



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO
TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**
Campus Leopoldina - Programa de Pós-Graduação
em Automação e Sistemas

Lucas Carvalho Gonçalves

Monitoramento de ETAs e Dosagem de Químicos: Uma Abordagem via Arquitetura IoT

Leopoldina

2025

Lucas Carvalho Gonçalves

Monitoramento de ETAs e Dosagem de Químicos: Uma Abordagem via Arquitetura IoT

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Automação e Sistemas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Leopoldina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Campos Menezes

Coorientador Prof. Dr. Lucas Silva de Oliveira

Leopoldina

2025

Gonçalves, Lucas Carvalho.

G635m Monitoramento de ETAs e dosagem de químicos: uma abordagem via arquitetura IoT. / Lucas Carvalho Gonçalves. - 2025.
88 f. : il.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Automação e Sistemas (PPGAS), 2025.

Orientador: Gustavo Campos Menezes.

Coorientador: Lucas Silva de Oliveira.

Bibliografia.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. *Campus* Leopoldina.

1. Internet das coisas. 2. Redes. 3. Sensores. 4. Monitoramento. 5. Saneamento. I. Menezes, Gustavo Campos. II. Oliveira, Lucas Silva de. II. Título.

CDU: 004.738.5:62

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Luzia Adriana Damasceno,
CRB 6º 2305 / Cefet/MG *campus* Leopoldina.



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 4 / 2025 - PPGAS (11.52.20)

Nº do Protocolo: 23062.005450/2025-26

Leopoldina-MG, 31 de janeiro de 2025.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MONITORAMENTO DE ETAs E DOSAGEM DE QUÍMICOS: UMA ABORDAGEM VIA ARQUITETURA IoT

AUTOR: LUCAS CARVALHO GONÇALVES

ORIENTADOR: Professor Doutor Gustavo Campos Menezes

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 31 de janeiro de 2025 essa Dissertação:

Professor Doutor Gustavo Campos Menezes (ORIENTADOR)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG

Professor Doutor Lucas Silva de Oliveira (COORIENTADOR)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG

Professor Doutor José Geraldo Ribeiro Júnior (MEMBRO INTERNO)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG

Professor Doutor Luís Filipe Pereira Silva (MEMBRO EXTERNO)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG

(Assinado digitalmente em 31/01/2025 10:51)

GUSTAVO CAMPOS MENEZES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DCCN (11.58)
Matrícula: 1550421

(Assinado digitalmente em 31/01/2025 10:50)

JOSE GERALDO RIBEIRO JUNIOR
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DECOMLP (11.61.11)
Matrícula: 1322715

(Assinado digitalmente em 03/02/2025 08:34)

LUCAS SILVA DE OLIVEIRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMDV (11.60.05)
Matrícula: 2141054

(Assinado digitalmente em 31/01/2025 10:52)

LUIS FILIPE PEREIRA SILVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMDV (11.60.05)
Matrícula: 2142337

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **4**, ano: **2025**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de
emissão: **31/01/2025** e o código de verificação: **c5a30302f2**

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos que de alguma forma contribuíram para que ele se tornasse realidade, em especial à minha companheira que sempre me motivou a crescer e foi peça fundamental no meu processo de amadurecimento; à minha irmã que sempre me inspira a acreditar que eu posso superar minhas dificuldades e a enxergar o mundo com olhos de mansidão; e em memória dos meus avós que tanto acreditaram e sonharam comigo enquanto puderam e hoje me guiam no caminho da sabedoria.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, fonte da minha vida, inspiração e sabedoria. Agradeço também aos meus pais e à minha família que sempre me mostraram o poder da educação e do conhecimento no fomento do meu próprio destino.

