

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**



PEDRO HENRIQUE SILVA RODRIGUES

**SISTEMA DE COLETA DE ÁGUA PROVENIENTE DE
CONDICIONADORES DE AR PARA SUPRIMENTO DE PLANTA
DIDÁTICA INDUSTRIAL**

**ITUMBIARA-GO
2026**



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Pedro Henrique Silva Rodrigues

Matrícula: 20171040100027

Título do Trabalho: SISTEMA DE COLETA DE ÁGUA PROVENIENTE DE CONDICIONADORES DE AR PARA SUPRIMENTO DE PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 11/07/2026.

Local Data

Documento assinado digitalmente
gov.br PEDRO HENRIQUE SILVA RODRIGUES
Data: 11/07/2026 14:11:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

PEDRO HENRIQUE SILVA RODRIGUES

**SISTEMA DE COLETA DE ÁGUA PROVENIENTE DE
CONDICIONADORES DE AR PARA SUPRIMENTO DE PLANTA
DIDÁTICA INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado relativo ao curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Itumbiara, contendo requisitos necessários para obtenção do título de Graduado em Engenharia de Controle e Automação.

Área de Concentração: Engenharias.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente.

Coorientadora: Profa. Me. Meirielly Maria Cardoso Santos.

ITUMBIARA-GO

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R696s Rodrigues, Pedro Henrique Silva

Sistema de coleta de água proveniente de condicionadores de ar para suprimimento de planta didática industrial. / Pedro Henrique Silva Rodrigues. – Itumbiara, 2026.

74 p.: il.

Trabalho de conclusão do curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente.

1. Automação industrial. 2. Água - Reuso. 3. Controle de processos. I. Título. II. Vicente, Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 628.16

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Rosiane Gonçalves de Lima CRB1/1684



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

PEDRO HENRIQUE SILVA RODRIGUES

**SISTEMA DE COLETA DE ÁGUA PROVENIENTE DE CONDICIONADORES DE AR PARA SUPRIMENTO DE PLANTA
DIDÁTICA INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em 07 de julho de 2026.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara
Orientador

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Diogo Soares Resende
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara
Avaliador

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Wellington do Prado
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara
Avaliador

Documento assinado eletronicamente por:

- **Wellington do Prado, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 07/07/2026 21:38:25.
- **Diogo Soares Resende, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 07/07/2026 21:23:42.
- **Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 07/07/2026 20:55:11.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 07/07/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 797249

Código de Autenticação: da7aaf0cc4



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5632 (ramal: 5632), (64) 2103-5630 (ramal: 5630)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, que me deu sabedoria e sustentou meu caminho. Aos meus pais e à minha irmã, por todo amor, incentivo e exemplo de dedicação. E à minha companheira, pela paciência, compreensão e apoio nos dias mais desafiadores.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus. Ele guiou meus passos, me concedeu força e sabedoria, e nunca deixou faltar perseverança diante das dificuldades. Sem sua presença, eu não teria chegado até aqui.

Aos meus pais, Luiz Cláudio e Nilza Rejânia, e à minha irmã Fernanda, devo mais que um simples obrigado. O amor, o apoio constante, a compreensão nos momentos difíceis e o incentivo diário de vocês foram fundamentais em cada etapa da minha vida acadêmica e pessoal.

Meirielly, minha companheira de vida e coorientadora, você merece um agradecimento especial. Sua paciência, dedicação, apoio emocional e as contribuições para este trabalho fizeram toda a diferença. Ter você ao meu lado, tanto na vida quanto no TCC, tornou essa trajetória mais leve, mais rica e mais significativa.

Bruno, meu orientador, deixo minha sincera gratidão. Sua orientação criteriosa, paciência, disponibilidade e as contribuições técnicas e metodológicas foram essenciais para o desenvolvimento e consolidação deste estudo.

Aos colegas de turma, obrigado por cada momento de parceria, pela troca de conhecimento, pelo apoio mútuo e por todas as experiências que compartilhamos ao longo do curso. Vocês fizeram essa jornada mais produtiva e, acima de tudo, inesquecível.

Agradeço também a todos os professores do IFG – Câmpus Itumbiara. O conhecimento transmitido, a dedicação ao ensino e o compromisso com nossa formação fizeram toda a diferença. Cada aprendizado ao longo dessa caminhada foi fundamental para eu construir minha trajetória como futuro engenheiro.

"Entrega o teu caminho ao Senhor, confia nele, e ele tudo fará"
Salmos 37:5

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado para captação, armazenamento, monitoramento e controle da água condensada proveniente de condicionadores de ar, visando sua utilização na renovação periódica da água de uma planta didática industrial. A proposta surgiu da observação de danos causados pelo uso contínuo de água tratada na planta didática, incluindo corrosão em conexões metálicas, incrustações em sensores e quebra de componentes, motivando a substituição por um fluido de menor agressividade química. O sistema foi desenvolvido com microcontrolador ESP32, sensor ultrassônico AJ-SR04T, sensor de temperatura DS18B20, sensor de fluxo YF-S201, sensores de nível tipo boia, bomba periférica, válvulas solenoides e módulo de relés. O software embarcado realiza leitura contínua das variáveis, controle de dosagem volumétrica, detecção de níveis críticos, verificação de falha de fluxo e atualização de dados em display LCD 20x4 e na plataforma Blynk IoT, permitindo operação local e supervisão remota em tempo real. A vazão de produção de água condensada média total medida foi de 4,82 L/h, com estimativa de produção mensal de 1.272,48 L. A análise físico-química comparativa demonstrou que a água condensada apresentou condutividade elétrica 53% menor, ausência total de cloro residual e concentração de sílica 99,5% inferior à da água da rede pública. O sistema demonstrou viabilidade técnica para o reaproveitamento da água condensada, contribuindo para a redução do desperdício hídrico, para a preservação dos componentes da planta e para a aplicação prática de conceitos de automação industrial, instrumentação eletrônica e Internet das Coisas em ambiente acadêmico.

Palavras-chave: Reuso de águas; Sistemas Automatizados com IoT; Planta Didática Industrial; Controle de processos; Monitoramento Online; ESP32.

ABSTRACT

This work presents the development of an automated system for the collection, storage, monitoring, and control of condensed water from air conditioning units, aimed at its use in the periodic renewal of water in an industrial didactic plant. The proposal arose from the observation of damage caused by the continuous use of treated tap water in the didactic plant, including corrosion in metallic connections, scaling on sensors, and component failure, motivating the replacement with a fluid of lower chemical aggressiveness. The system was developed using an ESP32 microcontroller, an AJ-SR04T ultrasonic sensor, a DS18B20 temperature sensor, a YF-S201 flow sensor, float-type level sensors, a peripheral pump, solenoid valves, and a relay module. The embedded software performs continuous reading of variables, volumetric dosage control, critical level detection, flow failure verification, and data updates on a 20×4 LCD display and on the Blynk IoT platform, enabling local operation and real-time remote supervision. The average total condensed water production flow rate measured was 4.82 L/h, with an estimated monthly production of 1,272.48 L. Comparative physicochemical analysis demonstrated that the condensed water presented 53% lower electrical conductivity, a complete absence of residual chlorine, and a silica concentration 99.5% lower than that of tap water. The system demonstrated technical feasibility for the reuse of condensed water, contributing to the reduction of water waste, the preservation of plant components, and the practical application of industrial automation, electronic instrumentation, and Internet of Things concepts in an academic environment.

Keywords: Water reuse; IoT-based automation systems; Industrial didactic plant; Process control; Online monitoring; ESP32.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo de incrustação observado em conexão de engate rápido da planta didática...	14
Figura 2 – Quebra da conexão de engate rápido da planta didática.....	14p
Figura 3 – Danos estruturais causados pelo descarte inadequado da água condensada.....	17
Figura 4 – Planta didática industrial DLB CP003-UA.....	18
Figura 5 – Ciclo básico de refrigeração por compressão de vapor.....	21
Figura 6 – Local de implantação do sistema de coleta de água condensada.....	26
Figura 7 – Interligação dos drenos dos condicionadores de ar da Sala 02.....	27
Figura 8 – Interligação dos drenos dos condicionadores de ar da Sala 03.....	28
Figura 9 – Bombona de polietileno.....	29
Figura 10 – Reservatório mestre com sensores e conexões hidráulicas instaladas.....	30
Figura 11 – Reservatório escravo utilizado para ampliação da capacidade de armazenamento....	31
Figura 12 – Disposição dos sensores e conexões hidráulicas no reservatório mestre.....	32
Figura 13 – Entradas dos drenos instaladas no reservatório utilizando espigões metálicos para conexão de mangueira.....	33
Figura 14 – Tampa em aço galvanizado instalada sobre o reservatório para proteção dos sensores e vedação do sistema.....	34
Figura 15 – Componentes eletrônicos instalados no interior da caixa hermética de proteção.....	35
Figura 16 – Caixa hermética utilizada para proteção do sistema eletrônico.....	35
Figura 17 – Arquitetura geral do sistema automatizado.....	36
Figura 18 – Sensor ultrassônico AJ-SR04T utilizado no sistema.....	38
Figura 19 – Sensor de nível tipo boia horizontal utilizado no sistema.....	40
Figura 20 – Sensor digital de temperatura DS18B20 encapsulado utilizado no sistema.....	41
Figura 21 – Sensor de fluxo YF-S201 utilizado no sistema.....	42
Figura 22 – Placa adaptadora ESP32 utilizada no sistema.....	43
Figura 23 – Diagrama elétrico simplificado do sistema.....	44
Figura 24 – Módulo de relés utilizado para acionamento dos atuadores.....	45
Figura 25 – Bomba periférica BP500 utilizada para transporte de água no sistema.....	46
Figura 26 – Válvulas solenoides utilizadas no sistema.....	47
Figura 27 – Interface local composta por display LCD 20x4 e botões de operação.....	48
Figura 28 – Fluxograma da rotina de dosagem automática.....	51
Figura 29 – Fluxograma da rotina de drenagem automática por boia alta.....	53
Figura 30 – Interface supervisória mobile desenvolvida na plataforma Blynk IoT.....	54
Figura 31 – Amostras de água coletadas para análise físico-química.....	56
Figura 32 – Trecho da rotina de dosagem automática com compensação de desligamento.....	61
Figura 33 – Mensagem de nível baixo exibida na interface local.....	62
Figura 34 – E-mail de notificação de falha de fluxo enviado pela plataforma Blynk IoT.....	63
Figura 35 – Trecho do software embarcado utilizado para controle do envio de dados à plataforma Blynk IoT.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sensores utilizados no sistema automatizado.....	38
Tabela 2 – Pinos virtuais utilizados na plataforma Blynk IoT.....	55
Tabela 3 – Vazão de água condensada obtida nas Salas 02 e 03.....	58
Tabela 4 – Estimativa de produção de água condensada a partir da vazão média total.....	59
Tabela 5 – Comparação físico-química entre água da rede pública e água condensada.....	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	JUSTIFICATIVA	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL DLB CP003-UA	18
2.2	IMPORTÂNCIA DA ÁGUA E DA QUALIDADE DA ÁGUA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS	19
2.3	CONDICIONADORES DE AR.....	21
2.4	ÁGUA TRATADA E ÁGUA CONDENSADA DE AR-CONDICIONADO	22
2.4.1	Qualidade microbiológica da água condensada.....	23
2.5	SISTEMAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO	24
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO.....	26
3.2	VAZÃO DE ÁGUA CAPTADA	27
3.3	SISTEMA DE COLETA DE ÁGUA E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA CONDENSADA.....	29
3.4	DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA	31
3.5	ARQUITETURA DO SISTEMA AUTOMATIZADO.	36
3.6	INSTRUMENTAÇÃO E SENSORES	37
3.6.1	Sensor ultrassônico AJ-SR04T	38
3.6.2	Sensores de nível tipo boia	39
3.6.3	Sensor de temperatura DS18B20.....	40
3.6.4	Sensor de fluxo YF-S201	41
3.7	SISTEMA ELETRÔNICO E ATUADORES.....	43
3.7.1	Microcontrolador ESP32	44
3.7.2	Módulo de Relés	45
3.7.3	Bomba periférica	46
3.7.4	Válvulas solenoides	47
3.7.5	Interface local	48
3.8	SOFTWARE EMBARCADO	49
3.9	SISTEMA SUPERVISÓRIO BLYNK IOT	54

3.10 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DAS AMOSTRAS	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 PRODUÇÃO DE ÁGUA CONDENSADA	57
4.2 DIMENSIONAMENTO E CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO	59
4.3 DOSAGEM AUTOMÁTICA E CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE FLUXO	60
4.4 PROTEÇÕES OPERACIONAIS E SUPERVISÃO REMOTA	62
4.5 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA COMPARATIVA DA ÁGUA	64
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

O consumo global de água tem aumentado nas últimas décadas, devido ao crescimento populacional e expansão industrial aumentando a pressão sobre os recursos hídricos, consequentemente intensificando a preocupação com a gestão destes. A indústria é um dos setores que mais consomem água potável, sendo fundamental para fins alimentícios, laboratórios ou até preservação de equipamentos (MARQUES; PEDRO, 2022).

Em indústrias, comércios e instituições de ensino, o uso de aparelhos de ar-condicionado se tornou indispensável. Essas máquinas em funcionamento, além de resfriar o ar geram um subproduto, a água condensada, geralmente, essa água é descartada de maneira inadequada, no chão, formando poças e ambiente propício a crescimento de musgos e lodo, além de desagradável esteticamente e gerar condições favoráveis para acidentes. Estudos da engenharia civil revelam que descartar a água condensada do ar-condicionado de forma inadequada pode gerar sérios problemas nas edificações, como infiltrações, fissuras e outros (CAMPOS *et al.*, 2019).

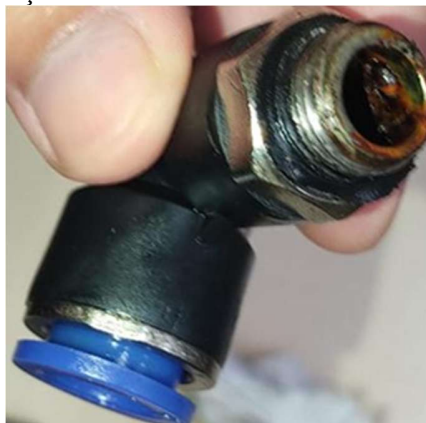
A água gerada pela condensação da umidade atmosférica em aparelhos de ar-condicionado, apresenta baixa concentração de sais dissolvidos, quando coletada e armazenada adequadamente, pode ser utilizada para fins não potáveis, tanto para industriais quanto domésticos. Estudos apontam que esse tipo de água apresenta pH próximo da neutralidade e reduzidos valores de condutividade elétrica, cloro residual e outros compostos dissolvidos quando comparada à água tratada (CAMPOS *et al.*, 2019; SABNIS *et al.*, 2020).

A água tratada proveniente da rede pública apresenta características adequadas para consumo humano, contendo sais minerais, compostos utilizados na desinfecção e outros elementos químicos utilizados no controle microbiológico. Entretanto, sua utilização contínua em sistemas hidráulicos industriais pode favorecer processos de corrosão, incrustação e degradação de componentes metálicos, especialmente em equipamentos submetidos à recirculação constante de água (FRAUCHES-SANTOS *et al.*, 2014).

Na planta didática industrial DLB CP003-UA utilizada no Instituto Federal de Goiás – Campus Itumbiara, observou-se a presença de processos iniciais de corrosão e incrustações em conexões metálicas e sensores. Segundo Nascimento (2025), o acúmulo de minerais presentes na água tratada contribuiu para a degradação de componentes da planta, ocasionando inclusive a quebra da conexão de engate rápido instalado no tanque inferior, exigindo substituição do componente. As figuras 1 e 2 apresentam exemplos dos danos observados decorrentes do processo de corrosão.

Estudos demonstram que a presença de sais dissolvidos, cloretos e oxigênio dissolvido favorece reações eletroquímicas responsáveis pela corrosão metálica e formação de incrustações em sistemas hidráulicos industriais (FRAUCHES-SANTOS *et al.*, 2014; ANSHAR *et al.*, 2023; KHALEDI; MEHRABADI; MIRABI, 2024).

Figura 1 – Processo de incrustação observado em conexão de engate rápido da planta didática.



Fonte: Nascimento (2025).

Figura 2 – Quebra da conexão de engate rápido da planta didática.



Fonte: Nascimento (2025).

Nesse cenário, utilizar a água condensada do ar-condicionado na planta didática industrial DLB CP003-UA surge como alternativa sustentável ao uso da água tratada, visto que apresenta menor concentração de compostos potencialmente associados aos processos corrosivos. Além de sugerir uma potencial reutilização, reduzindo degradações de estruturas externas, riscos de acidentes e desperdício de recursos hídricos, incentivando atitudes sustentáveis dentro do ambiente acadêmico.

Dessa forma, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema automatizado para captação, monitoramento e controle da água condensada proveniente de condicionadores de ar, utilizando sensores eletrônicos, microcontrolador ESP32, supervisão remota via plataforma Blynk IoT e controle automático de dispositivos hidráulicos. O sistema possui como finalidade realizar a renovação periódica da água utilizada na planta didática industrial DLB CP003-UA, buscando reduzir processos corrosivos, incentivar práticas sustentáveis e integrar conceitos de automação industrial, instrumentação eletrônica e Internet das Coisas em ambiente acadêmico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e implementar um sistema automatizado para captação, monitoramento e controle da água condensada proveniente de condicionadores de ar para renovação periódica da água do reservatório de uma planta didática de fluxo modelo DLB CP003-UA. Buscando reduzir o consumo de água tratada, minimizar desperdícios e impactos associados ao descarte inadequado, além de contribuir para preservação dos componentes do sistema hidráulico da planta e aplicar conceitos de automação industrial, no ambiente acadêmico.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Projetar um sistema para captação e armazenamento da água condensada proveniente de condicionadores de ar, direcionando-a a reservatórios destinados ao reaproveitamento hídrico;
- Implementar o monitoramento do nível de água dos reservatórios por meio de sensores do tipo boia e sensor ultrassônico AJ-SR04T;
- Desenvolver o controle e monitoramento do volume de água bombeado utilizando sensor de vazão YF-S201;
- Monitorar a temperatura da água armazenada utilizando sensor digital DS18B20;
- Implementar o acionamento automático e manual da bomba hidráulica e das válvulas solenoides;
- Desenvolver um sistema de dosagem automática da água do reservatório;
- Implementar mecanismos de segurança operacional, incluindo detecção de falha de fluxo e geração de alarmes;
- Desenvolver interfaces de supervisão local utilizando display LCD I2C e botões de controle;

- Integrar sensores, atuadores e sistemas supervisórios ao microcontrolador ESP32 utilizando comunicação *Wi-Fi*;
- Implementar supervisão remota por meio da plataforma Blynk IoT, permitindo monitoramento e controle em dispositivos web e mobile.

