-V1.0.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2026.

MARWEDEL, P. Embedded System Design. [S. l.]: Springer, 2021.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT). Get Started with MIT App Inventor. Massachusetts: MIT, 2025. Disponível em: <https://appinventor.mit.edu/explore/get-started>, Acesso em: 8 jun. 2026.

MICROCHIP TECHNOLOGY. PIC16F87XA Data Sheet: 28/40/44-pin enhanced flash microcontrollers. Chandler: Microchip Technology Inc., 2003.

PELAEZ, A. Dashboards IoT – atributos, vantagens e exemplos. [S. l.]: Ubidots, 2018. Disponível em: <https://pt.ubidots.com/blog/iot-dashboards/>. Acesso em: 8 jun. 2026.

PEREIRA, K. P. **Rastreabilidade da qualidade da água potável utilizando a plataforma Arduino, um estudo de caso**: parâmetros físico-químicos versus sistema de distribuição, considerando a variação espacial. 2023. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) – Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas, Universidade Federal de São Paulo, Diadema, 2023.

DATASHEET do sensor de pH PH-4502C: how to use a PH probe and sensor. [S. l.: s. n.], [s.d.]. Disponível em: <https://cdn.awsli.com.br/969/969921/arquivos/ph-sensor-ph-4502c.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2026.

SILVA, L. D. **Monitoramento de qualidade de água através de sensores robóticos Arduino**. 2022. 137 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2022.

SILVA, M. P. B. **Monitoramento de parâmetros de qualidade da água com plataforma desenvolvida com Arduino**. 2023. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Telemática) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campina Grande, 2023.

STMICROELECTRONICS. **STM32F102x4, STM32F102x6, STM32F102x8, STM32F102xB**: Low-density and medium-density USB access line, ARM-based 32-bit MCU. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f102c8.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2026.

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO PH CÓDIGO

```
// pH4502C - Leitura de pH com Calibração Corrigida
// ESP32 | Pino ADC 34
#define PINO_PH    34
#define AMOSTRAS    40    // para melhor estabilidade no ESP32
#define DELAY_AMOSTRAS 10

// etapas de calibração
// PASSO 1: valor da tensão lido no Serial Monitor
//      com o sensor na solução tampão de pH 7.0
float TENSAO_PH7 = 1.65; // <-- COLOQUE O VALOR AQUI
// PASSO 2: valor da tensão lido no Serial Monitor
//      com o sensor na solução tampão de pH 4.0
float TENSAO_PH4 = 1.95; // <-- COLOQUE O VALOR AQUI
// fim calibração

float calcularPH(float tensao) {
    // m = variação de tensão por unidade de pH (inclinação da reta)
    float m = (TENSAO_PH4 - TENSAO_PH7) / (4.0 - 7.0);
    // Equação clássica: pH = 7.0 + (Tensão Atual - Tensão Neutra) / m
    float ph = 7.0 + ((tensao - TENSAO_PH7) / m);
    return ph;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    analogReadResolution(12); // Garante a resolução de 12 bits do ESP32
    delay(1000);
    Serial.println("=== pH4502C - Leitura de pH Corrigida ===\n");
}

void loop() {
    long soma = 0;
    for (int i = 0; i < AMOSTRAS; i++) {
        soma += analogRead(PINO_PH);
        delay(DELAY_AMOSTRAS);
    }
}
```

```

int leituraMedia = soma / AMOSTRAS;
// Conversão direta baseada nos resistores de 1k e 2k (tensão que chega no ESP)
float tensaoESP = (leituraMedia * 3.3) / 4095.0;
float ph      = calcularPH(tensaoESP);
// Limita exibição entre pH 0 e 14
ph = constrain(ph, 0.0, 14.0);
Serial.println("_____");
Serial.print("ADC bruto:  ");
Serial.println(leituraMedia);
Serial.print("Tensão ESP:  ");
Serial.print(tensaoESP, 3);
Serial.println(" V");
Serial.print("pH estimado: ");
Serial.println(ph, 2);
// Classificação da água
Serial.print("Classificação: ");
if (ph < 6.5)      Serial.println("ÁCIDA");
else if (ph >= 6.5 && ph <= 7.5)  Serial.println("NEUTRA");
else              Serial.println("ALCALINA");
Serial.println("_____\\n");
delay(1000)
}