Gostaria de agradecer ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e à Conatus Ambiental pelos recursos oferecidos para a pesquisa realizada nesta dissertação, por meio do projeto *Plataforma IoT para Controle de Dosagem e Estoques de Químicos em ETAs*. Agradeço também à equipe de pesquisadores e colegas, em especial ao José Renato Lanzi Martini e ao Paulo Lanzi Martini pela confiança e oportunidade de integrar a equipe do projeto; e também ao Luiz Octávio Martini Lima pela paciência e solicitude em compartilhar seus conhecimentos e pela assistência durante a realização da pesquisa, sendo fundamental para a concretização desta dissertação, e principalmente pela amizade construída; e ao meu orientador e coorientador pelos seus ensinamentos e por me concederem essa oportunidade única.

Gostaria de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa do Programa de Recursos Humanos em Áreas Estratégicas (RHAE, processo nº 350393/2022-2), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo nº 2022/13676-1) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP, processo nº 2342-22) pelos recursos oferecidos ao projeto.

Por fim, e não menos importante, agradeço imensamente à minha esposa Keicy Anni de Paula pela motivação em realizar o mestrado e pelo apoio em momentos difíceis dessa trajetória. Obrigado por estarmos juntos.

*“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade,
é primitiva e infantil – e, no entanto,
é a coisa mais preciosa que temos.”*
Albert Einstein

Resumo

O tratamento de água é um processo essencial para garantir o fornecimento de recursos hídricos de qualidade à população, mas enfrenta desafios significativos relacionados à variabilidade da água bruta e à ausência de tecnologias de monitoramento em tempo real em muitas Estações de Tratamento de Água (ETAs). A presente dissertação aborda esses desafios ao propor uma plataforma que se baseia em conceitos de Internet das Coisas (IoT) integrada a uma Rede de Sensores sem Fio (RSSFs) para o monitoramento contínuo de parâmetros críticos de qualidade da água, como turbidez e características de coagulação. O sistema desenvolvido inclui um *hardware* modular, configurável como *node* ou *gateway*, com suporte para protocolos de comunicação industrial como *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) e *Recommended Standard-485* (RS485). Além disso, foi implementada uma Interface Homem-Máquina (IHM) projetada para fornecer visualização remota e atual dos dados coletados, promovendo maior controle e eficiência nos processos operacionais das ETAs. Os resultados foram obtidos por meio de testes realizados em ambientes controlados e em campo, especificamente na ETA municipal de Mogi Guaçu/SP. No ambiente controlado, o sistema foi testado com múltiplos sensores, validando sua capacidade de integração e a confiabilidade das medições em comparação com equipamentos comerciais. Já no cenário operacional, o sistema demonstrou robustez ao funcionar de forma contínua, mesmo em condições adversas. Assim, a solução proposta apresenta avanços significativos ao integrar tecnologias emergentes de IoT ao setor de saneamento, contribuindo para modernizar práticas de monitoramento de ETAs e aumentar a confiabilidade dos processos de tratamento.

Palavras-chaves: Internet das Coisas; Redes de Sensores sem Fio; Monitoramento em Tempo Real; Automação em Saneamento.

Abstract

Water treatment is an essential process to ensure the supply of quality water resources to the population, but it faces significant challenges related to the variability of raw water and the absence of real-time monitoring technologies in many Water Treatment Plants (WTPs). This dissertation addresses these challenges by proposing a platform based on Internet of Things (IoT) concepts integrated with Wireless Sensor Networks (WSNs) for the continuous monitoring of critical water quality parameters, such as turbidity and coagulation characteristics. The developed system includes modular hardware, configurable as either a node or a *gateway*, with support for industrial communication protocols such as *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) and *Recommended Standard-485* (RS485). Additionally, an Human-Machine Interface (HMI) was implemented to provide remote and real-time visualization of the collected data, promoting greater control and efficiency in the operational processes of WTP. The results were obtained through tests conducted in controlled environments and in the field, specifically at the municipal WTP in Mogi Guaçu/SP. In the controlled environment, the system was tested with multiple sensors, validating its integration capacity and the reliability of measurements compared to commercial equipment. In the operational scenario, the system demonstrated robustness by functioning continuously, even under adverse conditions. Thus, the proposed solution presents significant advancements by integrating emerging IoT technologies into the sanitation sector, contributing to modernizing monitoring practices in WTP and increasing the reliability of treatment processes.