1.2 JUSTIFICATIVA

A escolha da água condensada como fonte alternativa para renovação periódica da água utilizada na planta didática industrial DLB CP003-UA fundamenta-se em três aspectos complementares: as características físico-químicas desse tipo de água, os danos constatados por Nascimento (2025) decorrente ao uso contínuo de água tratada na planta didática e o potencial de aproveitamento de um recurso que, até então, era descartado de forma inadequada na instituição.

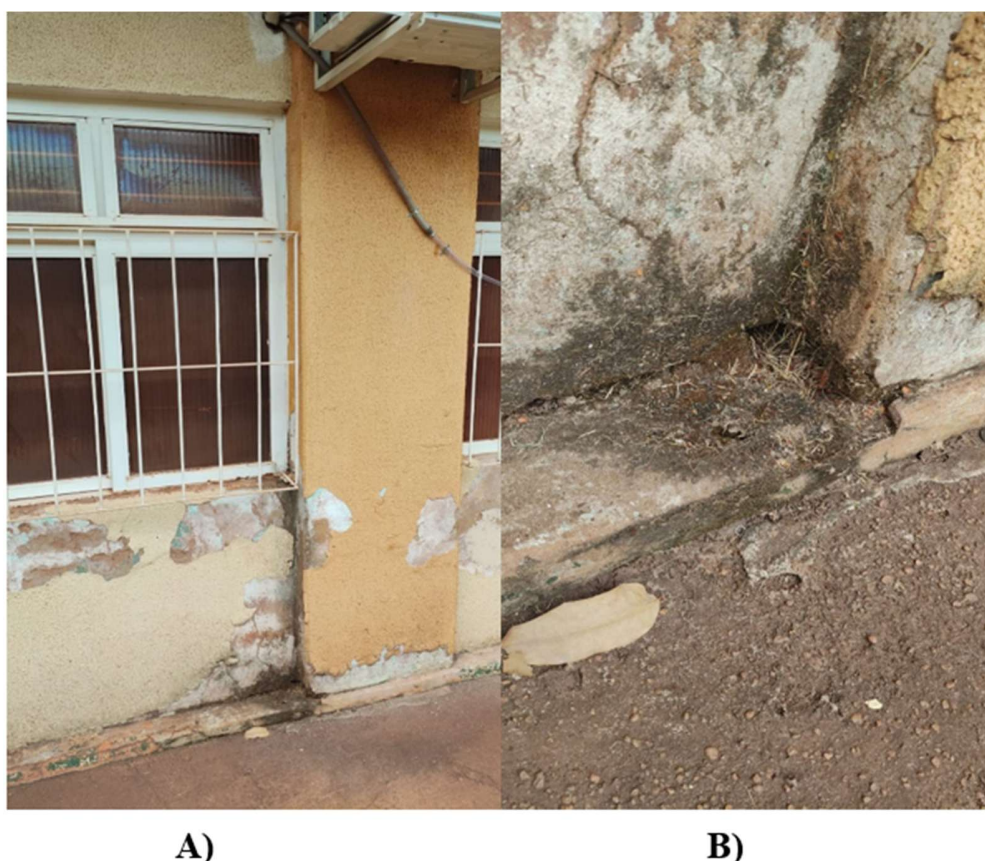
Do ponto de vista técnico, a utilização da água tratada proveniente da rede pública em sistemas hidráulicos de recirculação, como o da planta didática em questão, representa uma fonte recorrente de degradação de componentes. Os danos observados evidenciam que a qualidade do fluido empregado interfere diretamente na confiabilidade e na vida útil dos equipamentos (FRAUCHES-SANTOS et al., 2014). A substituição da água tratada por água condensada, caracterizada por baixa condutividade elétrica, reduzida concentração de sais dissolvidos e baixos teores de compostos clorados, configura uma alternativa tecnicamente fundamentada com potencial para reduzir a tendência à formação de incrustações e minimizar fatores associados aos processos corrosivos (SABNIS et al., 2020).

Os condicionadores de ar instalados no Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara, produzem continuamente água condensada que, na ausência de um sistema de captação, é descartada de forma irregular. Essa prática gera riscos de acidentes, favorece o crescimento de fungos, musgos e outros microrganismos e pode comprometer a integridade estrutural das edificações por meio de infiltrações e fissuras (CAMPOS et al., 2019), conforme ilustrado na figura 3.

Figura 3 – Danos estruturais causados pelo descarte inadequado da água condensada.

(A) Deterioração da parede causada pelo escoamento contínuo da água condensada proveniente de condicionadores de ar.

(B) Região inferior da estrutura apresentando desgaste superficial, umidade e acumulo de lodo.



Fonte: Acervo pessoal.

O aproveitamento desse efluente, portanto, representa não apenas uma solução técnica para os problemas observados na planta didática, mas também uma prática de uso racional dos recursos hídricos, alinhada aos princípios de sustentabilidade que se espera de uma instituição de ensino.

Este trabalho surge, portanto, da combinação de dois problemas concretos observados no campus: o descarte inadequado da água condensada e o desgaste crescente dos componentes da planta didática. A fim de solucionar essas questões, foi desenvolvido um sistema automatizado, composto por sensores, atuadores, microcontrolador e supervisão remota, destinado à captação, monitoramento e utilização da água condensada na renovação periódica da água da planta didática.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL DLB CP003-UA

A planta para controle de processos quatro variáveis PNV-T com redes industriais modelo DLB CP003-UA apresentada na figura 4, é uma ferramenta didática industrial que apresenta malha aberta e fechada, utilizada principalmente para ensino e experimentação prática de controle de processos como nível, vazão, pressão e temperatura, sendo amplamente utilizada em instituições de ensino técnico e superior nas áreas de automação, mecatrônica e engenharia de controle e processos. De acordo com o fabricante, a planta foi projetada para permitir o estudo das principais variáveis de processo presentes na indústria, possibilitando a integração entre teoria e prática em ambiente acadêmico (DE LORENZO DO BRASIL, 2024).

Figura 4 – Planta didática industrial DLB CP003-UA.



Fonte: Acervo pessoal.

A possibilidade de operação em malha aberta e malha fechada permite a implementação de estratégias clássicas de controle, como controle proporcional (P), proporcional-integral (PI) e proporcional-integral-derivativo (PID), além da análise do comportamento dinâmico do sistema. Dentre as atividades que podem ser realizadas com essa planta didática destacam-se estudos de redes de comunicação industrial (PROFINET, PROFIBUS DP/PA, IO-Link e Modbus), supervisão e

análise de processos por meio de sistemas SCADA e IHM, além da utilização de simulador virtual, entre outras aplicações (DE LORENZO DO BRASIL, 2024).

As dimensões do equipamento compreendem 2,1 x 2,6 x 1,2 m (altura, largura e profundidade), com voltagem de 220/380 V, pontos para entrada e saída de água, reservatório de aproximadamente 140 L de água, estrutura condicionada, painel elétrico e instrumentação integrada. Conforme descrito no manual técnico do equipamento, esses componentes permitem a medição contínua das variáveis de processo e a observação de fenômenos como perturbações, variações de carga e respostas transitórias do sistema (DE LORENZO DO BRASIL, 2024).

A utilização de plantas didáticas como a DLB CP003-UA contribui significativamente para o processo de ensino-aprendizagem, uma vez que permite ao estudante desenvolver competências práticas relacionadas à programação de CLPs, configuração de instrumentos, interpretação de sinais analógicos e digitais e análise de desempenho de malhas de controle.

2.2 IMPORTÂNCIA DA ÁGUA E DA QUALIDADE DA ÁGUA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

A água é um elemento natural de importância inestimável para o funcionamento dos ecossistemas. Além de sua importância ecológica para os seres humanos é um recurso utilizado para a alimentação, fins domésticos, processos agrícolas e industriais (REIS; SANCHES; MALDONADO, 2021). Na indústria assume papel fundamental para diferentes áreas como consumo, limpeza, laboratório, para o funcionamento de máquinas e sistemas industriais, como fluido de resfriamento, meio de transferência de energia e elemento auxiliar em processos mecânicos e térmicos (MARQUES; PEDRO, 2022).

Em diversos segmentos industriais, como metalúrgico, químico, alimentício e de geração de energia, a água é indispensável para garantir a operação segura e eficiente de equipamentos, contribuindo para a estabilidade operacional e para a prevenção de falhas (VALDEZ *et al.*, 2012). Uma das principais aplicações da água em máquinas industriais está relacionada ao controle térmico, isto ocorre devido ao potencial de absorção de calor, o que pode auxiliar no processo de resfriamento de equipamentos e estruturas, durante a operação, máquinas e componentes mecânicos estão sujeitos à geração de calor devido ao atrito, esforços mecânicos e processos de conversão de energia, o calor gerado durante as atividades pode corroborar para a redução da eficiência de processos, desgastes de

materiais e comprometer a vida útil de equipamentos, tornando o uso da água como agente de resfriamento fundamental para a manutenção da integridade dos sistemas, viabilizando o funcionamento de diversos dispositivos mecânicos (COSTA, 2006).

Dada a importância deste recurso para a indústria, tem-se a preocupação com a qualidade da água a ser utilizada, visto o relacionamento direto com ferramentas e equipamentos, podendo afetar a confiabilidade e estabilidade destes itens. A presença de sais minerais dissolvidos, partículas sólidas ou agentes químicos é considerada impureza ou contaminante e pode provocar problemas nos sistemas e gerar incrustações ou corrosões e arraste, levando à redução da eficiência, aumento do consumo energético e indução de falhas dos equipamentos (COSTA, 2006).

A corrosão é um processo em que há a deterioração de metais, por ações externas físicas, químicas, biológicas ou eletrolíticas. Neste processo, o dano é definitivo formando substâncias mais estáveis, que diminuem a espessura do metal, deixando o sistema vulnerável, a presença de contaminantes pode contribuir para o processo de corrosão, assim como, fatores como temperatura, umidade e pH (BALANGAO, 2024). As deteriorações causadas pela interação físico-química, é uma das maiores causas de preocupações com a funcionalidade de equipamentos metálicos que estão em contato com não metálicos, elevando significativamente os custos de operação (FRAUCHES-SANTOS *et al.*, 2014; KHALEDI; MEHRABADI; MIRABI, 2024).

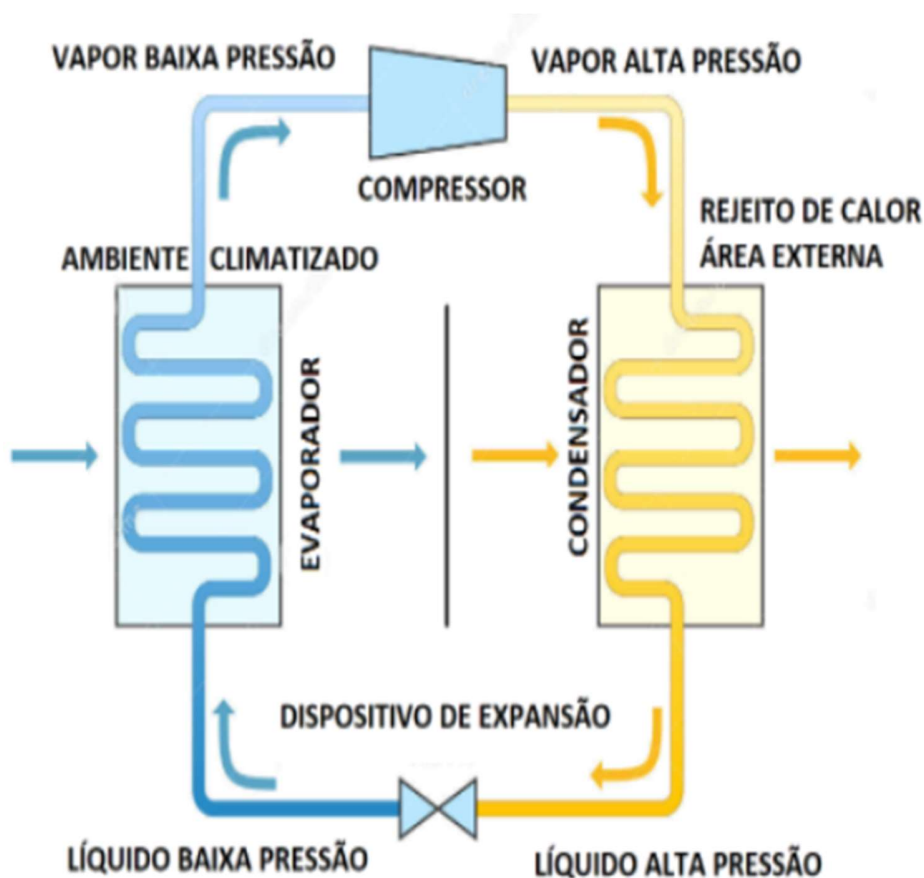
Os eletrólitos presentes em água são substâncias que favorecem processos anódicos e catódicos e conseqüentemente a formação da corrosão. A corrosão pode ser uniforme, localizada (em frestas ou Pite), limites de grão (galvânica, sob tensão, intergranular, erosão, cavitação e atrito) ou biológica. Na indústria, a corrosão pode aparecer de duas principais formas em associação com a água, sendo uniforme ou de ataque localizado (RĂUTĂ; MATEI; AVRAMESCU, 2025). A qualidade deste fluido é um fator importante para a prevenção de corrosão, visto que elevadas concentrações de oxigênio dissolvido, cloreto, radicais livres e outros contribuem significativamente para a formação de incrustações nas tubulações (ZHAO *et al.*, 2024).

No caso da planta DLB CP003-UA, a substituição da água tratada por água condensada representa uma mudança pontual e de baixo custo que pode prolongar a vida útil dos componentes hidráulicos, conforme os danos já documentados por Nascimento (2025) indicam.

2.3 CONDICIONADORES DE AR

Os condicionadores de ar são equipamentos utilizados para controle de temperatura em ambientes internos, promovendo conforto aos utilizadores do ambiente e condições favoráveis para funcionamento de equipamentos sensíveis. Tem o funcionamento baseado no ciclo de refrigeração por compressão do vapor, composto por quatro elementos principais: compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador. O funcionamento básico desse ciclo pode ser observado na figura 5.

Figura 5 – Ciclo básico de refrigeração por compressão de vapor



Fonte: SMACNA Brasil (2024).

O compressor é responsável por comprimir o vapor fluido refrigerante, aumentando sua pressão e temperatura. Em seguida, o fluido passa pelo condensador, onde ocorre a troca de calor para o ambiente externo, promovendo sua mudança de estado, gasoso para líquido. O líquido em alta pressão passa pela válvula de expansão, dispositivo responsável pela redução de pressão do fluido.

refrigerante, permitindo sua expansão e redução de temperatura antes de alcançar o evaporador. O evaporador é responsável por realizar a troca de calor com o refrigerante que absorve o calor do ar interno do ambiente, promovendo seu resfriamento e a remoção parcial da umidade do ar (DHAMODHARAN *et al.*, 2023).

Ao longo do processo, o ar em contato com a superfície fria do evaporador, sofre queda de temperatura e perda da capacidade de retenção de vapor de água. Quando o ar atinge o ponto de orvalho, ocorre a condensação da umidade presente no ar interno do ambiente, formando gotículas de água sobre a superfície da serpentina da evaporadora. Essa água condensada é coletada em bandejas localizada abaixo da evaporadora e posteriormente direcionada pelo dreno até pontos de descarte ou armazenamento, originando a água condensada. (DHAMODHARAN *et al.*, 2023).

A quantidade de água gerada pelos condensadores de ar, é influenciada por diversos fatores: umidade relativa do ar, temperatura do ambiente, capacidade térmica do equipamento, tempo de operação e condições do ambiente climatizado. Normalmente a taxa de condensação é inversamente proporcional a temperatura do evaporador e diretamente proporcional a umidade do ar. Da mesma forma, equipamentos de maior capacidade operando por períodos prolongados tendem a gerar maiores volumes de água condensada (DHAMODHARAN *et al.*, 2023).

No Instituto Federal de Goiás, local no qual o projeto foi desenvolvido, possui diversos sistemas de condicionadores de ar em operação contínua gerando quantidades significativas de água condensada, tornando o desenvolvimento de sistemas automatizados de captação dessa água uma alternativa viável para otimização do uso de recursos hídricos, permitindo maior eficiência no processo de reaproveitamento.

2.4 ÁGUA TRATADA E ÁGUA CONDENSADA DE AR-CONDICIONADO

A água tratada ou de abastecimento público passa por diversos tratamentos antes de ser considerada potável, como coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção, para atendimento aos parâmetros de potabilidade (SALIM *et al.*, 2025). Este tipo de água apresenta sais minerais que combinada com agentes químicos residuais do tratamento (cloretos), pode interferir na vida útil de bombas, válvulas, trocadores de calor e outros componentes sensíveis, através de processos de corrosão aumentando a necessidade de manutenção e custos de operação (CAMPOS *et al.*, 2019; RĂUTĂ; MATEI; AVRAMESCU, 2025).

Em contraste, autores como Campos e seus colaboradores (2019) apontam dados que sugerem que a água condensada produzida por aparelhos de ar-condicionado apresenta características físico-químicas, com reduzidos valores de sais minerais, resíduos de cloro, cloretos e dureza, quando comparados aos valores encontrados em relação à água tratada, visto que este tipo de fluído é formado a partir do vapor de água do ar, a condensação não interage ativamente com outros compostos ou passa por tratamentos que podem contribuir para a apresentação dos elementos citados.

Estudos recentes, como de Matarneh e seus colaboradores (2024) sugerem que a condutividade de água proveniente de condicionadores de ar apresenta valores menores que os encontrados em águas tratadas, reduzindo a formação de processos de corrosão. Além disso, quando coletada e armazenada de forma adequada, apresenta estabilidade físico-química suficiente para ser utilizada para fins não potáveis, como torres de resfriamento, circuitos fechados de irrigação e plantas didáticas industriais.

O volume de água que pode ser coletado dos condicionadores de ar, pode variar a depender da temperatura, umidade relativa do ar, tempo ligado e capacidade do equipamento. Este volume, geralmente é descartado em calçadas, configurando desperdício de águas. Dada a importância da utilização correta desses recursos e a potencialidade em reuso, principalmente associado as concentrações de sais, e demais elementos reduzidos, que podem sugerir uso em reservatórios de água, resfriamento, irrigação e outros fins não potáveis (VIANA; ALVES; MARQUES, 2023).