```

APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO CE E TEMPERATURA CÓDIGO

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define TDS_PIN 34      // Pino analógico do sensor TDS
#define ONE_WIRE_BUS 4  // Pino do DS18B20
#define VREF 3.3        // Voltagem de referência do ESP32 (3.3V)
#define ADC_RES 4096.0  // Resolução do ADC do ESP32
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
float fatorCalibracao = 1.0; // valor após o teste na solução (fator k )
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  sensors.begin();
}
void loop() {
  sensors.requestTemperatures();
  float temperatura = sensors.getTempCByIndex(0);
  // Se o sensor de temp falhar, assume 25°C para não zerar o cálculo
  if(temperatura < 0) temperatura = 25.0;
  int analogValue = analogRead(TDS_PIN);
  float voltage = analogValue * (VREF / ADC_RES);

  // 1. Compensação de Temperatura (Coeficiente de 0.02 por °C)
  float compensationCoefficient = 1.0 + 0.02 * (temperatura - 25.0);
  float compensationVoltage = voltage / compensationCoefficient;

  // 2. Converter voltagem compensada em Condutividade (uS/cm)
  // A curva padrão do TDS Meter V1 para CE (aproximada)
  float ecValue = (133.42 * pow(compensationVoltage, 3) - 255.86 *
  pow(compensationVoltage, 2) + 857.39 * compensationVoltage) * fatorCalibracao;
  Serial.print("Temp: "); Serial.print(temperatura); Serial.print("°C | ");
  Serial.print("CE: "); Serial.print(ecValue); Serial.println(" uS/cm");
  delay(1000); }
```

APÊNDICE C – CÓDIGO PYTHON RELAÇÃO DE TURBIDEZ COM OS COFATORES

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# dados
leitura_sensor = [3.9, 3.5, 3.1, 2.7, 2.3, 1.8, 1.4, 1.0]
ntu_laboratorio = [5, 20, 45, 90, 150, 250, 380, 500]

# — Regressão polinomial de grau 2 —————
coef = np.polyfit(leitura_sensor, ntu_laboratorio, 2)
a2, a1, a0 = coef

print("=" * 45)
print(" CALIBRAÇÃO POLINOMIAL (grau 2)")
print("=" * 45)
print(f" NTU = {a2:.4f}×sensor² + {a1:.4f}×sensor + {a0:.4f}")

# — R² manual
—————

ntu_predito = np.polyval(coef, leitura_sensor)
ntu_real = np.array(ntu_laboratorio)
ss_res = np.sum((ntu_real - ntu_predito) ** 2)
ss_tot = np.sum((ntu_real - np.mean(ntu_real)) ** 2)
r2 = 1 - (ss_res / ss_tot)

print(f" R² = {r2:.4f}")
print("=" * 45)

# — Gráfico
—————

x_linha = np.linspace(min(leitura_sensor), max(leitura_sensor), 200)
y_linha = np.polyval(coef, x_linha)

```

```
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.scatter(leitura_sensor, ntu_laboratorio, color='steelblue', s=80, zorder=5, label='Amostras')
plt.plot(x_linha, y_linha, color='tomato', linewidth=2, label=f'Curva grau 2 | R²={r2:.4f}')
plt.xlabel('Leitura do Sensor (V)')
plt.ylabel('Turbidez Real (NTU)')
plt.title('Curva de Calibração Polinomial')
plt.legend()
plt.grid(True, alpha=0.3)
plt.tight_layout()
plt.show()
```


APÊNDICE D – CÓDIGO PARA LER OS VALORES BRUTOS DA TURBIDEZ E DEPOIS JOGAR NO PYTHON E OBTER OS VALORES REAIS DE A E B

```

/ SENSOR DE TURBIDEZ - ESP32
// Lê o sensor, aplica calibração e exibe o NTU real
// 1. CONFIGURAÇÕES
#define PINO_SENSOR 34 // Pino analógico
#define NUM_AMOSTRAS 30 // Quantas leituras tira pra calcular a média
#define INTERVALO_MS 1000 // Tempo entre medições (em milissegundos)
// Coeficientes da calibração (substitua pelos valores do Python!)
// Equação: NTU = a * tensao + b
float a = -1120.4; // ← substitua pelo 'a'
float b = 5742.3; // ← substitua pelo 'b'
// Referência do ADC do ESP32
#define TENSAO_REF 3.3 // Volts
#define RESOLUCAO_ADC 4095.0 // 12 bits

// 2. FUNÇÕES
// Lê o sensor várias vezes e retorna a média (reduz ruído)
float lerTensaoMedia() {
    long soma = 0;
    for (int i = 0; i < NUM_AMOSTRAS; i++) {
        soma += analogRead(PINO_SENSOR);
        delay(2);
    }
    float mediaADC = soma / (float)NUM_AMOSTRAS;
    float tensao = (mediaADC / RESOLUCAO_ADC) * TENSAO_REF;
    return tensao;
}

// Converte tensão em NTU usando a equação de calibração
float converterParaNTU(float tensao) {
    float ntu = a * tensao + b;
    if (ntu < 0) ntu = 0; // NTU não pode ser negativo
    return ntu;
}