Keywords: Internet of Things; Wireless Sensor Networks; Real-Time Monitoring; Sanitation Automation.

Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Arquitetura da plataforma IoT proposta em uma visão geral do projeto.	5
Figura 2.1 – Visão geral dos componentes e arquiteturas de dispositivos IoT (Fonte: Adaptado de KASSAB; DARABKH, 2020).	16
Figura 2.2 – Tecnologias de conectividade IoT sem fio (Fonte: Adaptado de KASSAB; DARABKH, 2020).	20
Figura 2.3 – Uma arquitetura típica de nó-sensor baseada em IoT.	21
Figura 2.4 – Comunicação entre as camadas da RSSF.	22
Figura 3.1 – Diagrama de blocos dos principais circuitos conectados ao ESP32-S3.	31
Figura 3.2 – Esquema de pinagem do microcontrolador ESP32-S3.	32
Figura 3.3 – Esquemático dos circuitos reguladores de tensão.	32
Figura 3.4 – Diagrama esquemático do circuito de interface entre o ESP32-S3 e o módulo de gravação no cartão de memória <i>Secure Digital</i> (SD), incluindo resistores <i>pull-up</i> necessários para a comunicação <i>Serial Peripheral Interface</i> (SPI).	33
Figura 3.5 – Circuito esquemático do módulo de rádio <i>Long Range</i> (LoRa) baseado no Circuito Integrado (CI) SX1276.	34
Figura 3.6 – Barramentos de acesso ao <i>General Purpose Input/Output</i> (GPIO) e UART, ilustrando as conexões diretas ao microcontrolador e sua utilidade em potencial para expansões do sistema.	35
Figura 3.7 – Circuito esquemático de comunicação Modbus RS485 implementado com o CI MAX485ESA+T, incluindo resistores de <i>pull-up</i> , <i>pull-down</i> e terminação para estabilidade da linha.	35
Figura 3.8 – Conectores para programação e comunicação: <i>Universal Serial Bus</i> (USB) tipo B, <i>header</i> de 4 pinos e barramento <i>Inter-Integrated Circuit</i> (I2C).	36
Figura 3.9 – Demais esquemáticos elétricos detalhados do projeto, incluindo circuitos de <i>boot</i> , <i>reset</i> , <i>factory reset</i> , <i>Light Emitting Diodes</i> (LEDs) de <i>status</i> e furos de montagem.	37
Figura 3.10 – <i>Layout</i> da <i>Printed Circuit Board</i> (PCB) do dispositivo <i>Random Forest</i> (RF).	38
Figura 3.11 – Diagrama de posicionamento dos componentes 3D.	38
Figura 3.12 – Fluxograma do modo <i>node</i> , ilustrando o processo de aquisição de dados dos sensores e envio ao <i>gateway</i> utilizando comunicação LoRa.	40