A comparação entre os dois tipos de água evidencia que, a utilização em máquinas e sistemas industriais, a água condensada oferece vantagens significativas, como reduzida quantidade de minerais e resíduos do cloro, para redução de riscos associados à corrosão e incrustações, aumentando a durabilidade e segurança de equipamentos, tubulações e outros. Em sistemas didáticos, como plantas industriais utilizadas para ensino e experimentação, a utilização de água condensada pode sugerir reaproveitamento de um recurso que seria descartado, promovendo sustentabilidade e eficiência no consumo hídrico, sem comprometer a operação dos equipamentos e incentivando a gestão consciente do uso da água (CAMPOS *et al.*, 2019; RĂUTĂ; MATEI; AVRAMESCU, 2025).

2.4.1 Qualidade microbiológica da água condensada

Apesar das vantagens físico-químicas observadas na água condensada, é importante destacar que esse tipo de água, quando armazenada sem tratamento adequado, também está sujeita à

proliferação de microrganismos. Estudos indicam que reservatórios, tubulações e bandejas de condicionadores de ar podem acumular biofilmes e apresentar contagens elevadas de bactérias heterotróficas, especialmente quando não há manutenção periódica dos sistemas (SUN et al., 2024). A ausência de compostos residuais de desinfecção, como o cloro, característica da água condensada, pode favorecer a proliferação microbiológica durante o armazenamento quando não são adotadas medidas adequadas de manutenção e controle.

Dessa forma, ainda que a água condensada apresente características físico-químicas favoráveis à preservação dos componentes hidráulicos da planta didática, sua utilização segura ao longo do tempo depende também do controle da qualidade microbiológica da água armazenada, especialmente em aplicações que envolvam contato prolongado com componentes sensíveis ou risco de exposição humana.

Como medida preventiva, recomenda-se a instalação de um filtro mecânico de 5 μm na linha de saída do sistema, podendo ser complementado por um filtro de 1 μm em aplicações que exijam maior retenção de partículas em suspensão. Em aplicações consideradas críticas, ou em que haja maior possibilidade de contato humano com a água armazenada, sugere-se ainda a utilização de sistemas de desinfecção por radiação ultravioleta (UV), amplamente empregados no tratamento de águas de reuso por apresentarem eficácia na inativação de microrganismos sem a adição de produtos químicos (SALIM et al., 2025).

2.5 SISTEMAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Sistemas de controle e automação são utilizados para monitorar, controlar e supervisionar processos físicos, permitindo maior segurança operacional, repetibilidade e eficiência. Em aplicações industriais e didáticas, esses sistemas podem atuar sobre variáveis como nível, vazão, pressão e temperatura, além de realizar o acionamento de dispositivos como bombas, válvulas e motores (FOLGADO et al., 2024).

De forma geral, um sistema automatizado é composto por sensores, unidade de processamento, atuadores e interface de supervisão. Os sensores são responsáveis pela aquisição das variáveis do processo, enquanto a unidade de processamento interpreta os sinais recebidos e executa a lógica de controle. Os atuadores realizam as ações físicas no sistema, e a interface de supervisão permite ao operador acompanhar informações, enviar comandos e identificar falhas operacionais (FOLGADO et al., 2024).

Os sistemas de controle podem ser classificados em malha aberta ou malha fechada. Na malha aberta, a ação de controle ocorre sem realimentação direta da variável controlada. Já na malha fechada, há realimentação do processo, permitindo comparar a condição medida com a condição desejada e executar correções quando necessário (ALI et al., 2024).

Com o avanço da Internet das Coisas (IoT), sistemas automatizados passaram a incorporar recursos de conectividade, monitoramento remoto e transmissão de dados. Dessa forma, variáveis do processo podem ser acompanhadas por interfaces digitais, permitindo maior flexibilidade de operação e melhor supervisão do sistema (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010).

No contexto deste trabalho, esses conceitos são aplicados ao desenvolvimento de um sistema automatizado para captação, armazenamento, monitoramento e dosagem de água condensada, integrando sensores, atuadores, microcontrolador ESP32, interface local e supervisão remota via plataforma Blynk IoT.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO

O experimento foi desenvolvido no Instituto Federal de Goiás - Câmpus Itumbiara, que atende estudantes em três turnos, comportando educação básica, por meio do ensino médio integrado ao curso técnico e cursos de graduação, como engenharia elétrica, engenharia de controle e automação e licenciatura em química.

O local dispõe de vários aparelhos condicionadores de ar utilizados para climatização de salas e laboratórios, que funcionam durante o período de aulas. O sistema de coleta foi implantado em duas salas do bloco antigo (Sala 02 e 03, figura 6). As salas foram escolhidas devido à sua localização apresentar boa cobertura do sinal de *Wi-Fi* e ficarem próximas ao laboratório onde está implantada a planta didática industrial de controle de fluxo, facilitando tanto a renovação da água da planta como a comunicação remota.

Figura 6 – local de implantação do sistema de coleta de água condensada.



Fonte: Acervo pessoal.

Ademais, as salas possuem alta frequência de estudantes, o que implica maior tempo de funcionamento dos condicionadores de ar, e consequentemente uma maior geração de água condensada. Nos ambientes observados, estão presentes dois aparelhos condicionadores de ar da marca AGRATTO, modelo ACS30FR4-02 de 30 mil Btu/h, cada, totalizando 4 aparelhos a serem utilizados para as coletas de dados e implementação do sistema de coleta de água.

3.2 VAZÃO DE ÁGUA CAPTADA

A fim de quantificar o volume de água gerado pelos aparelhos de ar-condicionado das salas em que o sistema foi instalado, bem como estimar o volume mensal disponível para ser reaproveitado, foi realizado um estudo experimental de determinação da vazão da água produzida pelos equipamentos.

Nos ambientes analisados, cada sala possui dois aparelhos condicionadores de ar AGRATTO, modelo ACS30FR4-02 de 30 mil Btu/h cada, para realização da coleta da água condensada os drenos dos dois equipamentos de cada sala foram interligados por meio de uma mangueira cristalina de 5/8 de polegadas de diâmetro conforme apresentado nas figuras 7 e 8.

Figura 7 – Interligação dos drenos dos condicionadores de ar da Sala 02



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 8 – Interligação dos drenos dos condicionadores de ar da Sala 03



Fonte: Acervo pessoal.

Dessa forma a vazão medida em cada ponto, corresponde a vazão total de cada sala, resultante da contribuição simultânea dos dois aparelhos.

A coleta de água condensada para determinação da vazão de cada sala foi realizada durante intervalos de 30 minutos, com três coletas, ao longo de dois dias consecutivos, totalizando 6 medições por sala. Com o objetivo de capturar variações nas condições ambientais e regime de funcionamento dos equipamentos, as coletas foram realizadas em diferentes períodos do dia. Durante os ensaios, os condicionadores de ar operaram de forma a manter a temperatura dos ambientes em 20 °C.

A vazão volumétrica foi calculada pela relação entre o volume coletado e o tempo de coleta, conforme apresentado na equação 1.

$$Q = \frac{V}{t} \times 60 \quad (1)$$

Onde:

Q = vazão volumétrica de água condensada (L/h);

V = volume de água coletado (L);

t = tempo de coleta (min)

Os dados obtidos nas medições foram utilizados para calcular a vazão média de água condensada por sala e estimar a produção total do sistema. Esses resultados são apresentados e discutidos no capítulo 4.1.

3.3 SISTEMA DE COLETA DE ÁGUA E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA CONDENSADA.

O sistema de coleta da água condensada foi implantado a partir dos drenos originais dos aparelhos de ar-condicionado instalados nas salas 02 e 03. Para o direcionamento da água, foram utilizadas mangueiras cristalinas com diâmetro de 5/8 de polegada, responsáveis por conduzir o fluxo proveniente dos condicionadores de ar até os reservatórios de armazenamento, conforme apresentado nas figuras 7 e 8.

Como reservatórios, foram utilizadas bombonas de polietileno com capacidade nominal de 200 L cada, conforme ilustrado na figura 9. A escolha de reservatórios em polietileno se justifica à elevada resistência à corrosão, facilidade de aquisição, baixo custo e compatibilidade com aplicações de armazenamento de água. Cada bombona possui altura de 96,5 cm e diâmetro aproximado de 57,5 cm.

Figura 9 – Bombona de polietileno



Fonte: Acervo pessoal.

Para ampliação da capacidade de armazenamento, foram utilizados dois reservatórios interligados por uma mangueira cristalina de 5/8 de polegada. A conexão entre os reservatórios foi

realizada na mesma altura nos dois reservatórios, aproximadamente 11,5 cm acima do fundo, garantindo a equalização dos níveis de água entre eles.

Em condições de equilíbrio, as pressões hidrostáticas se igualam em pontos de mesma altura, resultando na uniformização do nível dos reservatórios interligados, conforme os princípios da estática dos fluidos descritos na literatura clássica de mecânica dos fluidos (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

A interligação dos reservatórios na mesma altura possibilitou a utilização de sensores e atuadores em apenas um dos reservatórios, denominado reservatório mestre. O segundo reservatório foi utilizado como reservatório escravo, com a função de ampliar a capacidade de armazenamento do sistema.

Os sensores do sistema foram instalados apenas no reservatório mestre, conforme apresentado na figura 10, nele foram instalados o sensor ultrassônico, sensor de temperatura, sensores de nível tipo boia horizontal, conexões de entrada dos drenos, conexão de sucção da bomba hidráulica e conexão com o reservatório escravo.

Figura 10 – Reservatório mestre com sensores e conexões hidráulicas instaladas.



Fonte: Acervo pessoal.

O reservatório escravo, apresentado na figura 11, foi utilizado exclusivamente para ampliação da capacidade de armazenamento do sistema. Nesse reservatório foram instaladas apenas as conexões hidráulicas de entrada dos drenos e interligação com o reservatório mestre.

Figura 11 – Reservatório escravo utilizado para ampliação da capacidade de armazenamento.



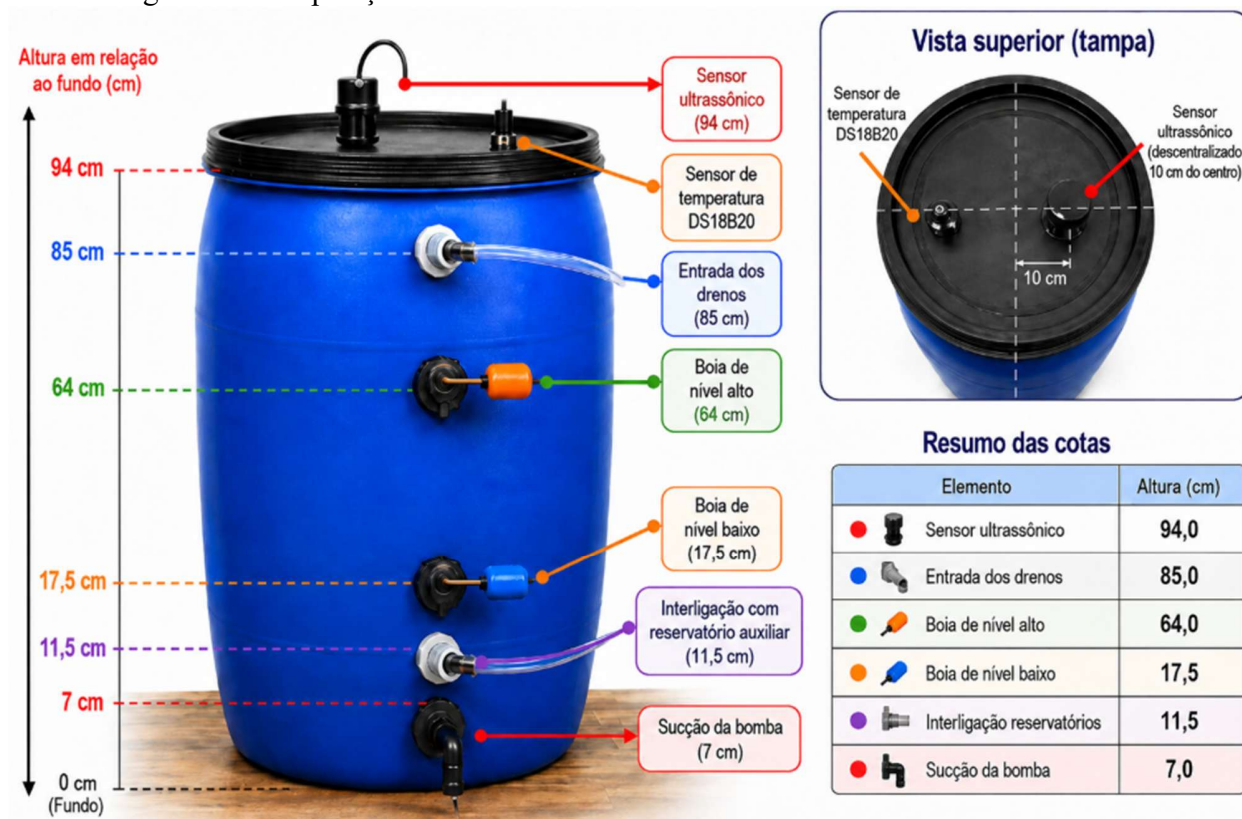
Fonte: Acervo pessoal.

Essa configuração, permitiu a expansão da capacidade de armazenamento de água condensada sem aumento proporcional da complexidade da instrumentação e do sistema de controle. Dessa forma, a montagem manteve simplicidade construtiva e menor complexidade de instrumentação.

3.4 DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA

Conforme ilustrado na figura 12, o reservatório mestre possui em sua tampa localizado a uma altura de 94 cm do fundo do tambor, o sensor ultrassônico, esse sensor foi instalado a 10 cm do centro da tampa. Esse posicionamento foi adotado como objetivo evitar interferências provocadas pelo tubo de sucção e pelos sensores instalados na parede interna do reservatório.

Figura 12 – Disposição dos sensores e conexão hidráulicas no reservatório mestre.

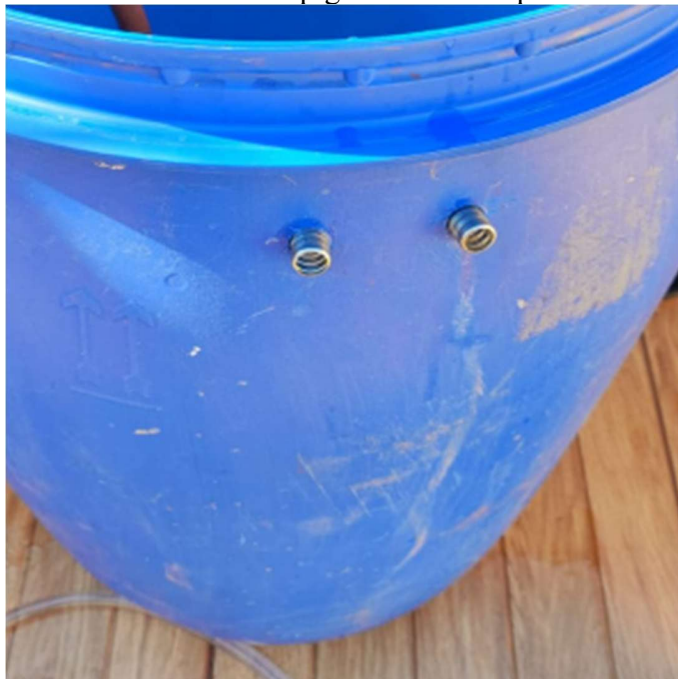


Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de ferramenta de inteligência artificial generativa.

O sensor de temperatura, foi instalado na tampa do reservatório, ao lado do sensor ultrassônico. O comprimento do cabo permitiu posicionar o elemento sensor próximo ao fundo do reservatório, possibilitando a medição de temperatura da água mesmo em condições de nível baixo.

Na lateral dos reservatórios tanto no mestre quanto no escravo a 85 cm, acima do fundo do reservatório, foram colocados nas laterais utilizando espigões metálicos para conexão de mangueira, a fim de garantir com que a conexão fique vedada, e assim evitar vazamentos e reduzir a possibilidade de acesso de insetos ao interior dos reservatórios, conforme apresentado na figura 13.

Figura 13 – Entradas dos drenos de espigões metálicos para conexão de mangueira.



Fonte: Acervo pessoal.

Ainda na lateral do reservatório mestre, 64 cm acima do fundo do tambor, foi instalado um sensor de nível alto, esse sensor foi posicionado abaixo do sensor ultrassônico, garantindo a distância mínima necessária para o funcionamento adequado da medição por ultrassom.

Também na lateral do reservatório mestre, 17,5 cm acima do fundo do tambor, foi instalado o sensor de nível baixo. Esse sensor foi utilizado para indicar a condição mínima de água disponível no sistema.

Para a interligação entre os reservatórios com a mangueira cristalina foi utilizado um espigão de plástico, a 11,5 cm acima do fundo em ambos os reservatórios.

Por fim, na lateral do reservatório mestre, a 7 cm acima do fundo, foi instalado o flange de saída da bomba periférica. Internamente, conectou-se uma válvula de retenção com crivo, cuja função é manter a tubulação de sucção preenchida com água após o desligamento da bomba, evitando a entrada de ar e preservando as condições de escorva do sistema. Além disso, o crivo atua como elemento filtrante, impedindo a sucção de resíduos sólidos que possam comprometer o funcionamento ou causar danos à bomba.

Para proteção dos sensores instalados na tampa do reservatório e evitar o acúmulo de água da chuva sobre sua superfície, foram fabricadas tampas em aço galvanizado. As tampas foram

desenvolvidas de forma de diamante, conforme apresentado na figura 14, favorecendo o escoamento da água da chuva e reduzindo a exposição dos sensores e conexões às condições externas.

Figura 14 – Tampa em aço sobre o reservatório para proteção dos sensores e vedação do sistema.



Fonte: Acervo pessoal.

Os componentes eletrônicos do sistema foram instalados no interior de uma caixa hermética de proteção, conforme apresentado nas figuras 15 e 16. A utilização da caixa teve como objetivo reduzir a exposição dos componentes eletrônicos à umidade, poeira e possíveis respingos de água provenientes do ambiente externo.

Figura 15 – Componentes eletrônicos instalados no interior da caixa hermética de proteção.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 16 – Caixa hermética utilizada para proteção do sistema eletrônico.



Fonte: Acervo pessoal.