```

```

}
// Classifica a qualidade da água pelo NTU
String classificarAgua(float ntu) {
    if (ntu < 1) return "Cristalina";
    if (ntu < 4) return "Potavel (padrao OMS)";
    if (ntu < 10) return "Levemente turva";
    if (ntu < 100) return "Turva";
    return "Muito turva";
}

// 3. SETUP
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    analogReadResolution(12);    // ESP32 usa 12 bits (0-4095)
    analogSetAttenuation(ADC_11db); // Permite ler até 3.3V

    Serial.println("=====");
    Serial.println(" SENSOR DE TURBIDEZ INICIADO");
    Serial.println("=====");
    Serial.println("Tensao(V) | NTU   | Qualidade");
    Serial.println("-----");
}

// 4. LOOP PRINCIPAL
void loop() {
    float tensao = lerTensaoMedia();
    float ntu    = converterParaNTU(tensao);
    String qualidade = classificarAgua(ntu);
    // Imprime no Serial Monitor
    Serial.print(tensao, 3);
    Serial.print(" V   |");
    Serial.print(ntu, 1);
    Serial.print(" NTU |");
    Serial.println(qualidade);
    delay(INTERVALO_MS);
}

```

APÊNDICE E – CÓDIGO PARA CALIBRAR SENSOR DE TURBIDEZ USANDO DOIS PONTOS (ÁGUA DESTILADA E ÁGUA COM TERRA)

```

*
* PINOS:
* - Sensor de turbidez (saída analógica) → GPIO 34
* - VCC do sensor          → 5V
* - GND                    → GND
*
*/

#include <Arduino.h>

#define PINO_TURBIDEZ_ANALOG 34
#define RESOLUCAO_ADC 4095.0f // 12 bits
#define TENSAO_REF 3.3f // Referência do ESP32 (V)
#define FATOR_DIVISOR 1.5f // Divisor resistivo 10k+20k → ×1.5
// — Calibração de 2 pontos —————
// Ponto 1: água destilada → 0 NTU
#define TENSAO_0NTU 4.20f // Tensão na saída do sensor (antes do divisor)
// Ponto 2: água com muita terra → NTU alto
// *** SUBSTITUA pela tensão medida e pelo NTU de referência do lab ***
#define TENSAO_REF_ALTA 1.80f // Tensão (V) na saída do sensor (antes do divisor)
#define NTU_REF_ALTA 100.0f // NTU dessa amostra (meça em laboratório)
// — Médias para estabilidade —————
#define NUM_AMOSTRAS 30 // Média de N leituras ADC
// — Limites de qualidade (NBR/WHO orientativo) —————
#define LIMITE_POTAVEL 1.0f // NTU — água potável (OMS)
#define LIMITE_ACEITAVEL 4.0f // NTU — limite aceitável p/ consumo
#define LIMITE_ALTO 100.0f // NTU — muito turvo
//

```

```

// Coeficientes calculados automaticamente a partir da calibração
// Modelo linear: NTU = a * Tensao_sensor + b