Figura 3.13–Fluxograma do modo <i>gateway</i> , destacando a lógica de recepção de dados dos <i>nodes</i> e retransmissão ao <i>broker Message Queuing Telemetry Transport</i> (MQTT) para armazenamento em nuvem.	42
Figura 3.14–Arquitetura completa da plataforma de monitoramento baseada em serviços da Amazon Web Services (AWS). Os componentes destacados sem opacidade representam a implementação desenvolvida nesta dissertação.	43
Figura 3.15–Diagrama de fluxo de dados da plataforma de monitoramento.	44
Figura 3.16–Protótipo ilustrativo da IHM para monitoramento de ETAs, com visualização de dados em tempo real e gráficos históricos.	46
Figura 4.1 – Placa do <i>hardware</i> introduzido na Seção 3.1 para atuação como <i>node</i> ou <i>gateway</i>	50
Figura 4.2 – <i>Node</i> conectado via serial UART com o sensor analisador de coagulação na ETA de Mogi Guaçu/SP.	51
Figura 4.3 – <i>Setup</i> experimental com o turbidímetro de terceiros conectado ao sistema proposto.	52
Figura 4.4 – Imagem parcial da interface de comunicação para telemetria dos parâmetros do analisador de coagulação instalado na ETA Sul, Cuiabá/MT.	53
Figura 4.5 – Imagem parcial da interface de comunicação para telemetria dos parâmetros do turbidímetro de terceiros, utilizados nos testes em ambiente controlado na Conatus, Mogi Guaçu/SP.	53
Figura 4.6 – Interface de comunicação para telemetria dos parâmetros do <i>gateway</i> , instalado na ETA Aristides Bueno, Mogi Guaçu/SP.	54
Figura 4.7 – Comparação entre os valores de turbidez medidos pelo turbidímetro de bancada e pelo nó-sensor. Dados combinados das três séries de testes realizadas nos dias 24, 25 e 26 de abril de 2024.	56
Figura 4.8 – Monitoramento dos parâmetros em ambiente controlado, de cima para baixo: corrente de fluxo (principal medição do analisador de coagulação), turbidez (principal medição do turbidímetro), potência do sinal de conexão entre os dispositivos, <i>status</i> de conexão do <i>gateway</i> com a Internet.	58
Figura 4.9 – Parâmetros do monitoramento na ETA Municipal de Mogi Guaçu/SP. De cima para baixo: <i>status</i> de conexão do <i>gateway</i> com a Internet, potência do sinal entre <i>gateway</i> e <i>node</i> , frequência do pistão do sensor analisador de coagulação e corrente de fluxo (principal grandeza medida pelo sensor).	60

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABB	Asea Brown Boveri
ANA	Agência Nacional de Águas
ANN	<i>Artificial Neural Networks</i>
ATi	Analytical Technology, Inc.
AWS	Amazon Web Services
BD	Banco de Dados
CBA	Congresso Brasileiro de Automática
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CI	Circuito Integrado
CIA	Confidencialidade, Integridade e Disponibilidade
CLI	Command Line Interface
CLP	Controlador Lógico Programável
CPS	<i>Cyber Physical System</i>
DT	<i>Decision Tree</i>
EPA	Environmental Protection Agency
ETA	Estação de Tratamento de Água
GA	<i>Genetic Algorithms</i>
GND	terra
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GWP	Global Water Partnership
HMI	Human-Machine Interface
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>

I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IA	Inteligência Artificial
IC	Infraestrutura Crítica
IP	<i>Internet Protocol</i>
IP66	Índice de Proteção contra jatos de água de alta pressão
IHM	Interface Homem-Máquina
ITT	International Telephone & Telegraph
IoT	Internet of Things
IoT	Internet das Coisas
ISO	International Organization for Standardization
JS	JavaScript
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LEDs	<i>Light Emitting Diodes</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LPWAN	<i>Low-Power Wide-Area Network</i>
MCU	<i>Micro-Controller Unit</i>
ML	<i>Machine Learning</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
MVP	<i>Minimum Viable Product</i>
NB-IoT	<i>Narrow Band IoT</i>
NIST	National Institute of Standards and Technology
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ORP	<i>Oxidation-Reduction Potential</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>

PIB	Produto Interno Bruto
PLANASA	Plano Nacional de Saneamento
PPGAS	Programa de Pós-Graduação em Automação e Sistemas
QoS	<i>Quality of Service</i>
RDS	Relational Database Service
RF	<i>Random Forest</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RNC	Rede Neural Convolucional
RS485	<i>Recommended Standart-485</i>
RSSF	Rede de Sensores sem Fio
RTC	<i>Real Time Clock</i>
S3	Simple Storage Service
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SD	<i>Secure Digital</i>
SIoT	Symposium on IoT
SNS	Simple Notification Service
SoC	<i>System on a Chip</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SQS	Simple Queue Service
SVM	<i>Support Vector Machines</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDS	<i>Total Dissolved Solids</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>