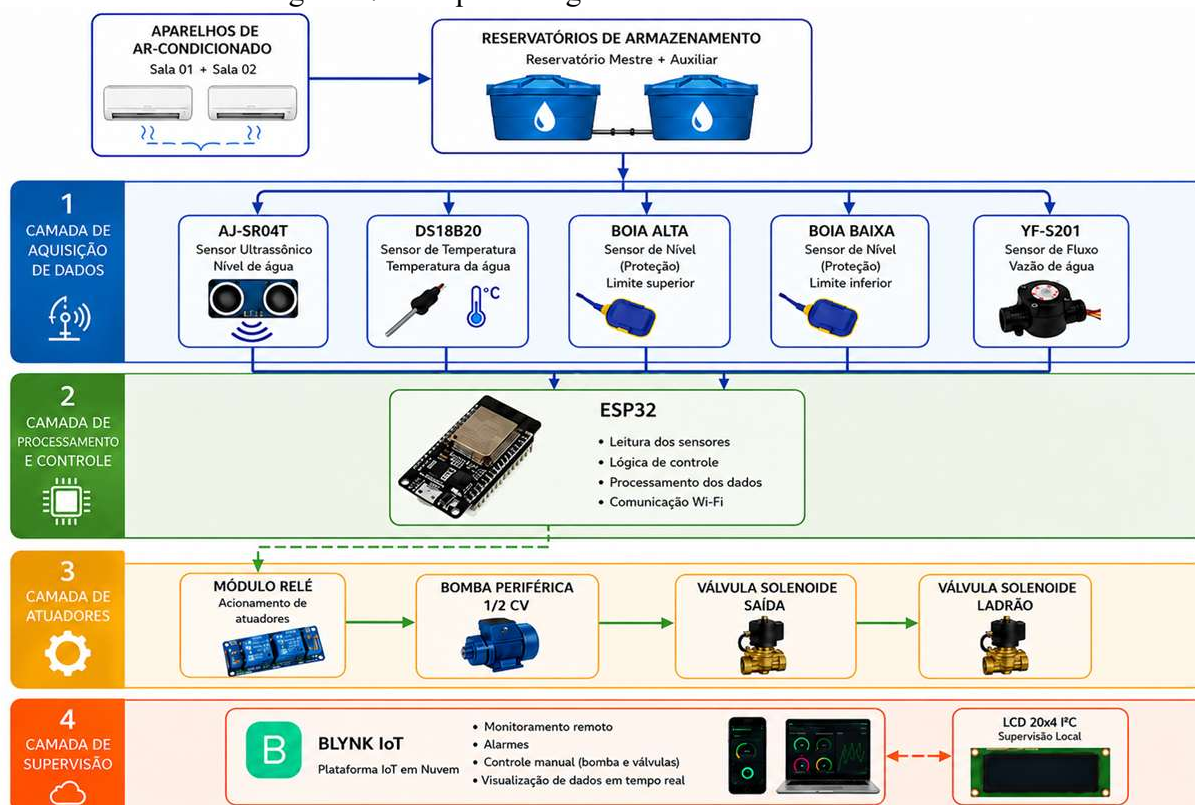
Além disso, a caixa permitiu melhor organização das conexões elétricas e facilitou o acesso aos componentes durante procedimentos de manutenção e operação do sistema. O *display* LCD e os

botões de acionamento manual foram instalados dentro da caixa, permitindo monitoramento e operação local.

3.5 ARQUITETURA DO SISTEMA AUTOMATIZADO.

O sistema automatizado desenvolvido tem como objetivo, monitorar o armazenamento e dosar água condensada proveniente de aparelhos de ar-condicionado. Para isso foi elaborada uma arquitetura composta de sensores, atuadores, sistema supervisorio, e uma unidade central de processamento, encarregada pela aquisição de dados, execução da lógica de controle e acionamento dos atuadores, conforme apresentado na figura 17.

Figura 17 – Arquitetura geral do sistema automatizado.



Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de ferramenta de inteligência artificial generativa.

A representação esquemática foi estruturada em quatro fases: aquisição de dados, processamento, atuação e supervisão. Essa organização permite a separação das funções de monitoramento, tomada de decisão, acionamento e acompanhamento do processo, seguindo

conceitos utilizados em sistemas de automação industrial e arquiteturas hierárquicas de controle (FOLGADO *et al.*, 2024).

A aquisição de dados é constituída pelos sensores instalados no reservatório mestre, responsáveis pelo monitoramento das variáveis de processo. Nela estão presentes o sensor ultrassônico, AJ-SR04T responsável pela medição da altura da coluna de água, o sensor de temperatura DS18B20, sensores de nível do tipo boia horizontal, para estabelecer limites operacionais e o sensor de fluxo YF-S201 para monitoramento da vazão de água bombeada.

O processamento e controle é realizado pelo microcontrolador ESP32, encarregado da leitura dos sinais dos sensores, processamento das informações, execução da lógica de controle e acionamento dos dispositivos de potência. Além dos dados fornecidos pelos sensores, o microcontrolador também recebe comandos do operador por meio de botões físicos instalados na interface local e da plataforma Blynk IoT, baseado nos dados adquiridos e nos comandos recebidos, o ESP32 executa as estratégias de controle e gerencia o funcionamento dos atuadores.

A fase de atuação é composta por dispositivos responsáveis pela execução física das ações de controle. Nessa camada estão a bomba periférica de 1/2 CV, responsável pelo transporte da água armazenada; a válvula solenoide de saída, utilizada para dosagem de água e acionamentos manuais; e a de ladrão, responsável pelo descarte controlado da água em condições específicas de operação.

A fase de supervisão é composta pela plataforma Blynk IoT e interface local composta por um display LCD 20X4 e botões de impulso, que permite o operador interagir com o sistema em tempo real de forma remota quanto de forma local, nesta camada são disponibilizadas funções de monitoramento, sinalização de alarmes, acionamento manual dos atuadores e resete de falhas.

3.6 INSTRUMENTAÇÃO E SENSORES

Para monitoramento das variáveis necessárias para o funcionamento do sistema automatizado, foram adotados sensores destinados a medição de nível, temperatura e vazão, além de sensores de nível pontual, utilizados como dispositivos de segurança operacional. A tabela 1 apresenta os sensores utilizados no projeto.

Tabela 1 – Sensores utilizados

Sensor	Variável	Função
AJ-SR04T	Nível	Medição contínua
Boia Alta	Nível	Proteção contra transbordamento
Boia Baixa	Nível	Proteção contra funcionamento a seco
DS18B20	Temperatura	Monitoramento da água
YF-S201	Vazão	Controle do volume bombeado

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6.1 Sensor ultrassônico AJ-SR04T

O sensor AJ-SR04T, apresentado na figura 18, foi utilizado neste projeto para o monitoramento contínuo do nível de água armazenada nos reservatórios. A escolha desse sensor se justifica pela sua simplicidade, resistência à umidade, baixo custo e a sua capacidade de realizar medições sem contato direto com o fluido.

Figura 18 – Sensor ultrassônico AJ-SR04T utilizado no sistema.



Fonte: Acervo pessoal.

O princípio de funcionamento do sensor fundamenta-se na emissão de pulsos ultrassônicos e na medição do tempo necessário para que o sinal seja refletido ao receptor. A distância entre o sensor e a superfície monitorada pode ser determinada pela equação 2 (AOSONG ELECTRONICS, 2023).

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (2)$$

Onde:

(d) representa a distância medida (m);

(v) representa a velocidade do som no ar (m/s);

(t) representa o tempo de ida e retorno do pulso ultrassônico (s).

O Sensor AJ-SR04T utiliza um único transdutor para emissão e recepção do sinal ultrassônico, característica que resulta em uma limitação, ponto cego para distâncias menores do que 20 cm. Segundo o fabricante, o sensor apresenta faixa típica de operação entre 20 cm e 600 cm (AOSONG ELECTRONICS, 2023).

No sistema desenvolvido o sensor foi instalado na tampa do reservatório mestre, conforme apresentado anteriormente na figura 12, a aproximadamente 94 cm do fundo do reservatório. A descentralização de 10 cm do sensor na tampa do reservatório foi uma estratégia utilizada com o objetivo de minimizar interferências provocadas pelos sensores instalados na parede do reservatório e pela válvula de retenção. O nível máximo de operação do sistema foi limitado pelo sensor de nível alto instalado a 64 cm do fundo do reservatório, portanto, a menor distância entre o sensor ultrassônico e a superfície da água é de aproximadamente 30 cm. Dessa forma, o sensor opera integralmente dentro da faixa recomendada pelo fabricante.

3.6.2 Sensores de nível tipo boia

Como dispositivos de segurança operacional do sistema, foram empregados dois sensores de nível do tipo boia horizontal, apresentados na figura 19. Esses sensores atuam de forma discreta, apontando apenas a presença ou ausência de líquido no ponto em que foram instalados.

Figura 19 – Sensor de nível tipo boia horizontal utilizado no sistema.



Fonte: Acervo pessoal.

O funcionamento do sensor se baseia na movimentação de um elemento flutuante, que acompanha a variação do nível do líquido. Quando o nível atinge a posição de acionamento do sensor, ocorre a alteração do estado elétrico da saída, permitindo sua utilização para detecção da presença ou ausência de líquido (GEMS SENSORS, 2023).

No sistema desenvolvido foram utilizadas duas boias horizontais instaladas no reservatório mestre, conforme apresentado anteriormente na figura 12. A primeira foi instalada a aproximadamente 64 cm do fundo do reservatório e foi denominada sensor de nível alto. A segunda foi instalada a aproximadamente 17,5 cm do fundo do reservatório e foi denominada sensor de nível baixo.

A boia de nível alto foi utilizada para indicar ao ESP32 que a água atingiu o limite superior operacional. Já a boia de nível baixo indica a presença mínima de água no reservatório. Dessa forma, as duas boias fornecem referências discretas dos limites operacionais do sistema, permitindo que essas informações sejam tratadas no software embarcado.

3.6.3 Sensor de temperatura DS18B20

O sensor DS18B20, apresentado na figura 20 foi utilizado no sistema para monitoramento da temperatura da água armazenada no reservatório.

Figura 20 – Sensor digital de temperatura DS18B20 encapsulado utilizado no sistema.



Fonte: Acervo pessoal.

O sensor DS18B20 possui faixa típica de medição entre -55°C e 125°C , resolução configurável de 9 a 12 *bits* e precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ na faixa de -10°C a 85°C . O modelo utilizado possui encapsulamento metálico em aço inoxidável e vedação para utilização em ambientes úmidos, sendo adequado para usos que requerem contato direto com a água armazenada no reservatório sem comprometer a integridade do sensor (MAXIM INTEGRATED, 2023).

No sistema desenvolvido, o sensor foi instalado na tampa do reservatório mestre utilizando cabo com comprimento aproximado de um metro, permitindo que o elemento sensor permanecesse próximo ao fundo do reservatório. A utilização do sensor permitiu a medição da temperatura da água armazenada no reservatório, contribuindo para monitoramento das variáveis do sistema automatizado.

3.6.4 Sensor de fluxo YF-S201

O sensor de fluxo YF-S201, apresentado na figura 21, foi utilizado para monitoramento da vazão de água fornecida pelo sistema. Esse sensor foi escolhido pela facilidade de integração com o microcontrolador ESP32, baixo custo de aquisição e capacidade de fornecer medições de vazão em tempo real.

Figura 21 – Sensor de fluxo YF-S201 utilizado no sistema.



Fonte: Acervo pessoal.

O funcionamento do sensor baseia-se na rotação de uma turbina interna impulsionada pela passagem do fluido. Durante a rotação, um elemento magnético acoplado à turbina interage com um sensor de efeito *Hall*, gerando pulsos elétricos proporcionais à sua passagem. Dessa forma, a frequência dos pulsos gerados pode ser relacionada à vazão da água. O Sensor YF-S201 apresenta faixa de medição entre 1 L/min e 30 L/min, alimentação de 5 V e conexão hidráulica de 1/2 polegada (SEED STUDIO, 2023).

No sistema desenvolvido, o sensor foi instalado na tubulação de 3/4 polegadas na saída da bomba, para a conexão com a tubulação foi necessário utilizar luva redutora de 3/4 para 1/2. A posição da instalação do sensor foi escolhida de forma a garantir que toda água bombeada passasse pelo sensor antes de chegar ao ponto de utilização.

Para o funcionamento adequado do sensor, foi realizado sua calibração experimental. Inicialmente foi adotado no *software* o fator de conversão indicado na documentação técnica do sensor. Ao realizar ensaios de funcionamento do sistema utilizando um recipiente graduado, foi observado uma diferença entre o volume indicado pelo sistema e o volume real coletado. Dessa forma, o fator de conversão foi ajustado de maneira proporcional ao erro observado em cada teste, utilizando a relação entre o volume indicado pelo software e o volume medido no recipiente graduado. A correção do fator de correção pode ser representada pela equação 3.

$$K_{novo} = K_{anterior} \times \frac{V_{indicado}}{V_{real}} \quad (3)$$

K_{novo} = novo fator de calibração;

K_{anterior} = fator de calibração utilizado no ensaio anterior;

V_{indicado} = volume calculado ou indicado pelo sistema;

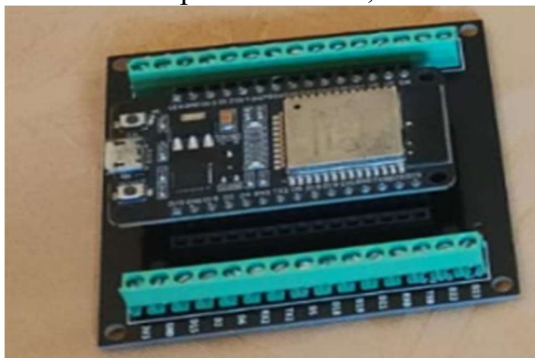
V_{real} = volume medido no recipiente graduado;

O fator final de calibração e a compensação aplicada na dosagem são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

3.7 SISTEMA ELETRÔNICO E ATUADORES

Para o funcionamento geral do sistema, foi necessária conexão de todos os dispositivos, essas conexões foram realizadas por meio de condutores isolados de cobre fino, a fim de facilitar a interligação de todos os componentes foi utilizada uma placa adaptadora para o ESP 32, apresentado na figura 22, facilitando a conexão dos sensores a placa ESP32, e evitando soldas desnecessárias.

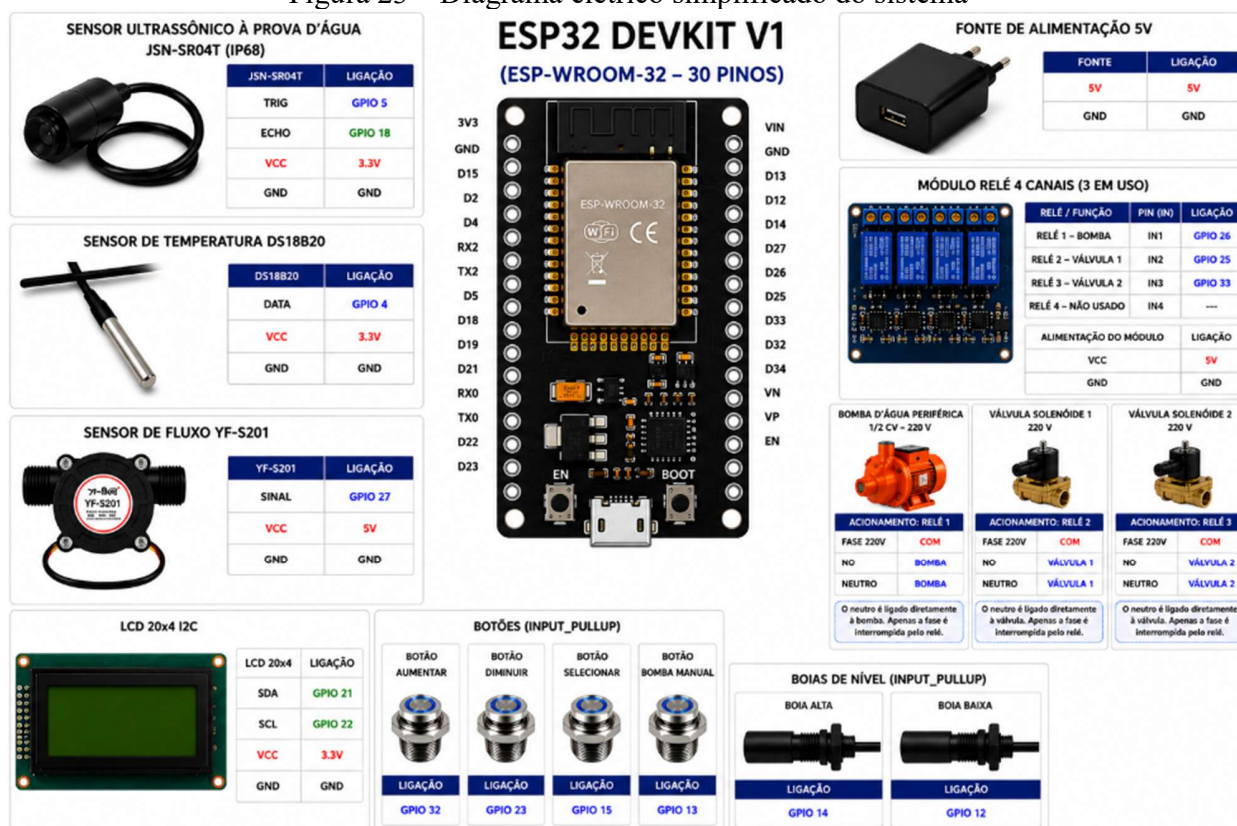
Figura 22 – Placa adaptadora ESP32, utilizada no sistema.



Fonte: Acervo pessoal.

O sistema foi alimentado por uma fonte de 5V, responsável por alimentar todos os componentes eletrônicos, ESP32, modulo de relés, *display* LCD, sensor de fluxo, de temperatura, e ultrassônico. A figura 23, apresenta o diagrama elétrico simplificado do sistema, contendo os principais componentes utilizados e suas respectivas conexões.

Figura 23 – Diagrama elétrico simplificado do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de ferramenta de inteligência artificial generativa.

3.7.1 Microcontrolador ESP32

O ESP32, foi desenvolvido pela *Espressif Systems*, conta com recursos de conectividade integrada, além de entrada USB, utilizada como alimentação e comunicação, a placa pode ser alimentada com tensão de 5 V, sendo internamente regulada para 3,3 V, a tensão de operação do microcontrolador. Portanto, os pinos do GPIO da placa trabalham com nível lógico de 3,3 V. Entre suas principais características técnicas destacam-se o processador Xtensa LX6 de duplo núcleo, conectividade *Wi-Fi* e *Bluetooth* integrada, interfaces digitais de comunicação e múltiplos pinos GPIO programáveis (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

O microcontrolador utilizado no sistema foi um ESP32 de 30 pinos, a escolha dessa placa como centro do sistema se justifica aos seus recursos de comunicação integrados, não sendo necessário a utilização de módulos externos de comunicação, assim reduzindo custos, complexidade de montagem e aumentando a robustez do sistema.