```

```
//
```

```
float coef_a = 0.0f;
```

```
float coef_b = 0.0f;
```

```
//
```

```
void calcularCoeficientes() {
```

```
/*
```

```
 * Interpolação linear entre os dois pontos de calibração:
```

```
 * Ponto 1: (TENSAO_0NTU, 0 NTU)
```

```
 * Ponto 2: (TENSAO_REF_ALTA, NTU_REF_ALTA)
```

```
 *
```

```
 *  $a = (NTU_2 - NTU_1) / (V_2 - V_1)$ 
```

```
 *  $b = NTU_1 - a * V_1$ 
```

```
 *
```

```
 * Nota: tensão cai conforme turbidez aumenta (sensor invertido),
```

```
 * por isso  $a < 0$  e NTU aumenta quando tensão cai.
```

```
*/
```

```
coef_a = (NTU_REF_ALTA - 0.0f) / (TENSAO_REF_ALTA - TENSAO_0NTU);
```

```
coef_b = 0.0f - coef_a * TENSAO_0NTU;
```

```
Serial.println(F("=== CALIBRAÇÃO ==="));
```

```
Serial.printf("Ponto 1: %.2f V → 0.00 NTU\n", TENSAO_0NTU);
```

```
Serial.printf("Ponto 2: %.2f V → %.2f NTU\n", TENSAO_REF_ALTA, NTU_REF_ALTA);
```

```
Serial.printf("Coeficientes: a = %.4f | b = %.4f\n", coef_a, coef_b);
```

```
Serial.println(F("=====\n"));
```

```
}
```

```
//
```

```
float lerTensaoSensor() {
```

```
/*
```

```

* Lê N amostras do ADC, calcula média e converte para tensão
* na SAÍDA DO SENSOR (corrigindo o divisor resistivo).
*/
long soma = 0;
for (int i = 0; i < NUM_AMOSTRAS; i++) {
    soma += analogRead(PINO_TURBIDEZ_ANALOG);
    delay(2);
}
float media_adc = soma / (float)NUM_AMOSTRAS;
// Tensão no pino do ESP32 (0–3.3 V)
float tensao_gpio = (media_adc / RESOLUCAO_ADC) * TENSAO_REF;
// Tensão real na saída do sensor (antes do divisor)
float tensao_sensor = tensao_gpio * FATOR_DIVISOR;
return tensao_sensor;
}
//

```

```

float tensaoParaNTU(float tensao_sensor) {
    float ntu = coef_a * tensao_sensor + coef_b;
    if (ntu < 0.0f) ntu = 0.0f;    // Não existe NTU negativo
    return ntu;
}
//

```

```

String classificarQualidade(float ntu) {
    if (ntu <= LIMITE_POTAVEL) return "EXCELENTE (potavel)";
    if (ntu <= LIMITE_ACEITAVEL) return "ACEITAVEL";
    if (ntu <= LIMITE_ALTO) return "TURVO";
    return "MUITO TURVO";
}

```

//

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(500);
  analogReadResolution(12);
  analogSetAttenuation(ADC_11db); // Range 0–3.3 V

  Serial.println(F("\n ┌──────────────────────────────────────────┐"));
  Serial.println(F(" │  SENSOR DE TURBIDEZ - ESP32      │"));
  Serial.println(F(" │  TCC - Monitoramento de Agua    │"));
  Serial.println(F(" └──────────────────────────────────────────┘ \n"));

  calcularCoeficientes();
  Serial.println(F("MODO CALIBRAÇÃO: ATIVADO"));
  Serial.println(F("Mergulhe o sensor e pressione ENTER para capturar pontos."));
  Serial.println(F("(O loop principal inicia em 3 s)\n"));
  delay(3000);
}
//
```

```
void loop() {
    float tensao = lerTensaoSensor();
    float ntu = tensaoParaNTU(tensao);
    String qualidade = classificarQualidade(ntu);
    // Saída formatada no Monitor Serial
    Serial.println(F("-----"));
    Serial.printf("Tensao sensor : %.4f V\n", tensao);
    Serial.printf("Turbidez : %.2f NTU\n", ntu);
    Serial.printf("Qualidade : %s\n", qualidade.c_str());
}
```

```
Serial.println(F("—————\n"));  
  delay(2000);  
}
```

APÊNDICE F – CÓDIGO COMPLETO DO CIRCUITO E A COMUNICAÇÃO COM A INTERFACE WEB

```
#include "BluetoothSerial.h"
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// =====
//  CONFIGURAÇÃO DOS PINOS DO ESP32
//  =====

#define ONE_WIRE_BUS 4    // Pino do sensor de Temperatura (DS18B20)
#define PINO_PH 34        // Pino analógico do sensor de pH
#define TDS_PIN 32        // Pino analógico do sensor TDS / CE
#define PINO_TURBIDEZ 35  // Pino para o futuro sensor de turbidez
// Configurações do ADC do ESP32
#define VREF 3.3          // Voltagem de referência do ESP32 (3.3V)
#define ADC_RES 4095.0    // Resolução máxima do ADC de 12 bits (4095)
// Inicialização dos Sensores
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
BluetoothSerial SerialBT;