WSN	Wireless Sensor Network
WTP	Water Treatment Plant
ZTA	<i>Zero Trust Architecture</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Definição do Problema	3
1.2	Objetivos	6
1.2.1	Objetivo Geral	6
1.2.2	Objetivos Específicos	6
1.3	Contribuições e Publicações	8
1.4	Organização da Dissertação	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	Processo de Tratamento de Água	11
2.2	Internet das Coisas	14
2.3	Redes de Sensores sem Fio	19
2.4	Sistemas de Monitoramento da Qualidade da Água	24
2.4.1	Tecnologias Industriais para Monitoramento da Qualidade da Água	24
2.4.2	Pesquisas Desenvolvidas para Monitoramento da Qualidade da Água	27
3	PROJETO DA ARQUITETURA DE <i>HARDWARE</i> E PROGRAMAÇÃO EMBARCADA	30
3.1	Hardware	31
3.2	Programação Embarcada dos <i>Nodes</i>	39
3.3	Arquitetura da Plataforma de Monitoramento	42
3.4	Estrutura e Funcionalidades da IHM	45
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	48
4.1	Hardware Implementado: Descrição e Funcionalidades	50
4.2	IHM: Visualização e Telemetria	52
4.3	Comparação de Medições: Turbidímetro de Bancada e Turbidímetro RS485 de Linha.	55
4.4	Avaliação em Ambiente Controlado do Arcabouço com Multiparâmetros	57
4.5	Analisador de Coagulação em Ambiente Operacional	59
5	CONCLUSÕES	61
5.1	Trabalhos Futuros	62
	REFERÊNCIAS	64

1 Introdução

A água é um recurso natural da qual as atividades econômicas e sociais dependem, bem como o equilíbrio das funções ecossistêmicas. Portanto, a gestão das águas se tornou um tema prioritário na agenda internacional desde 2012 (United Nations Education, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2012). Nesse contexto, gestores e pesquisadores têm investigado mecanismos para aprimorar o sistema de gestão das águas, buscando garantir o atendimento à demanda crescente de um recurso limitado em quantidade no território e, muitas vezes, impactado em qualidade por atividades antrópicas.

Pesquisas evidenciam os benefícios de investimento em recursos hídricos em termos de garantia da disponibilidade de água em quantidade e qualidade (United State Society on Dams (USSD), 2012). Segundo o Departamento de Estado dos Estados Unidos, esses investimentos ajudam a reduzir os danos causados por eventos climáticos extremos, diminuindo seus impactos econômicos de um nível de 25 – 30% para cerca de 5% do Produto Interno Bruto (PIB). Além da gestão dos mananciais, a infraestrutura urbana desempenha um papel essencial nesse processo, contribuindo para a mitigação de enchentes e estiagens. A implementação de sistemas de drenagem eficientes, como piscinões e canais de escoamento, reduz os riscos de inundações, enquanto estratégias como captação e reaproveitamento da água da chuva e redução de perdas na distribuição melhoram a qualidade e a disponibilidade do recurso. Além disso, a criação de reservatórios urbanos e o uso de tecnologias de reuso da água fortalecem a resiliência hídrica, garantindo maior segurança no abastecimento. Dessa forma, a integração entre infraestrutura e gestão hídrica não apenas minimiza os impactos econômicos dos eventos climáticos, mas também assegura um fornecimento sustentável de água para a população e setores produtivos.

Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e Global Water Partnership (GWP), o objetivo da segurança hídrica é garantir um abastecimento confiável e sustentável, permitindo a expansão do acesso à água tratada, o desenvolvimento econômico, a inovação tecnológica e a preservação ambiental, além de mitigar os riscos associados à água e, assim, promover o crescimento sustentável e maior bem-estar. (Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2013; BEEK; ARRIENS, 2014). Enquanto isso, de acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), segurança hídrica é a condição que visa garantir quantidade e qualidade aceitável de água para abastecimento, alimentação, preservação de ecossistemas e demais usos, associados a um nível aceitável de riscos relacionados com a água para as pessoas, economias e meio ambiente (Agência Nacional de Águas (ANA), 2015).