Em comparação com plataformas como o Arduino Uno, o ESP32 apresenta vantagens importantes para a aplicação proposta, principalmente por possuir comunicação *Wi-Fi* nativa e maior

capacidade de integração com sistemas IoT. Dessa forma, o ESP32 mostrou-se mais adequado para o sistema desenvolvido, pois permitiu integrar sensores, atuadores e supervisão remota em uma única plataforma de controle.

No sistema desenvolvido, foram utilizadas 15 portas GPIO para conexão dos componentes eletrônicos. Entre os dispositivos conectados ao ESP32 estão o sensor ultrassônico AJ-SR04T, o sensor de temperatura DS18B20, o sensor de fluxo YF-S201, os sensores de nível do tipo boia, o módulo de relés, o display LCD 20x4 e os botões de operação manual.

3.7.2 Módulo de Relés

O relé é um dispositivo eletromecânico utilizado para realizar o chaveamento de circuitos elétricos por meio de um sinal de comando. Seu funcionamento baseia-se no acionamento de uma bobina interna que, ao ser energizada, gera um campo magnético capaz de movimentar mecanicamente os contatos elétricos do dispositivo. Dessa forma, torna-se possível controlar cargas de maior potência utilizando sinais de baixa tensão provenientes de circuitos eletrônicos de controle, como os pinos GPIO do ESP32 (OMRON, 2021).

Cada canal do relé possui terminais identificados como comum (COM), normalmente aberto (NA) e normalmente fechado (NF). No contato normalmente aberto, o circuito permanece desligado enquanto a bobina não está energizada, sendo fechado apenas quando o relé recebe o sinal de acionamento. Já no contato normalmente fechado, ocorre o comportamento oposto: o circuito permanece fechado em repouso e é aberto quando a bobina é energizada (OMRON, 2021).

No sistema desenvolvido, foi utilizado um módulo relé de 4 canais, conforme apresentado na figura 24, onde foram utilizados apenas os contatos normalmente abertos dos relés, de modo que a bomba periférica e as válvulas solenoides permanecessem desligadas até que o ESP32 envie o sinal de comando correspondente ao módulo de relés.

Figura 24 – Módulo de relés utilizado para acionamento dos atuadores.



Fonte: Acervo pessoal

Foram utilizados três dos quatro canais do módulo. O canal 4 foi utilizado para acionamento da bomba periférica de 1/2 CV, canal 1 para acionamento da válvula solenoide de saída, utilizada para liberar a passagem da água em direção ao ponto de utilização e canal 3 para a válvula solenoide de ladrão, utilizada na drenagem automática do reservatório em condições específicas de operação.

3.7.3 Bomba periférica

Para realizar o transporte da água armazenada no reservatório mestre até o ponto de utilização, foi utilizada uma bomba periférica BP500 de 1/2 CV, apresentada na figura 25. A escolha desse tipo de bomba se justifica pela sua disponibilidade comercial, baixo custo, facilidade de instalação e capacidade de fornecer vazão suficiente para o abastecimento da planta didática.

Figura 25 – Bomba periférica BP500 utilizada para transporte de água no sistema.



Fonte: Acervo pessoal.

A bomba periférica utilizada no sistema possui potência de 1/2 CV, tensão de alimentação de 220 V, frequência de 60 Hz, vazão máxima de 33 L/min, altura manométrica máxima de 26 m e sucção máxima de 8 m, conforme especificações informadas na identificação do equipamento.

No sistema desenvolvido, a bomba foi instalada na saída inferior do reservatório mestre. Na tubulação de recalque da bomba foi instalado o sensor de fluxo YF-S201, permitindo o monitoramento da vazão da água bombeada durante a operação do sistema.

O acionamento da bomba foi realizado por meio do módulo de relés, permitindo que o ESP32 comandasse seu funcionamento de forma indireta. Dessa forma, a bomba permanece desligada em

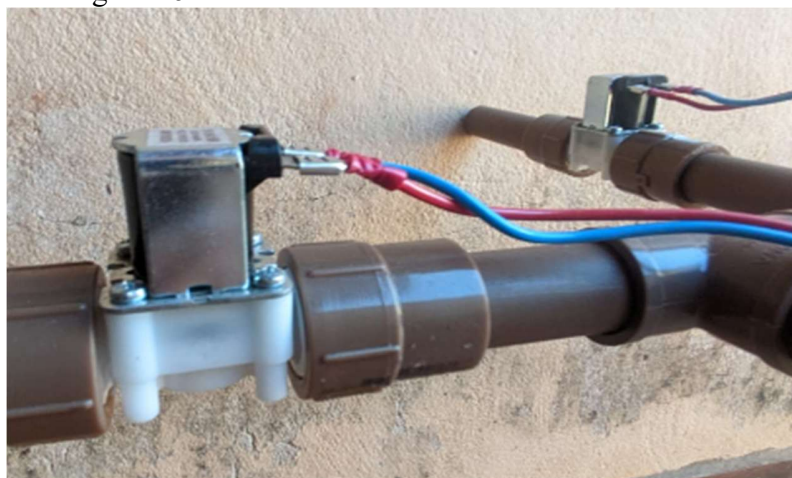
condição normal e é acionada apenas quando o sistema identifica a necessidade de transferência de água.

O sistema utiliza sensor de nível baixo como condição permissiva para o acionamento automático da bomba, como uma medida de proteção operacional. Dessa forma, o funcionamento da bomba só é permitido quando há uma quantidade mínima de água no reservatório, reduzindo o risco de funcionamento a seco e possíveis danos ao equipamento.

3.7.4 Válvulas solenoides

Para o direcionamento da água bombeada pelo sistema, foram utilizadas duas válvulas solenoides de 220 V do tipo normalmente fechadas, apresentadas na figura 26. Essas válvulas foram instaladas após a saída da bomba periférica. Esse tipo de válvula permanece bloqueado na ausência de alimentação elétrica, permitindo a passagem da água somente quando energizada.

Figura 26 – Válvulas solenoides utilizadas no sistema.



Fonte: Acervo pessoal.

A válvula solenoide é um dispositivo eletromecânico utilizado para controlar a passagem de fluidos em tubulações. Seu funcionamento ocorre por meio de uma bobina eletromagnética que, ao receber alimentação elétrica, gera um campo magnético responsável por movimentar o mecanismo interno da válvula, liberando a passagem do fluido. Quando a alimentação é interrompida, a válvula retorna à condição fechada, bloqueando novamente o fluxo de água (PARKER HANNIFIN CORPORATION, 2020).

No sistema desenvolvido, foi utilizada uma conexão em “T” na saída da bomba periférica, permitindo dividir o fluxo em dois caminhos. A válvula solenoide de saída foi utilizada para liberar

a passagem da água em direção ao ponto de utilização. Já a válvula solenoide de ladrão foi utilizada para liberar a passagem da água em direção ao ralo em condições específicas de operação, como no caso de nível elevado.

O acionamento das válvulas foi realizado por meio do módulo de relés, permitindo que o ESP32 comandasse sua abertura de forma indireta. Dessa forma, as válvulas permanecem fechadas em condição normal e são abertas apenas quando o sistema envia o comando correspondente.

3.7.5 Interface local

Para permitir o acompanhamento e a operação local do sistema, foi utilizado um *display* LCD 20x4 com módulo I²C e botões físicos instalados em uma placa de MDF, apresentado na Figura 27. Essa interface foi implementada para possibilitar ao operador visualizar informações do sistema e realizar comandos manuais sem depender exclusivamente da plataforma supervisória remota.

Figura 27 – Interface local composta por display LCD 20x4 e botões de operação.



Fonte: Acervo pessoal.

O *display* LCD 20x4 foi utilizado para apresentar as principais informações operacionais do sistema, como nível de água, temperatura, estado das boias e mensagens de alerta. A utilização do módulo PC permitiu reduzir a quantidade de pinos necessários para conexão com o ESP32, uma vez que a comunicação com o *display* ocorre por meio de duas linhas principais, SDA e SCL (NXP SEMICONDUCTORS, 2021).

Os botões físicos foram utilizados para permitir a interação direta do operador com o sistema. No projeto, foram empregados 4 botões, sendo dois para incremento e decremento, um para seleção e um para acionamento manual da bomba, possibilitando comandos locais durante a operação. Além disso, foi implementada uma função de reset de falha acionada pelo pressionamento simultâneo dos botões de incremento e decremento, utilizada para restabelecer o funcionamento do sistema em situações de falha na detecção de fluxo.

A instalação do display e dos botões na caixa de controle facilitou o acesso do operador às informações do sistema e contribuiu para maior praticidade durante testes, manutenção e operação. Dessa forma, a interface local atuou como uma alternativa de supervisão e comando presencial, complementando a supervisão remota realizada pela plataforma Blynk IoT.

3.8 SOFTWARE EMBARCADO

O *software* embarcado foi criado utilizando a linguagem de programação C++ por meio do Arduino IDE integrando em uma única lógica de operação a leitura dos sensores, o acionamento dos atuadores e a sincronização das interfaces de comunicação com o operador.

Para a medição do nível foi utilizado o sensor ultrassônico AJ-SR04T, Apresentado na seção 3.6.1, que faz a leitura da distância entre o sensor e a superfície da água do reservatório. Para garantir leituras reais e estáveis, foi desenvolvido um filtro, no qual descarta leituras fora da faixa física de operação do reservatório. Em seguida foi realizado quinze leituras consecutivas, sendo adotado o valor mediano como referência para o cálculo do nível.

A distância obtida é convertida em nível percentual por meio da Equação 4.

$$Nivel = \frac{Dvazio - Dmedida}{Dvazio - Dcheio} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

Dvazio = distância de referência entre o sensor ultrassônico e o fundo do reservatório;

Dcheio = distância correspondente ao nível máximo de operação;

Dmedida = distância média medida pelo sensor ultrassônico até a superfície da água.

A dosagem automática foi desenvolvida a partir do sensor de fluxo YF-S201, que emite pulsos quando há passagem de água. Esses pulsos são contabilizados por interrupção de hardware e convertidos em volume pelo software. Durante o bombeamento, o volume dosado é calculado pela diferença entre a contagem atual de pulsos e a contagem registrada no início da dosagem, dividida pelo fator de calibração obtido pelo procedimento descrito na seção 3.6.4. Essa relação é apresentada na Equação 5.

$$V_{dosado} = \frac{P_{atual} - P_{inicial}}{K} \quad (5)$$

Em que:

Vdosado = volume dosado pelo sistema (L);

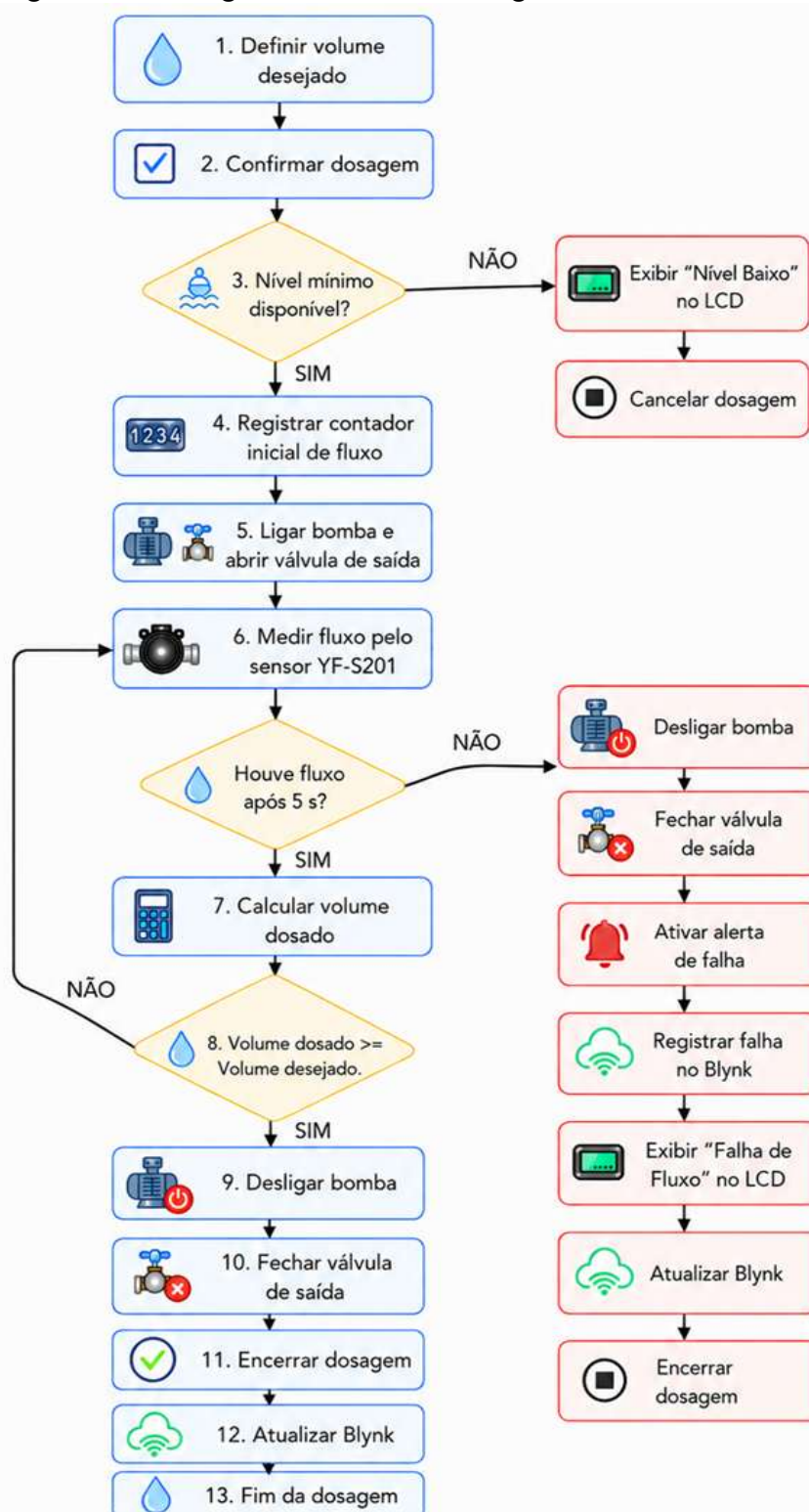
Patual = contagem atual de pulsos do sensor de fluxo;

Pinicial = contagem de pulsos registrada no início da dosagem;

K = fator de calibração do sensor de fluxo, em pulsos por litro (pulsos/L);

A figura 28, apresenta a rotina de dosagem, o operador define o volume desejado, via interface local ou remota. Antes de iniciar o processo de dosagem é verificado o estado da boia de nível baixo, caso não exista nível mínimo no reservatório, a operação é bloqueada e uma mensagem de aviso é exibida no LCD. Se essa condição for atendida, é iniciado o contador de pulsos, acionado a bomba e a válvula de saída. O processo finaliza quando o volume bombeado atinge o volume definido pelo operador.

Figura 28 – Fluxograma da rotina de dosagem automática

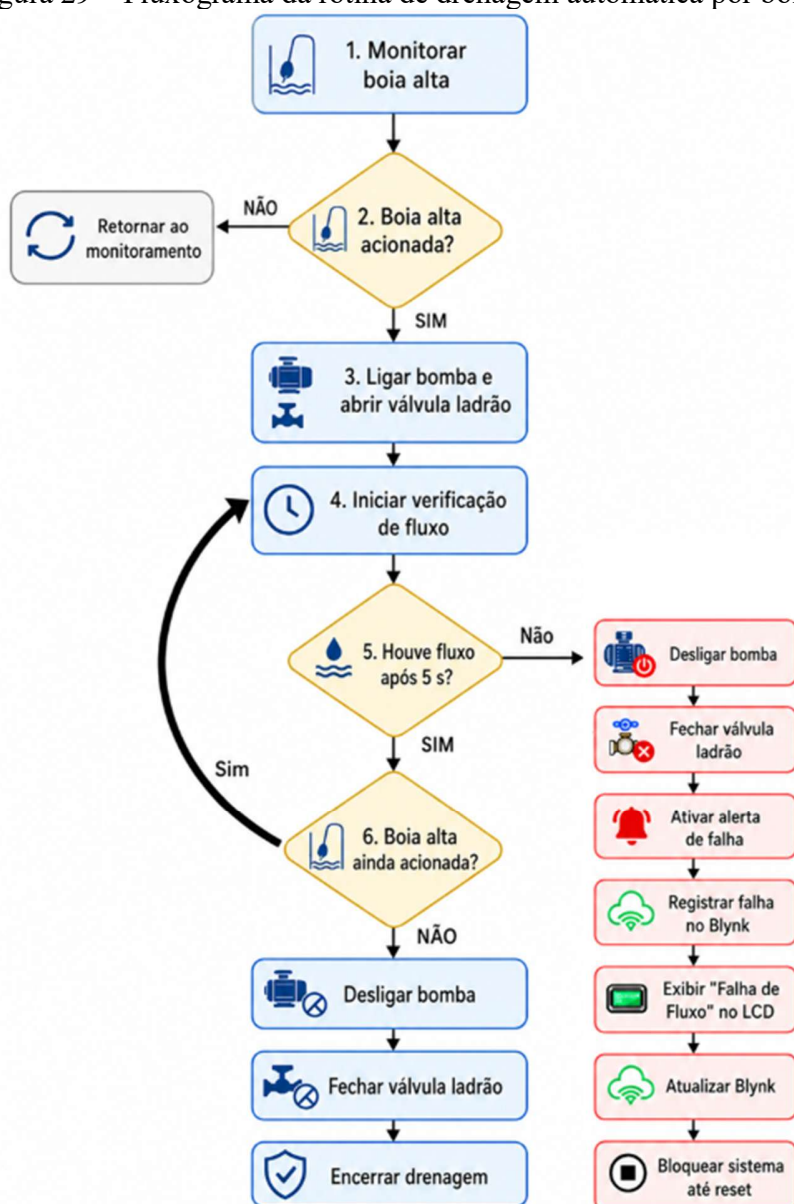


Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de ferramenta de inteligência artificial generativa.

Para proteção do sistema desenvolvida uma rotina de verificação de fluxo, ativada sempre após o acionamento da bomba. Durante 5 segundos se o sensor de fluxo não emitir nenhum pulso, a bomba e as válvulas são desativadas, e o sistema entra em bloqueio, paralelamente é exibido uma mensagem de falha no LCD e registrado um evento de falha na plataforma Blynk IoT, o sistema só é desbloqueado quando o operador executa o reset.