// --- CALIBRAÇÃO DO pH ---
// PASSO 1: Valor lido com o sensor na solução tampão de pH 7.0
float TENSAO_PH7 = 1.65; // <-- Mude aqui (Esperado: ~1.65V)

// PASSO 2: Valor lido com o sensor na solução tampão de pH 4.0
float TENSAO_PH4 = 1.95; // <-- Mude aqui (Esperado: ~1.95V)

// --- CALIBRAÇÃO DA CONDUTIVIDADE (CE) ---
// Ajuste este multiplicador após testar com uma solução de condutividade conhecida
float fatorCalibracaoCE = 1.0;
// Função para calcular o pH baseado na tensão
float calcularPH(float tensao) {
```



```

float m = (TENSAO_PH4 - TENSAO_PH7) / (4.0 - 7.0);
float ph = 7.0 + ((tensao - TENSAO_PH7) / m);
return ph;
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  analogReadResolution(12); // Garante a resolução de 12 bits
  sensors.begin();

  // Inicia o Bluetooth (Este é o nome que vai aparecer no MIT App Inventor)
  SerialBT.begin("tcc_tales");
  delay(1000);
  Serial.println("=== Sistema de Monitoramento Iniciado ===");
  Serial.println("Bluetooth Pronto para Conexão!");
}

void loop() {
  // -----
  // 1. LEITURA DA TEMPERATURA
  // -----
  sensors.requestTemperatures();
  float temperatura = sensors.getTempCByIndex(0);
  if(temperatura < 0) temperatura = 25.0; // Prevenção de falha do sensor
  // -----

  // 2. LEITURA DO pH (Com média de 40 amostras para estabilidade)
  // -----

  long somaPH = 0;
  int amostrasPH = 40;
  for (int i = 0; i < amostrasPH; i++) {
    somaPH += analogRead(PINO_PH);
    delay(10); // Pequeno atraso entre as leituras
  }

  int leituraMediaPH = somaPH / amostrasPH;
  float tensaoESP_PH = (leituraMediaPH * VREF) / ADC_RES;
  float ph = calcularPH(tensaoESP_PH);

```

```

ph = constrain(ph, 0.0, 14.0); // Trava o valor entre 0 e 14
// -----
// 3. LEITURA DA CONDUTIVIDADE (CE)
// -----
int analogValueTDS = analogRead(TDS_PIN);
float voltageTDS = analogValueTDS * (VREF / ADC_RES);

// Compensação de Temperatura e cálculo da Condutividade
float compensationCoefficient = 1.0 + 0.02 * (temperatura - 25.0);
float compensationVoltage = voltageTDS / compensationCoefficient;
float ecValue = (133.42 * pow(compensationVoltage, 3) - 255.86 *
pow(compensationVoltage, 2) + 857.39 * compensationVoltage) * fatorCalibracaoCE;
// -----
// 4. LEITURA DA TURBIDEZ (Futuro)
// -----
float turbidez = 0.0; // Valor provisório
// -----
// 5. DEBUG NO MONITOR SERIAL (Para você ver no PC)
// -----
Serial.println("-----");
Serial.print("Temp: "); Serial.print(temperatura); Serial.println(" °C");
Serial.print("pH: "); Serial.println(ph, 2);
Serial.print("CE: "); Serial.print(ecValue, 2); Serial.println(" uS/cm");
Serial.println("-----\n");
// -----
// 6. ENVIO PARA O MIT APP INVENTOR VIA BLUETOOTH
// -----
// O aplicativo espera os dados separados por vírgula nesta ordem:
// pH, Temperatura, Turbidez, Condutividade

SerialBT.print(ph, 2);
SerialBT.print(",");
SerialBT.print(temperatura, 2);
SerialBT.print(",");