No âmbito internacional, o conceito de segurança hídrica começou a ser discutido

na década de 90, mas somente em 2000 o assunto passou a ser objeto de um maior número de publicações, sobretudo a partir de 2009 (BAKKER, 2012). No Brasil, a Lei nº 9.433 (1997) que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos no país, e as leis estaduais correspondentes, trazem embutido o conceito de segurança hídrica indiretamente. No entanto, somente a partir de 2014 este conceito ganhou espaço no país em função da crise hídrica vivenciada pelas principais capitais do Sudeste brasileiro, em particular São Paulo, o que terminou colocando o assunto na pauta nacional, a exemplo da contratação de um Plano Nacional de Segurança Hídrica e dos inúmeros seminários e mesas-redondas abordando o assunto em diversos estados.

Os benefícios do fornecimento de água aos centros urbanos e à produção agrícola são frequentemente acompanhados por alterações aos ecossistemas e à biodiversidade, iminentemente críticos, porém dificilmente quantificados (ABELL et al., 2008; VERONES et al., 2017). Em relação à saúde pública, em 2019, foram notificadas mais de 273 mil internações por doenças de veiculações hídricas no país, resultando em um custo de R\$108 milhões ao país (BOEHM, 2021).

Dessa forma, o tratamento de água bruta e/ou águas residuais é necessário como componente para reduzir os contaminantes a um grau suficiente para obter água potável. Portanto, uma estação de tratamento deve ser projetada levando em consideração alguns parâmetros no afluente que devem ser controlados para aumentar a eficiência da estação de tratamento. Para evitar a entrada descontrolada de efluentes de águas residuais no meio ambiente e a contaminação dos sistemas vivos, a proteção ambiental requer o uso de sistemas de purificação/tratamento adequados com alta eficiência de remoção de contaminantes. Economicamente, o tratamento eficaz de águas residuais tem efeitos importantes na economia de água e na prevenção da escassez desnecessária de água (SATHYA et al., 2022).

Consequentemente, ter saneamento básico é um fator essencial para o desenvolvimento sustentável de uma comunidade. Os serviços de água tratada, coleta e tratamento dos esgotos levam à melhoria da qualidade de vida das pessoas, sobretudo na saúde infantil com redução da mortalidade infantil, melhorias na educação, na expansão do turismo, na valorização dos imóveis, na renda do trabalhador, na despoluição dos rios e preservação dos recursos hídricos, entre outros (CARTAXO et al., 2019).

O baixo acesso aos serviços de saneamento básico no Brasil causa diversos impactos negativos para a população, incluindo a maior propagação de doenças e dificuldades para o crescimento econômico do país. Em resposta a esses desafios, o "Marco Legal do Saneamento" foi sancionado em 2020, com o objetivo principal de universalizar o acesso aos serviços de saneamento básico no Brasil, expandindo as redes existentes e tornando-as mais eficientes (PAGANINI; BOCCHIGLIERI, 2021).

Para alcançar esses objetivos de universalização e eficiência, é crucial o funcionamento adequado das ETAs, onde o processo envolve etapas como coagulação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção de pH. Os processos de coagulação e floculação, em particular, são amplamente utilizados no tratamento de águas e efluentes, impactando diretamente as fases subsequentes. Contudo, a variabilidade da água bruta impõe a necessidade de frequentes ajustes na dosagem de produtos químicos, o que demanda interferência humana constante e múltiplos testes em jarros (*Jar-Tests*) para alcançar dosagens ótimas. Essa variabilidade, somada à demora na detecção de mudanças nos parâmetros da água bruta, resulta em ineficiências operacionais, como a qualidade insuficiente da água tratada e o desperdício de insumos químicos (MARCKMANN et al., 2015; BARROS, 2004).

Esses desafios operacionais reforçam a necessidade de soluções tecnológicas que permitam um controle mais preciso e ágil desses processos, o que será abordado na seção seguinte ao detalhar o problema específico tratado nesta pesquisa.