Para evitar transbordamentos, e garantir o funcionamento adequado do sensor ultrassônico foi criado uma rotina de drenagem automática do sistema, apresentada na figura 29. Essa rotina é acionada quando a água chega na boia de nível alto, ligando a bomba periférica em conjunto com a válvula solenoide de ladrão, direcionando a água excedente para o descarte controlado. O processo é encerrado automaticamente quando a boia de nível alto retorna para o estado desacionada, indicando que o nível voltou a faixa de operação.

Figura 29 – Fluxograma da rotina de drenagem automática por boia alta.



Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de ferramenta de inteligência artificial generativa.

O sistema foi desenvolvido para atender tanto localmente quanto de forma remota, para isso conta com duas interfaces, uma composta por botões e display LCD descrita no tópico 3.7.5 e uma interface remota desenvolvida na plataforma Blynk IoT, ambas foram desenvolvidas, para atuar de forma sincronizada, comandos realizados pela interface local é refletido em tempo real na plataforma remota e vice-versa, garantindo coerência entre a operação local e remota.

3.9 SISTEMA SUPERVISÓRIO BLYNK IOT

O Blynk IoT é uma plataforma voltada ao desenvolvimento de aplicações de Internet das Coisas, permitindo conectar dispositivos eletrônicos à nuvem, criar interfaces de monitoramento e realizar o controle remoto de sistemas embarcados por meio de aplicações web e mobile. A plataforma possibilita a visualização de variáveis em tempo real, o envio de comandos ao dispositivo e o registro de eventos operacionais, sendo adequada para aplicações de automação, monitoramento e supervisão remota (BLYNK, 2024).

Para a conexão remota do sistema foi utilizado a plataforma Blynk IoT, integrada ao microcontrolador ESP32 por meio da rede *Wi-Fi*. A integração dessa plataforma ao sistema, permitiu que o operador acompanhasse e controlasse de forma remota todo o sistema, por meio da plataforma web ou mobile.

Dentro da plataforma Blynk IoT, foi desenvolvido um painel supervisório, apresentado na figura 30, responsável por exibir informações como nível percentual do reservatório, temperatura da água, estado das boias de nível, volume desejado, volume bombeado e condição de falha de fluxo. Também foram implementados comandos remotos para acionamento individual dos atuadores, seleção de dosagem e reset de falhas.

Figura 30 – Interface supervisória mobile desenvolvida na plataforma Blynk IoT.



Fonte: Acervo pessoal.

A comunicação entre o ESP32 e a plataforma Blynk foi realizada por meio de pinos virtuais. Segundo a documentação da plataforma, os pinos virtuais permitem a troca de dados entre o hardware e a interface Blynk, possibilitando o envio de informações do dispositivo para a aplicação e o recebimento de comandos enviados pelo operador (BLYNK, 2024). A tabela 2 apresenta o mapeamento dos pinos virtuais utilizados, indicando a função de cada um no sistema.

Tabela 2 – Pinos virtuais utilizados na plataforma Blynk IoT.

Pino virtual	Função no sistema
V0	Nível percentual do reservatório
V1	Temperatura da água
V2	Volume desejado
V3	Acionamento manual da bomba
V4	Acionamento da válvula de saída
V5	Acionamento da válvula ladrão
V6	Estado da boia de nível alto
V7	Estado da boia de nível baixo
V8	Confirmação da dosagem
V9	Volume bombeado
V10	Alerta de falha de fluxo
V11	Reset de falha

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi implementada a sinalização remota de falhas operacionais. Quando o *software* identifica ausência de fluxo após o acionamento da bomba em processos automáticos, o sistema desliga a bomba e as válvulas, registra o evento de falha na plataforma Blynk IoT e bloqueia novos acionamentos até que o operador realize o *reset*.

Para organização do envio de dados à plataforma Blynk IoT, foram definidos limiares de atualização para algumas variáveis monitoradas. O nível percentual é enviado quando ocorre variação igual ou superior a 2%; a temperatura, quando a variação é igual ou superior a 0,3 °C; e o volume bombeado é atualizado a cada 5 segundos enquanto a bomba permanece em funcionamento.

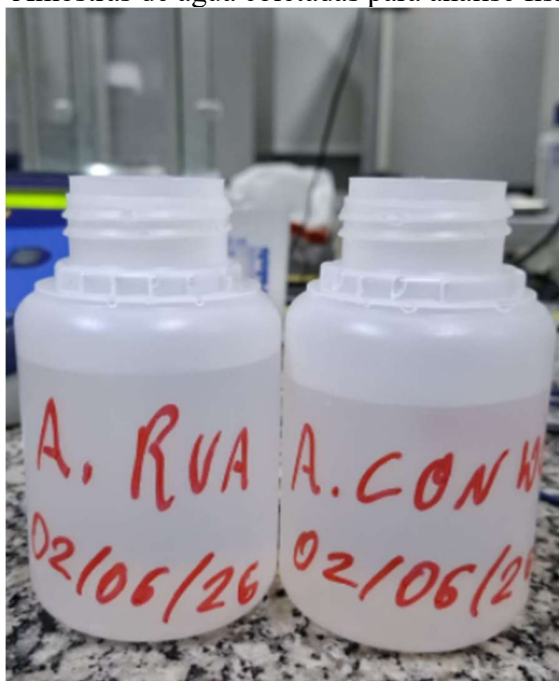
3.10 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DAS AMOSTRAS

Com objetivo de comparar as características das águas, fez-se necessária a realização de análises físico-químicas para avaliação dos parâmetros de pH, condutividade elétrica, cloro e sílica. As análises foram realizadas em duas amostras: uma coletada da água condensada proveniente dos condicionadores de ar e outra coletada da rede pública, utilizada para abastecimento da planta didática industrial.

Ambas as amostras foram coletadas no dia 02 de junho de 2026, às 17h30min, em recipientes esterilizados com capacidade de 250 mL (figura 31). A amostra da água da rede pública foi coletada diretamente da torneira utilizada para abastecimento da planta didática industrial. Já a amostra da água condensada foi coletada a partir da água armazenada nos reservatórios do sistema desenvolvido.

Após a coleta, os recipientes foram identificados conforme a origem da amostra e encaminhados para análise às 18h30min. As avaliações foram realizadas no laboratório de utilidades da CANPACK, utilizando os equipamentos e procedimentos disponíveis para medição dos parâmetros selecionados.

Figura 31 – Amostras de água coletadas para análise físico-química.



Fonte: Acervo pessoal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados obtidos a partir da implementação do sistema automatizado de captação, armazenamento, monitoramento e controle da água condensada proveniente de condicionadores de ar. Os resultados são discutidos considerando a produção de água condensada, o dimensionamento dos reservatórios, a dosagem automática, as proteções operacionais, a supervisão local e remota e a análise físico-química comparativa entre a água da rede pública e a água condensada.

A partir dos dados obtidos, buscou-se verificar se o sistema desenvolvido atende aos objetivos propostos, principalmente quanto ao reaproveitamento da água condensada, ao controle do volume bombeado, à segurança operacional e à possibilidade de utilização da água captada na planta didática industrial DLB CP003-UA.

4.1 PRODUÇÃO DE ÁGUA CONDENSADA

A partir do procedimento experimental realizado na Seção 3.2, foram obtidos os volumes de água condensada produzidos pelos conjuntos de condicionador de ar das Sala 02 e 03. Os resultados obtidos permitiram calcular a vazão média de cada sala e a vazão total disponível para reaproveitamento no sistema desenvolvido.

Os valores de volume coletado, condições ambientais e vazão calculada para as duas salas são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Vazão de água condensada obtida nas Salas 02 e 03.

Vazão de água condensada S02								
Medição	Data	Hora	Temperatura externa	Umidade do ar	Sala	Tempo (min)	Volume (L)	Vazão (L/h)
1	22/04/2026	14:00:00	27°C	46%	Sala 02	30	1,2	2,4
2	22/04/2026	14:30:00	27°C	46%	Sala 02	30	1,1	2,2
3	22/04/2026	15:00:00	27°C	46%	Sala 02	30	1,15	2,3
4	23/04/2026	08:00:00	23°C	65%	Sala 02	30	1,18	2,36
5	23/04/2026	08:30:00	24°C	65%	Sala 02	30	1,12	2,24
6	23/04/2026	09:00:00	25°C	65%	Sala 02	30	1,16	2,32
Vazão de água condensada S03								
Medição	Data	Hora	Temperatura externa	Umidade do ar	Sala	Tempo (min)	Volume (L)	Vazão (L/h)
7	22/04/2026	14:00:00	27°C	46%	Sala 03	30	1,3	2,6
8	22/04/2026	14:30:00	27°C	46%	Sala 03	30	1,25	2,5
9	22/04/2026	15:00:00	27°C	46%	Sala 03	30	1,28	2,56
10	23/04/2026	08:00:00	23°C	65%	Sala 03	30	1,22	2,44
11	23/04/2026	08:30:00	24°C	65%	Sala 03	30	1,27	2,54
12	23/04/2026	09:00:00	25°C	65%	Sala 03	30	1,24	2,48
Média S02			Média S03		Produção total (L/h)			
2,3			2,52		4,82			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados apresentados na tabela 3, a sala 02 apresentou vazão média de aproximadamente 2,30 L/h, enquanto a Sala 03 apresentou vazão média de aproximadamente 2,52 L/h. Considerando a contribuição conjunta das duas salas, a vazão total disponível para o sistema foi de aproximadamente 4,82 L/h.

Em função da vazão média total, foi realizado uma estimativa da produção diária, semanal e mensal de água condensada, considerando uma rotina de funcionamento de 12 horas por dia, devido a operação da instituição nos turnos matutino, vespertino e noturno, além de 5 dias de funcionamento por semana e 22 dias úteis por mês. Os valores estimados são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Estimativa de produção de água condensada a partir da vazão média total.

Período	Volume estimado (L)
Dia - 12h de operação	57,84
Semana - 5 dias	289,2
Mês - 22 dias úteis	1272,48

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na tabela 4, considerando uma rotina típica de funcionamento das salas durante os dias letivos, o sistema pode captar mais de 1200 litros de água por mês. Esse volume demonstra potencial significativo de reaproveitamento e pode contribuir com a manutenção periódica de troca da água utilizada na planta didática industrial DLB CP003-UA. Considerando que a planta possui reservatório de aproximadamente 140 L, conforme especificação do fabricante (DE LORENZO DO BRASIL, 2024), e que a troca da água da planta é indicada como prática mensal de manutenção por Nascimento (2025), o volume estimado de água condensada seria suficiente para atender à demanda do sistema, com margem superior.

4.2 DIMENSIONAMENTO E CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO

Com base na disposição dos sensores de nível instalados no reservatório mestre, foi definida a faixa útil de operação do sistema. A boia de nível alto foi instalada a 64 cm do fundo do reservatório, enquanto a boia de nível baixo foi instalada a 17,5 cm do fundo. Dessa forma, a faixa útil de armazenamento corresponde à diferença entre essas duas alturas, conforme apresentado na equação 6.

$$\text{Faixa útil} = \text{Nível alto} - \text{Nível baixo} = 46,5 \text{ cm} \quad (6)$$

Essa faixa representa a região de operação considerada segura para o sistema, permitindo manter uma quantidade mínima de água no reservatório e, ao mesmo tempo, limitar o nível máximo antes da rotina de drenagem automática.

Os reservatórios utilizados apresentam geometria predominantemente cilíndrica na região central, porém possuem redução gradual do diâmetro em suas extremidades. Dessa forma, o cálculo do volume útil foi realizado como uma estimativa aproximada, considerando a região útil de operação como um cilindro de diâmetro médio igual a 57,5 cm. Para estimar o volume útil disponível, foi considerado o diâmetro médio de 57,5 cm, resultando em raio de 28,75 cm. O cálculo do volume foi realizado conforme a equação 7.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (7)$$

Em que:

V = volume estimado do reservatório, em cm³;

r = raio médio do reservatório, em cm;

h = altura útil considerada, em cm.

Substituindo os valores medidos, na equação 7 temos o volume de 120600 cm³, como 1000 cm³ corresponde a 1L, o volume útil estimado foi de aproximadamente 120,6 L por reservatório. Considerando os dois reservatórios o sistema apresenta volume útil total de aproximadamente 241 L.

O volume útil total estimado dos reservatórios foi de aproximadamente 241 L. Esse valor é superior ao volume útil da planta didática industrial DLB CP003-UA, de cerca de 140 L, conforme especificação técnica do equipamento (DE LORENZO DO BRASIL, 2024). Essa comparação indica que o armazenamento dimensionado atende à demanda de renovação periódica da água da planta.

4.3 DOSAGEM AUTOMÁTICA E CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE FLUXO

A dosagem automática foi avaliada a partir do funcionamento conjunto da bomba periférica, válvula solenoide de saída e sensor de fluxo YF-S201. Conforme descrito na Seção 3.6.4, o sensor de fluxo foi calibrado experimentalmente por meio da comparação entre o volume indicado pelo sistema e o volume real coletado em recipiente graduado.

Inicialmente, foi adotado no *software* o fator de conversão indicado na documentação técnica do sensor. Entretanto, durante os testes práticos, observou-se diferença entre o volume calculado pelo sistema e o volume efetivamente coletado. Por esse motivo, o fator de calibração foi ajustado proporcionalmente ao erro observado em cada ensaio.

Também foi observado o retorno da água na tubulação após o desligamento da bomba, provocado pelo escoamento por gravidade. Para minimizar esse efeito, foi instalada uma válvula de retenção com crivo na linha de sucção da bomba, mantendo a tubulação preenchida e contribuindo para maior estabilidade durante a operação.

Após os experimentos realizados, foi adotado o fator de calibração de 480 pulsos por litro, utilizado para converter os pulsos gerados pelo sensor YF-S201 em volume bombeado. Esse valor permitiu maior aproximação entre o volume definido pelo operador e o volume real transferido pelo sistema.

Com a aplicação do fator de calibração, a rotina de dosagem automática passou a operar de forma mais adequada. O operador define o volume desejado na interface local ou remota, e o *software* realiza o acionamento da bomba e da válvula de saída até que o volume calculado atinja o valor programado. A Figura 32 apresenta o trecho da rotina de dosagem automática responsável pelo encerramento da dosagem quando o volume programado é atingido.

Figura 32 – Trecho da rotina de dosagem automática.

```

243  /* DOSAGEM */
244  void processarDosagem(){
245      if(alertaAtivo) return;
246      if(!dosando) return;
247
248      bombaAutomatica = true;
249
250      // Inicia a janela de verificação de fluxo apenas uma vez
251      if(inicioVerificacaoFluxo == 0){
252          inicioVerificacaoFluxo = millis();
253          ultimoContadorFluxoAuto = contadorFluxo;
254      }
255
256      float entregue = (contadorFluxo - inicioDoseFluxo) / pulsosPorLitro;
257
258      if(entregue >= [valorDesejado - 0.0]){
259          digitalWrite(RELE_BOMBA, HIGH);
260          digitalWrite(RELE_VALVULA1, HIGH);
261
262          estadoBomba = false;
263          dosando = false;
264          bombaAutomatica = false;
265          inicioVerificacaoFluxo = 0;
266
267          Blynk.virtualWrite(V_BOMBA_MANUAL, false);
268          Blynk.virtualWrite(V_VALVULA1, false);
269      }
270  }
271

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, a calibração do sensor de fluxo e os ajustes realizados no sistema hidráulico contribuíram para aumentar a precisão da dosagem, permitindo que o sistema fosse utilizado para o abastecimento de água da planta didática industrial.

4.4 PROTEÇÕES OPERACIONAIS E SUPERVISÃO REMOTA

As proteções operacionais implementadas no sistema foram avaliadas a partir das condições de nível mínimo, alto e falha de fluxo. Essas rotinas foram desenvolvidas com o objetivo de reduzir riscos de funcionamento inadequado da bomba, evitar transbordamentos e sinalizar falhas ao operador.

A boia de nível baixo atuou como condição permissiva para a dosagem. Quando não havia nível mínimo disponível no reservatório, o sistema bloqueava o início da operação e exibia uma mensagem de aviso no display LCD. Essa condição evita que a bomba seja acionada durante a dosagem sem quantidade suficiente de água no reservatório. A Figura 33 apresenta a mensagem de nível baixo exibida na interface local do sistema.

Figura 33 – Mensagem de nível baixo exibida na interface local.



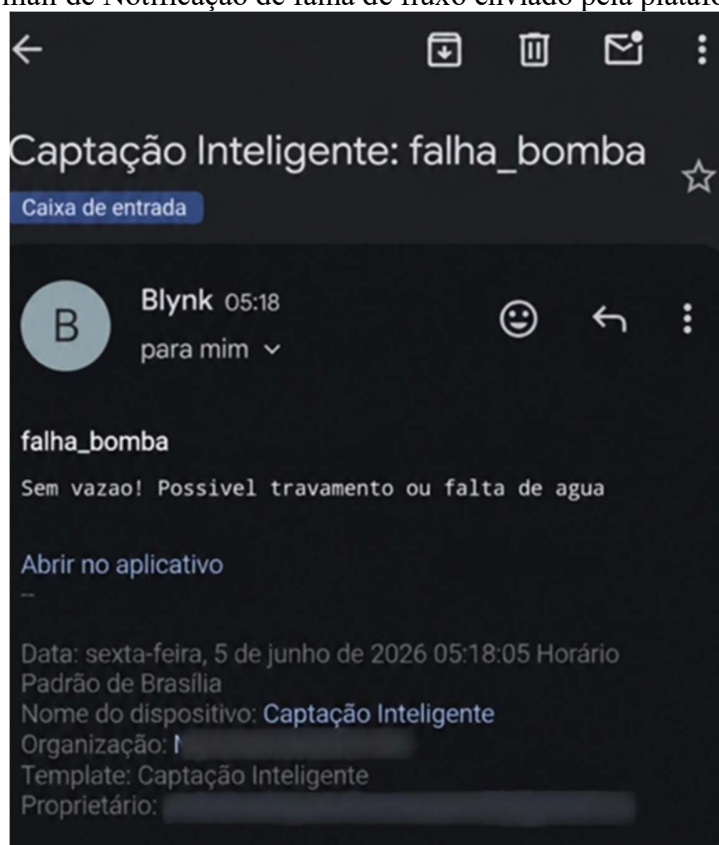
Fonte: Acervo pessoal.

A boia de nível alto foi utilizada para acionar a rotina de drenagem automática. Quando a água atingia esse sensor, o sistema acionava a bomba periférica e abria a válvula solenoide de ladrão,

direcionando o excesso de água para descarte controlado. O processo era encerrado quando a boia de nível alto retornava ao estado desacionada.

Também foi verificado a proteção por falha de fluxo. Durante processos automáticos, caso a bomba fosse acionada e o sensor de fluxo YF-S201 não identificasse pulsos dentro do tempo definido de 5 segundos, o sistema desligava a bomba e as válvulas, exibia a falha no display LCD e registrava o evento na plataforma Blynk IoT (figura 34). Nessa condição, o sistema permanecia bloqueado até que o operador realizasse o reset.

Figura 34 – E-mail de Notificação de falha de fluxo enviado pela plataforma Blynk IoT.



Fonte: Acervo pessoal.

Durante os testes iniciais do sistema, observou-se que o envio contínuo de dados à plataforma Blynk IoT gerava um número elevado de mensagens. Na versão inicial do *software* desenvolvido, o limite de mensagens disponível no plano utilizado na plataforma foi esgotado em apenas um dia de operação, impedindo a continuidade do monitoramento remoto pela plataforma. Após essa ocorrência, foram configurados limiares de atualização, conforme descrito na seção 3.9, fazendo com

que os dados fossem enviados apenas em condições específicas, como variação mínima do nível, variação da temperatura e atualização periódica do volume bombeado (figura 35).

Figura 35 – Trecho do software embarcado utilizado para controle do envio de dados à plataforma Blynk IoT.