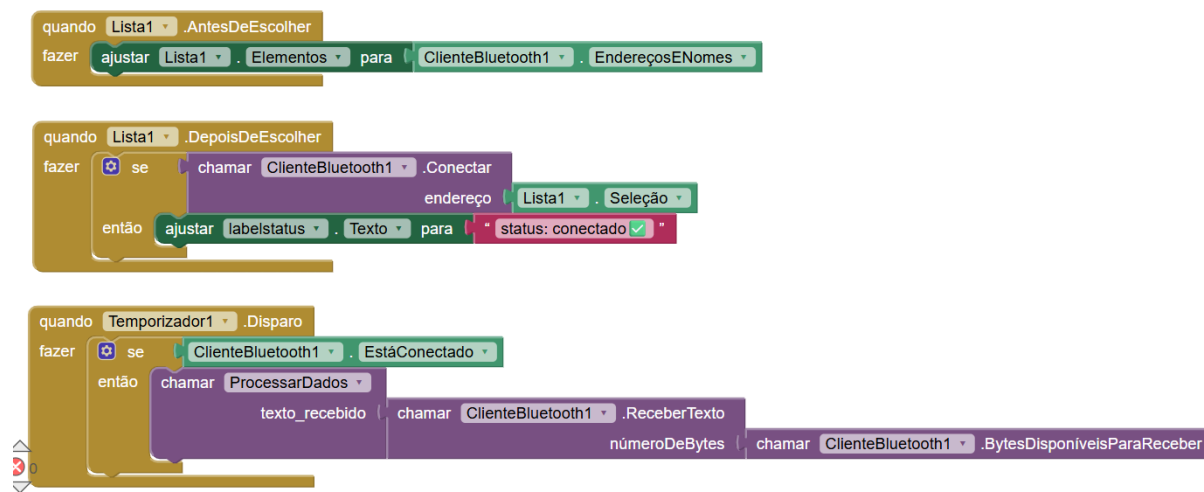
```

```
SerialBT.print(turbidez, 2); // Atualmente enviará 0.00
SerialBT.print(",");
SerialBT.println(ecValue, 2); // println avisa o celular que a mensagem acabou
// Espera 1 segundo para a próxima leitura
delay(1000);
}
```

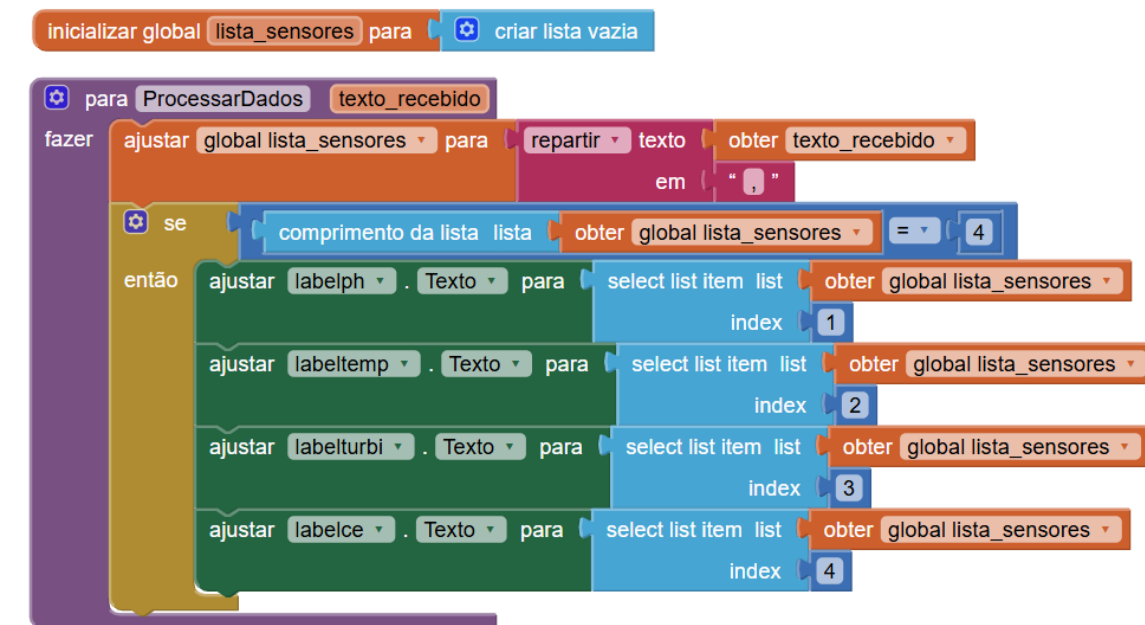
APÊNDICE G – PROGRAMAÇÃO DA INTERFACE EM BLOCOS DO MIT APP INVENTOR

Figura 29 - Programação em blocos da interface web no mit app inventor. A figura é para a) inicialização do bluetooth e comunicação com o esp32. b) para leitura e coleta dos dados dos sensores e c) para desconectar o bluetooth.

a)



b)



c)



Fonte: Autoria própria (2026)