```

216 /* ===== FUNÇÕES BLYNK ===== */
217 void atualizarSensoresBoia() {
218     bool boiaAlta = !digitalRead(BOIA_ALTA);
219     bool boiaBaixa = !digitalRead(BOIA_BAIXA);
220     if(boiaAlta!=boiaAltaAnterior){ Blynk.virtualWrite(V_BOIA_ALTA, boiaAlta); boiaAltaAnterior=boiaAlta; }
221     if(boiaBaixa!=boiaBaixaAnterior){ Blynk.virtualWrite(V_BOIA_BAIXA, boiaBaixa); boiaBaixaAnterior=boiaBaixa; }
222 }
223
224 void atualizarNivelBlynk() {
225     int percentual = percentualTanque(nivelTanqueAtual);
226     if(abs(percentual-ultimoNivelTanque)>=2){ Blynk.virtualWrite(V_NIVEL,percentual); ultimoNivelTanque=percentual; }
227 }
228
229 void atualizarTemperaturaBlynk() {
230     if(abs(temperaturaAtual-ultimaTemperatura)>=0.3){ Blynk.virtualWrite(V_TEMPERATURA,temperaturaAtual); ultimaTemperatura=temperaturaAtual; }
231 }
232
233 void atualizarFluxoBlynk() {
234     static unsigned long ultimaEnvio=0;
235     if(!estadoBomba) return;
236     if(millis()-ultimaEnvio>=5000){
237         float litrosTotais=contadorFluxo/pulsosPorLitro;
238         Blynk.virtualWrite(V_FLUXO,litrosTotais);
239         ultimaEnvio=millis();
240     }
241 }

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa estratégia reduziu o tráfego de dados e permitiu manter a supervisão remota de forma mais adequada às limitações da plataforma.

Outra limitação observada está relacionada ao acesso ao painel supervisão. No plano gratuito utilizado, o acompanhamento remoto ficou vinculado à conta configurada no projeto, ficando disponível apenas nos dispositivos do usuário responsável, como celular ou computador. Segundo a página oficial da plataforma, os recursos disponíveis variam conforme o plano contratado, sendo necessário avaliar planos superiores para uso com maior quantidade de usuários ou aplicação institucional (BLYNK, 2024).

4.5 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA COMPARATIVA DA ÁGUA

As análises físico-químicas foram realizadas com o objetivo de comparar a água da rede pública, utilizada para abastecimento da planta didática industrial, com a água condensada captada e armazenada pelo sistema desenvolvido. Foram avaliados os parâmetros de pH, condutividade elétrica, cloro e sílica, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação físico-química entre água da rede pública e água condensada.

Parâmetro	Água da rede	Água condensada	Unidade
pH	7,39	7,13	—
Condutividade elétrica	84	39,2	μS/cm
Cloro	0,54	0,00	ppm
Sílica	8,42	0,04	mg/L

Fonte: Elaborado pelo autor.

A ausência da determinação da dureza total da água limita uma avaliação mais completa da tendência à precipitação de carbonato de cálcio em sistemas submetidos ao aquecimento. A dureza, associada às concentrações de íons cálcio e magnésio, é um dos principais parâmetros utilizados para prever a formação de incrustações de carbonato de cálcio (CaCO_3) em sistemas hidráulicos e térmicos (ANSHAR et al., 2023). Entretanto, esse parâmetro não foi determinado nas análises realizadas neste trabalho.

Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que as duas amostras apresentaram pH próximo da neutralidade, sendo 7,39 para a água da rede pública e 7,13 para a água condensada, compatível com a faixa esperada para utilização em equipamentos industriais (BALANGAO, 2024).

Em relação à condutividade elétrica, a água condensada apresentou valor de 39,2 μS/cm, enquanto a água da rede apresentou 84,0 μS/cm (Tabela 5). Esse resultado indica menor presença de íons dissolvidos na água condensada, quando comparada à água da rede pública (SOUSA *et al.* 2016). A condutividade está relacionada com a presença de íons, e consequentemente de sais dissolvidos em água, valores elevados de condutividade contribuem para o processo de corrosão (LIMA, 2023).

Quanto ao cloro residual (Tabela 5), a água da rede apresentou concentração de 0,54 ppm, enquanto a água condensada apresentou valor igual a 0,00 ppm. Essa diferença está relacionada ao fato de a água da rede pública passar por processos de tratamento e desinfecção, enquanto a água condensada é formada a partir da condensação da umidade do ar nos condicionadores (SOUSA *et al.*, 2016).

A maior diferença observada ocorreu no parâmetro sílica. A água da rede apresentou concentração de 8,42 mg/L, enquanto a água condensada apresentou apenas 0,04 mg/L. Esse resultado reforça a diferença entre as amostras e indica menor presença desse composto na água condensada. A sílica contribui para a formação incrustações em estruturas metálicas, principalmente, quando submetidas a temperaturas elevadas (LIMA, 2023).

De modo geral, os resultados obtidos (Tabela 5) indicam que a água condensada apresentou menores valores de condutividade elétrica, cloro residual e sílica em comparação com a água da rede

pública, devido ao seu processo de formação (SOUSA et al., 2016). Esses resultados sugerem menor potencial de formação de incrustações quando comparada à água da rede. Entretanto, não permitem afirmar a ausência de corrosão, uma vez que parâmetros importantes, como dureza total, alcalinidade, oxigênio dissolvido, dióxido de carbono livre (CO_2) e concentração de cloretos, não foram avaliados neste estudo. Cabe destacar que águas de baixa mineralização, como a água condensada, podem apresentar maior agressividade em relação a determinados metais, especialmente em sistemas abertos, dependendo do material em contato, da concentração de oxigênio dissolvido e da alcalinidade do meio (FRAUCHES-SANTOS et al., 2014). Dessa forma, recomenda-se que a utilização da água condensada seja acompanhada do monitoramento periódico da qualidade da água armazenada e da integridade dos componentes metálicos da planta didática.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema automatizado para captação, armazenamento, monitoramento e controle da água condensada proveniente de condicionadores de ar, visando sua utilização na renovação periódica da água da planta didática industrial DLB CP003-UA. A proposta partiu da necessidade de reaproveitar um recurso normalmente descartado e, ao mesmo tempo, reduzir o uso contínuo de água tratada no sistema hidráulico da planta.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a água condensada gerada pelos condicionadores de ar das salas analisadas apresenta potencial significativo de reaproveitamento. A vazão média total obtida foi de aproximadamente 4,82 L/h, resultando em uma estimativa de produção mensal de 1272,48 L, considerando uma rotina de funcionamento de 12 horas por dia durante 22 dias úteis. Esse volume se mostrou relevante para renovação periódica da água utilizada na planta didática.

O sistema físico desenvolvido permitiu a captação da água condensada dos condicionadores de ar e seu armazenamento em dois reservatórios interligados. O volume útil total estimado dos reservatórios foi de aproximadamente 241 L, valor superior ao volume útil da planta didática, de cerca de 140 L. Com isso, a estrutura adotada apresentou capacidade suficiente para o armazenamento e posterior utilização da água captada.

Além da captação e armazenamento da água condensada, o sistema também contou com medidas de proteção física para operação em ambiente externo. A utilização de tampas inclinadas em aço galvanizado nos reservatórios contribuiu para proteger os sensores instalados na parte superior e evitar o acúmulo de água da chuva. Da mesma forma, a instalação dos componentes eletrônicos em caixa hermética reduziu a exposição à umidade, poeira e respingos, favorecendo maior organização, proteção e facilidade de manutenção do sistema.

A utilização dos sensores permitiu o monitoramento das principais variáveis do sistema, como nível, temperatura e vazão. O sensor ultrassônico possibilitou a leitura contínua do nível do reservatório, enquanto as boias foram utilizadas como referências de segurança para nível mínimo e nível alto. O sensor de fluxo YF-S201 possibilitou o controle do volume bombeado, sendo necessária sua calibração experimental para adequação ao sistema desenvolvido.

A dosagem automática também foi implementada de forma satisfatória. A calibração do sensor de fluxo resultou no fator de 480 pulsos por litro. Dessa forma, o sistema passou a permitir que o operador definisse o volume desejado e realizasse a dosagem da água condensada de maneira controlada.

As proteções operacionais implementadas contribuíram para maior segurança do sistema. A boia de nível baixo impediu o início da dosagem quando não havia água mínima no reservatório, a boia de nível alto acionou a rotina de drenagem automática e a verificação de falha de fluxo permitiu o desligamento da bomba e das válvulas em caso de ausência de passagem de água. Além disso, o sistema permaneceu bloqueado até a realização do *reset* pelo operador.

A supervisão remota por meio da plataforma Blynk IoT permitiu o acompanhamento das variáveis do sistema e o envio de comandos ao ESP32 por meio de interface *web* e *mobile*. Durante os testes, também foram identificadas limitações relacionadas ao plano utilizado, como o limite de mensagens e o acesso vinculado à conta configurada no projeto. Mesmo assim, a estratégia de envio de dados por variação mínima permitiu adequar o funcionamento do sistema às limitações da plataforma.

A análise físico-química comparativa mostrou diferenças importantes entre a água da rede pública e a água condensada. A água condensada apresentou menores valores de condutividade elétrica, cloro residual e sílica, quando comparada à água da rede. Esses resultados indicam que a água condensada apresentou menor potencial de formação de incrustações em comparação à água da rede pública, principalmente em razão da menor quantidade de compostos dissolvidos associados a esse processo. Contudo, os resultados obtidos não permitem afirmar a ausência de corrosão ou de incrustação, uma vez que parâmetros relevantes para essa avaliação, como dureza, alcalinidade, oxigênio dissolvido e CO₂ livre, não foram determinados. Recomenda-se, portanto, o monitoramento periódico da qualidade da água armazenada e da integridade dos componentes metálicos da planta didática ao longo do tempo de operação do sistema.

Como limitações do trabalho, destaca-se que a produção de água condensada depende diretamente das condições ambientais, como temperatura, umidade relativa do ar, tempo de funcionamento dos aparelhos e frequência de uso das salas. Além disso, a análise físico-química realizada contemplou apenas alguns parâmetros, não incluindo avaliação microbiológica ou acompanhamento prolongado da qualidade da água armazenada.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de análises laboratoriais mais completas da água condensada, incluindo parâmetros microbiológicos, além da avaliação do comportamento do sistema durante períodos mais longos de operação. Também podem ser realizadas melhorias na proteção elétrica, aprimoramento da calibração do sensor de fluxo, aplicação do sistema em outros ambientes do campus e estudo de integração com outras plataformas supervisórias.

Conclui-se, portanto, que o sistema desenvolvido atendeu aos objetivos propostos, demonstrando viabilidade técnica para captação, armazenamento, monitoramento e controle da água condensada proveniente de condicionadores de ar. Além de contribuir para o reaproveitamento hídrico e redução do descarte inadequado, o projeto permitiu a aplicação prática de conceitos de automação industrial, instrumentação eletrônica, controle de processos e Internet das Coisas em ambiente acadêmico.

Apesar dos resultados promissores, sugere-se que sejam realizados mais testes de controle de qualidade das águas condensadas como, presença de metais, dureza, ferro, manganês e alumínio, para verificar a viabilidade de aplicação em grandes escalas, bem como mais estudos voltados para sistemas gratuitos de verificação de dados e armazenamento de informações a longo prazo.

REFERÊNCIAS

ALI, Nur Husnina Mohamad; GHAZALI, Rozaimi; JAAFAR, Hazriq Izzuan; GHANI, Muhammad Fadli; SOON, Chong Chee; HAS, Zulfatman. Comparison Study between Open-Loop and Closed-Loop Identification for Industrial Hydraulics Actuator System. **International Journal Of Mechanical Engineering And Robotics Research**, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 516-521, 2024. EJournal Publishing. <http://dx.doi.org/10.18178/ijmerr.13.5.516-521>.

ANSHAR, A. M. et al. A critical review on water corrosion and scaling in water distribution systems and its control. *Acta Chimica Slovenica*, v. 70, p. 173–183, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17344/acsi.2022.7939>.

AOSONG ELECTRONICS. JSN-SR04T waterproof ultrasonic distance measuring module: datasheet. Guangzhou, 2023. Disponível em: <https://rjrorwxhjii1l5q.ldyedn.com/JSN-SR04T-3.0-aidnqBpoKliRljSlqnqkilqi.pdf>. Acesso em: 30 maio 2026.

ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. *The Internet of Things: A survey*. Computer Networks, [S.L.], v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.

BALANGAO, Jeffrey Ken B.. Corrosion of Metals: Factors, Types and Prevention Strategies. **Journal Of Chemical Health Risks**, S.L., v. 1, n. 14, p. 79-87, 2024.

BLYNK. *Blynk Documentation: Virtual Pins*. [S. l.]: Blynk Inc., 2024. Disponível em: <https://docs.blynk.io/en/getting-started/what-do-i-need-to-blynk/how-quickstart-device-was-made>. Acesso em: 30 maio 2026.

CAMPOS, Jacqueline Gomes; VIEIRA, João Victor; PARADA, Joaquim Orlando; FARIA, Rodrigo Nascimento Portilho de. **Sistema de captação para aproveitamento da água condensada de aparelhos de ar condicionado**. *RENEFARA – Revista Eletrônica da Faculdade de Anápolis*, Goiânia, v. 14, n. 3, p. 58–68, set./dez. 2019.
ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

COSTA, Wanderley da. **ESTUDO DO CONDICIONAMENTO MAGNÉTICO DA ÁGUA PARA FINS INDUSTRIAIS**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2006.

DE LORENZO DO BRASIL. **DLB CP003-UA**: planta para controle de processo quatro variáveis pntv com redes industriais. Planta para Controle de Processo Quatro Variáveis PNTV com Redes Industriais. 2024. Disponível em: https://delorenzo.com.br/produto/?cod=DLB_CP003-UA. Acesso em: 27 dez. 2025.

DHAMODHARAN, Palanisamy; AYALUR, Bakthavatsalam Kannappan; PRABAKARAN, Rajendran; KUMAR, A Santhosh; CHOI, Gyu Sang; KIM, Sung Chul. Current state of research in

air-conditioning condensate utilization and challenges: a review approach. **Applied Thermal Engineering**, [S.L.], v. 233, p. 1-22, out. 2023. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121171>.

ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series Datasheet*. Versão 4.2. Shanghai: Espressif Systems, 2023. Disponível em: https://cdn.sparkfun.com/assets/a/8/1/2/5/esp32_soc_datasheet.pdf. Acesso em: 10 jun. 2026.

FOLGADO, Francisco; CALDERÓN, David; GONZÁLEZ, Isaías; CALDERÓN, Antonio. Review of Industry 4.0 from the Perspective of Automation and Supervision Systems: definitions, architectures and recent trends. **Electronics**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 1-20, 16 fev. 2024. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/electronics13040782>.

FRAUCHES-SANTOS, Cristiane; ALBUQUERQUE, Mariana A.; OLIVEIRA, Márcia C. C.; ECHEVARRIA, Aurea. The Corrosion and the Anticorrosion Agents. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 293-309, 2014. Sociedade Brasileira de Química (SBQ).
<http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20140021>.

GEMS SENSORS. Float level switches: installation and operating principles. Plainville, 2023. Disponível em: <https://www.gemssensors.com>. Acesso em: 30 maio 2026.

KHALEDI, Masoud; MEHRABADI, Abdollah Rashidi; MIRABI, Maryam. Developing an innovative corrosion and scaling index for industrial cooling water using artificial intelligence. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 65, p. 1-20, ago. 2024. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105838>.

LIMA, R. H. S.. A importância do tratamento da água para sustentabilidade do equipamento: geradores de vapor. *Engineering Sciences*, v.11, n.1, p.28-35, 2023. DOI:
<http://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2023.001.0004>

MATARNEH, Sandra; ALQARALEH, Lubna; ALKHRISAT, Tariq; ABDEL-JABER, Mutasim. Assessing water production from air conditioning systems as an unconventional supply source: a focus on water quality and social acceptance perspectives. **Case Studies In Chemical And Environmental Engineering**, [S.L.], v. 9, p. 1-23, jun. 2024. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.csee.2023.100585>.

MAXIM INTEGRATED. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet. San Jose, 2023. Disponível em:
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Acesso em: 30 maio 2026.

NASCIMENTO, Fabio Junio Moreira. Desenvolvimento de métricas e estratégias de manutenção para planta didática industrial. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Itumbiara, Itumbiara, 2025.

NXP SEMICONDUCTORS. *UM10204: I2C-bus specification and user manual*. Rev. 7. Eindhoven: NXP Semiconductors, 2021. Disponível em: https://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf. Acesso em: 10 jun. 2026.

OMRON. Technical explanation for general-purpose relays. Kyoto: Omron Corporation, 2021. Disponível em: https://www.ia.omron.com/data_pdf/guide/36/generalrelay_tg_e_10_4.pdf. Acesso em: 30 maio 2026.

PARKER HANNIFIN CORPORATION. *General Purpose Solenoid Valves*. Cleveland: Parker Hannifin Corporation, 2020. Disponível em: https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Fluid-Control-Division/general_purpose_solenoid_valves_cat_fcdfl0911-with-bookmarks.pdf. Acesso em: 10 jun. 2026.

RĂUȚĂ, Denisa-Ioana (Gheorghe); MATEI, Ecaterina; AVRAMESCU, Sorin-Marius. Recent Development of Corrosion Inhibitors: types, mechanisms, electrochemical behavior, efficiency, and environmental impact. *Technologies*, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 103, 5 mar. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/technologies13030103>.

REIS, R. A.; SANCHES, M. C.; MALDONADO, A. C. D. Água, fonte da vida. *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 28287-28296, 2021.

SABNIS, A.; KALE, M.; DHANORKAR, M.; KALE, S. P. **Análise da qualidade do condensado de ar condicionado e seu potencial na conservação de água.** *Journal of Water Resource and Protection*, v. 12, n. 2, p. 93–101, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2020.122006>.

SALIM, Nur Atikah Abdul; XUAN, Wilson Lee Hua; ASRUZI, Nur Aina Farzana; ABDULLAH, Noorul Hudai; SEAN, Nor Arbani; SUPIAN, Nur Sumaiyyah; MANSUR, Fatin Zafirah. Drinking Water Purification Techniques and the Emerging Environmental Challenges. *Research and Reviews in Sustainability*, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 61-73, 2025. Ubiquity Press. <http://dx.doi.org/10.5334/rss.11>.

SEED STUDIO. Water Flow Sensor YF-S201 Datasheet. Shenzhen, 2023. Disponível em: <https://wiki.seeedstudio.com/Water-Flow-Sensor/>. Acesso em: 30 maio 2026.

SMACNA BRASIL. Sistemas de ar condicionado: princípio básico de refrigeração. 2024. Disponível em: <https://smacna.org.br/artigos-tecnicos/sistemas-de-ar-condicionado-principio-basico-de-refrigeracao/>. Acesso em: 24 maio 2026.

SOUSA, R. Érika B. de; ROCHA, C. M. S.; ABREU, F. O. M. da S.; MORAES, S. G. Caracterização físico-química e microbiológica das águas condensadas de aparelhos de ar condicionados visando potencial reutilização. *Revista Tecnologia*, [S. l.], v. 37, n. 1/2, p. 37-54, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5020/23180730.2016.V37.1/2.37-54>.

SUN, Donglei; TANG, Li; LONG, Keyan; SUN, Weilian; ZHANG, Zunzhen. Bacterial contamination in the different parts of household air conditioners: a comprehensive evaluation from Chengdu, Southwest China. *Frontiers in Public Health*, Lausanne, v. 12, 2024. DOI: 10.3389/fpubh.2024.1429626.

VALDEZ, B. et al. Corrosion control in industry. In: STOYTCHEVA, M. (org.). Environmental and industrial corrosion: practical and theoretical aspects. [S. l.]: InTech, 2012.

VIANA, Dainara Farias; ALVES, Ismael Carlos Braga; MARQUES, Paulo Roberto Brasil de Oliveira. Avaliação físico-química da água de condensação para fins de reaproveitamento: um estudo de caso na Universidade Federal do Maranhão. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, v. 10, n. 023025, p. 1-20, 2023.

ZHAO, Shichao; JING, Yuanyuan; LIU, Tao; ZHAO, Wenyan; LI, Fengting. Corrosion behavior and mechanism of carbon steel in industrial circulating cooling water system operated by electrochemical descaling technology. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 434, p. 1-20, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139817>.

APÊNDICE A - Código-fonte do software embarcado

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL25snykFep"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Captação Inteligente"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "TOKEN_REMOVIDO"

#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

/* ----- PINAGEM ----- */
#define PIN_DS18B20 4
#define PIN_TRIG 5
#define PIN_ECHO 18
#define PIN_FLUXO 27
#define RELE_BOMBA 26
#define RELE_VALVULA1 25
#define RELE_VALVULA2 33
#define BOIA_ALTA 14
#define BOIA_BAIXA 12
#define BTN_AUMENTAR 32
#define BTN_DIMINUIR 23
#define BTN_SELECIONAR 15
#define BTN_BOMBA 13

/* ===== PINOS VIRTUAIS BLYNK ===== */
#define V_NIVEL V0
#define V_TEMPERATURA V1
#define V_DESEJADO V2
#define V_BOMBA_MANUAL V3
#define V_VALVULA1 V4
#define V_VALVULA2 V5
#define V_BOIA_ALTA V6
#define V_BOIA_BAIXA V7
#define V_CONFIRMAR V8
#define V_FLUXO V9
#define V_ALERTA_BOMBA V10
#define V_RESETAR_ALERTA V11

/* ONE-WIRE E TEMPERATURA */
OneWire oneWire(PIN_DS18B20);
DallasTemperature sensores(&oneWire);

/* LCD */
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 21, 22);

/* BLYNK */
```

```

BlynkTimer temporizador;

/* FLUXO */
volatile unsigned long contadorFluxo = 0;
unsigned long inicioDoseFluxo = 0;
const float pulsosPorLitro = 480.0;

/* VARIÁVEIS */
int valorDesejado = 1;
bool estadoBomba = false;
bool dosando = false;
bool ladrãoAtivo = false;
bool bombaAutomatica = false; // usado para dosagem/ladrão com verificação de
fluxo
bool alertaAtivo = false;      // falha de fluxo

/* FLUXO PARA VERIFICAÇÃO */
unsigned long inicioVerificacaoFluxo = 0;
unsigned long ultimoContadorFluxoAuto = 0;

/* ESTADOS ANTERIORES */
bool boiaAltaAnterior = false;
bool boiaBaixaAnterior = false;
int ultimoNivelTanque = -1;
float ultimaTemperatura = -100.0;

/* SENSORES ATUALIZADOS PELO TIMER */
float nivelTanqueAtual = 0.0;
float temperaturaAtual = 0.0;

/* ERRO NO LCD */
bool mostrandoErro = false;
unsigned long inicioErro = 0;

/* WIFI */
char auth[] = BLYNK_AUTH_TOKEN;
char ssid[] = "NOME_DA_REDE";
char senha[] = "SENHA_REMOVIDA";

/* INTERRUPTÃO DO SENSOR DE FLUXO */
void IRAM_ATTR fluxoISR() { contadorFluxo++; }

/* FUNÇÕES DE LCD */
void mostrarErroLCD(String msg) {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(msg);
  mostrandoErro = true;
  inicioErro = millis();
}

```

```

void mostrarFalhaFluxo() {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("FALHA DE FLUXO!");
}

/* RESET DE ALERTA */
void resetarAlertaBomba() {
    alertaAtivo = false;
    bombaAutomatica = false;
    dosando = false;
    ladrãoAtivo = false;
    inicioVerificacaoFluxo = 0;
    Blynk.virtualWrite(V_ALERTA_BOMBA, 0);
}

/* FUNÇÃO DE CHECAGEM DE RESET FÍSICO */
void checarResetFisico() {
    if(!digitalRead(BTN_AUMENTAR) && !digitalRead(BTN_DIMINUIR)) {
        resetarAlertaBomba();
        delay(500);
    }
}

/* ULTRASSOM */
float lerUltrassom() {
    digitalWrite(PIN_TRIG, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(PIN_TRIG, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(PIN_TRIG, LOW);
    long duracao = pulseIn(PIN_ECHO, HIGH, 30000);
    float distancia = duracao * 0.034 / 2;
    if(duracao == 0) return nivelTanqueAtual;
    return distancia;
}

float lerUltrassomFiltrado() {
    const int NUM_LEITURAS = 15;
    float leituras[NUM_LEITURAS];
    int validos = 0;

    for (int i = 0; i < NUM_LEITURAS; i++) {
        float distancia = lerUltrassom();

        // Faixa possível dentro do reservatório:
        // aproximadamente 30 cm no nível máximo
        // e até 95 cm com o reservatório vazio.
        if (distancia >= 28.0 && distancia <= 95.0) {
            leituras[validos] = distancia;
            validos++;
        }
    }
}

```

```

    delay(20);
}

// Se nenhuma leitura for válida, mantém a última leitura conhecida.
if (validos == 0) {
    return nivelTanqueAtual;
}

// Ordenação crescente das leituras válidas.
for (int i = 0; i < validos - 1; i++) {
    for (int j = i + 1; j < validos; j++) {
        if (leituras[j] < leituras[i]) {
            float temporaria = leituras[i];
            leituras[i] = leituras[j];
            leituras[j] = temporaria;
        }
    }
}

// Se houver quantidade ímpar, retorna o valor central.
if (validos % 2 == 1) {
    return leituras[validos / 2];
}

// Se houver quantidade par, retorna a média dos dois valores centrais.
return (leituras[(validos / 2) - 1] + leituras[validos / 2]) / 2.0;
}

/* TEMPERATURA */
float lerTemperatura(){
    sensores.requestTemperatures();
    return sensores.getTempCByIndex(0);
}

/* NÍVEL EM % */
const float DIST_VAZIO = 93.0;
const float DIST_CHEIO = 30.0;
int percentualTanque(float distancia){
    float percentual = ((DIST_VAZIO - distancia) / (DIST_VAZIO - DIST_CHEIO)) *
100.0;
    return constrain(percentual,0,100);
}

/* LCD */
void atualizarLCD() {
    if(mostrandoErro){
        if(millis()-inicioErro<3000) return;
        mostrandoErro=false;
    }

    bool boiaAlta = !digitalRead(BOIA_ALTA);

```

```

    bool boiaBaixa = !digitalRead(BOIA_BAIXA);

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Nivel:" + String(percentualTanque(nivelTanqueAtual)) + "%  ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Boias H:" + String(boiaAlta) + " L:" + String(boiaBaixa) + "  ");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Temp:" + String(temperaturaAtual,1) + "C  ");
    float litrosDosados = (contadorFluxo - inicioDoseFluxo)/pulsosPorLitro;
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("Set:" + String(valorDesejado) + " Out:" + String(litrosDosados,1) +
    "L  ");
}

/* ===== FUNÇÕES BLYNK ===== */
void atualizarSensoresBoia() {
    bool boiaAlta = !digitalRead(BOIA_ALTA);
    bool boiaBaixa = !digitalRead(BOIA_BAIXA);
    if(boiaAlta!=boiaAltaAnterior){ Blynk.virtualWrite(V_BOIA_ALTA, boiaAlta);
    boiaAltaAnterior=boiaAlta; }
    if(boiaBaixa!=boiaBaixaAnterior){ Blynk.virtualWrite(V_BOIA_BAIXA, boiaBaixa);
    boiaBaixaAnterior=boiaBaixa; }
}

void atualizarNivelBlynk() {
    int percentual = percentualTanque(nivelTanqueAtual);
    if(abs(percentual-ultimoNivelTanque)>=2){
    Blynk.virtualWrite(V_NIVEL,percentual); ultimoNivelTanque=percentual; }
}

void atualizarTemperaturaBlynk() {
    if(abs(temperaturaAtual-ultimaTemperatura)>=0.3){
    Blynk.virtualWrite(V_TEMPERATURA,temperaturaAtual);
    ultimaTemperatura=temperaturaAtual; }
}

void atualizarFluxoBlynk() {
    static unsigned long ultimaEnvio=0;
    if(!estadoBomba) return;
    if(millis()-ultimaEnvio>=5000){
        float litrosTotais=contadorFluxo/pulsosPorLitro;
        Blynk.virtualWrite(V_FLUXO,litrosTotais);
        ultimaEnvio=millis();
    }
}

/* DOSAGEM */
void processarDosagem(){
    if(alertaAtivo) return;
    if(!dosando) return;

    bombaAutomatica = true;

```

```

// Inicia a janela de verificação de fluxo apenas uma vez
if(inicioVerificacaoFluxo == 0){
    inicioVerificacaoFluxo = millis();
    ultimoContadorFluxoAuto = contadorFluxo;
}

float entregue = (contadorFluxo - inicioDoseFluxo) / pulsosPorLitro;

if(entregue >= (valorDesejado )){
    digitalWrite(RELE_BOMBA, HIGH);
    digitalWrite(RELE_VALVULA1, HIGH);

    estadoBomba = false;
    dosando = false;
    bombaAutomatica = false;
    inicioVerificacaoFluxo = 0;

    Blynk.virtualWrite(V_BOMBA_MANUAL, false);
    Blynk.virtualWrite(V_VALVULA1, false);
}
}

/* BLYNK WRITE */
BLYNK_WRITE(V_DESEJADO){ valorDesejado=param.asInt(); }

BLYNK_WRITE(V_BOMBA_MANUAL){
    if(alertaAtivo){ mostrarFalhaFluxo(); return; }
    estadoBomba = param.asInt();
    digitalWrite(RELE_BOMBA, estadoBomba?LOW:HIGH);
}

BLYNK_WRITE(V_VALVULA1){ if(alertaAtivo){ mostrarFalhaFluxo(); return; }
digitalWrite(RELE_VALVULA1, param.asInt()?LOW:HIGH); }
BLYNK_WRITE(V_VALVULA2){ if(alertaAtivo){ mostrarFalhaFluxo(); return; }
digitalWrite(RELE_VALVULA2, param.asInt()?LOW:HIGH); }

BLYNK_WRITE(V_CONFIRMAR){
    if(alertaAtivo){ mostrarFalhaFluxo(); return; }
    if(!param.asInt()) return;
    bool baixa = !digitalRead(BOIA_BAIXA);
    if(!baixa){ mostrarErroLCD("Nivel Baixo!"); return; }
    inicioDoseFluxo=contadorFluxo;
    dosando=true;
    digitalWrite(RELE_BOMBA,LOW);
    digitalWrite(RELE_VALVULA1,LOW);
    Blynk.virtualWrite(V_BOMBA_MANUAL,true);
    Blynk.virtualWrite(V_VALVULA1,true);
}

BLYNK_WRITE(V_RESETAR_ALERTA){
    if(param.asInt()) resetarAlertaBomba();
}

```

```

}

/* SETUP */
void setup(){
  Serial.begin(115200);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  sensores.begin();
  pinMode(PIN_TRIG,OUTPUT);
  pinMode(PIN_ECHO,INPUT);
  pinMode(PIN_FLUXO,INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(PIN_FLUXO,fluxoISR,RISING);
  pinMode(BOIA_ALTA,INPUT_PULLUP);
  pinMode(BOIA_BAIXA,INPUT_PULLUP);
  pinMode(BTN_AUMENTAR,INPUT_PULLUP);
  pinMode(BTN_DIMINUIR,INPUT_PULLUP);
  pinMode(BTN_SELECIONAR,INPUT_PULLUP);
  pinMode(BTN_BOMBA,INPUT_PULLUP);
  pinMode(RELE_BOMBA,OUTPUT);
  pinMode(RELE_VALVULA1,OUTPUT);
  pinMode(RELE_VALVULA2,OUTPUT);
  digitalWrite(RELE_BOMBA,HIGH);
  digitalWrite(RELE_VALVULA1,HIGH);
  digitalWrite(RELE_VALVULA2,HIGH);
  Blynk.begin(auth,ssid,senha);
  temporizador.setInterval(500L,[]{ nivelTanqueAtual=lerUltrassomFiltrado();
  temperaturaAtual=lerTemperatura(); });
  temporizador.setInterval(500L,atualizarSensoresBoia);
  temporizador.setInterval(500L,atualizarNivelBlynk);
  temporizador.setInterval(500L,atualizarTemperaturaBlynk);
}

/* LOOP */
void loop(){
  Blynk.run();
  temporizador.run();
  atualizarLCD();
  atualizarFluxoBlynk();
  processarDosagem();
  checarResetFisico();

  // LADRÃO
  bool boiaAlta=!digitalRead(BOIA_ALTA);

  if(alertaAtivo){
    mostrarFalhaFluxo();
  } else {
    if(boiaAlta && !ladrãoAtivo){
      bombaAutomatica=true;
      inicioVerificacaoFluxo=millis();
      ultimoContadorFluxoAuto=contadorFluxo;
      estadoBomba=true;
    }
  }
}

```

```

        digitalWrite(RELE_BOMBA, LOW);
        digitalWrite(RELE_VALVULA2, LOW);
        Blynk.virtualWrite(V_BOMBA_MANUAL, true);
        Blynk.virtualWrite(V_VALVULA2, true);
        ladrãoAtivo=true;
    }
    if(!boiaAlta && ladrãoAtivo){
        estadoBomba=false;
        digitalWrite(RELE_BOMBA, HIGH);
        digitalWrite(RELE_VALVULA2, HIGH);
        Blynk.virtualWrite(V_BOMBA_MANUAL, false);
        Blynk.virtualWrite(V_VALVULA2, false);
        ladrãoAtivo=false;
        bombaAutomatica=false;
        inicioVerificacaoFluxo=0;
    }
}

// BOTÕES LOCAIS
if(!digitalRead(BTN_AUMENTAR)){ valorDesejado++;
Blynk.virtualWrite(V_DESEJADO, valorDesejado); delay(250); }
if(!digitalRead(BTN_DIMINUIR) && valorDesejado>1){ valorDesejado--;
Blynk.virtualWrite(V_DESEJADO, valorDesejado); delay(250); }
if(!digitalRead(BTN_BOMBA)){
    estadoBomba=!estadoBomba;
    digitalWrite(RELE_BOMBA, estadoBomba?LOW:HIGH);
    digitalWrite(RELE_VALVULA2, estadoBomba?LOW:HIGH);
    Blynk.virtualWrite(V_BOMBA_MANUAL, estadoBomba);
    Blynk.virtualWrite(V_VALVULA2, estadoBomba);
    delay(250);
}
if(!digitalRead(BTN_SELECIONAR)){
    if(alertaAtivo){ mostrarFalhaFluxo(); delay(500); return; }
    bool baixa=!digitalRead(BOIA_BAIXA);
    if(!baixa){ mostrarErroLCD("Nível Baixo!"); }
    else{
        inicioDoseFluxo=contadorFluxo;
        dosando=true;
        digitalWrite(RELE_BOMBA, LOW);
        digitalWrite(RELE_VALVULA1, LOW);
        Blynk.virtualWrite(V_BOMBA_MANUAL, true);
        Blynk.virtualWrite(V_VALVULA1, true);
    }
    delay(250);
}

// VERIFICAÇÃO DE FLUXO COM ATUALIZAÇÃO DE BLYNK
if(bombaAutomatica && millis()-inicioVerificacaoFluxo>=5000){
    unsigned long deltaFluxo = contadorFluxo - ultimoContadorFluxoAuto;
    if(deltaFluxo==0 && !alertaAtivo){
        Blynk.logEvent("falha_bomba", "Sem vazao! Possivel travamento ou falta de
agua");
    }
}

```