1.1 Definição do Problema

As Infraestruturas Críticas (ICs) são frequentemente descritas como aquelas que fornecem serviços essenciais e servem de base para a segurança, a economia e os sistemas de saúde de qualquer país. A lista de setores amparados pelas ICs varia de país para país. Em geral, englobam setores que contemplam áreas como agricultura, cuidados de saúde, reatores nucleares, transportes, setor energético, engenharia civil e química, investigação, estações de tratamento de água e esgoto, entre outros (MARKOPOULOU; PAPAKONSTANTINOU, 2021). Na última década, é nítido os esforços crescentes para que os sistemas ciberfísicos e/ou IoT complementem a IC tradicional com operações ricas em dados.

Os sistemas de controle de supervisão e aquisição de dados, do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), e sistemas de controle industrial possuem um papel fundamental no gerenciamento e controle da IC. Nessas aplicações, os sistemas SCADA são utilizados em processos de controle e monitoramento de ativos distribuídos geograficamente (YADAV; PAUL, 2021). A partir do conceito de indústria 4.0, os sistemas SCADA modernos adotaram em suas estruturas soluções e conceitos como tecnologia de nuvem, mineração de dados (*big data*), Inteligência Artificial (IA) e sistemas computacionais complexos. A integração destas tecnologias ao sistema SCADA proporcionou significativa melhora na interoperabilidade do sistema, planejamento de manutenção e redução do custo de infraestrutura. Portanto, os sistemas SCADA modernos estão transformando as ICs em ambientes remotamente monitorados em tempo real (TARIQ; ASIM; KHAN, 2019).

Nessa perspectiva de evolução tecnológica, surge o conceito das RSSFs como uma

solução adequada, econômica e escalável para uma ampla gama de aplicações em monitoramento, automação, segurança e controle, mas que ainda demandam melhorias e adequações diante das diversas peculiaridades e particularidades presentes nas ICs (MAJID et al., 2022). Uma RSSF consiste em nós de sensores, pequenos e inteligentes, que são amplamente implantados e colaboram entre si por meio de comunicação sem fio para monitorar fenômenos físicos. Esses dispositivos acrescentaram inteligência à vida diária, casas, corpos, meio ambiente, indústrias, entre outros (CHONG; KUMAR, 2003). Atualmente, um nó consiste de um sistema composto por uma unidade de processamento, uma unidade de comunicação, uma unidade de detecção e uma unidade de potência, que são projetados especialmente a fim de assegurar o compromisso entre tamanho pequeno e baixo custo, e em alguns casos, baixo consumo de energia e alto desempenho computacional (ABDUL-QAWY; ALMURISI; TADISSETTY, 2020).

Segundo Merlo (2022), a indústria do saneamento no Brasil não acompanha as tendências tecnológicas mundiais, como, por exemplo, as tecnologias relacionadas com a chamada indústria 4.0. Apesar do avanço significativo das tecnologias emergentes, como IA e IoT, em diversos setores industriais ao longo da última década, é evidente que a indústria do saneamento permanece consideravelmente defasada em sua adoção e integração dessas inovações. Além do mais, muitas empresas nem sequer monitoram os parâmetros do processo continuamente, sendo que alguns são avaliados apenas anualmente. Essa prática dificulta a identificação ágil de problemas e a pronta implementação de soluções. Adicionalmente, métodos convencionais de monitoramento da qualidade da água frequentemente dependem de análises laboratoriais, contribuindo para um aumento no tempo de resposta diante de potenciais problemas no processo (TSUTIYA, 2002; WONG et al., 2021).

De acordo com Achite et al. (2023), operadores de ETAs enfrentam desafios significativos na gestão dos processos de tratamento, especialmente em períodos de alta demanda e nas condições de grande variabilidade das características da água bruta, como o aumento de turbidez durante a temporada de chuvas. Nesses cenários, o uso de testes de jarro para otimização da dosagem de coagulantes pode perder efetividade, uma vez que os parâmetros da água podem sofrer alterações substanciais antes da conclusão do teste. Além disso, a ocorrência de erros humanos, como a inserção incorreta de dados, compromete a precisão do monitoramento e do controle do tratamento, o que pode resultar em água tratada fora dos padrões de qualidade desejados.

Uma das iniciativas voltadas para a melhoria do tratamento de água é conduzida pela *start-up* brasileira Conatus Ambiental, localizada em Mogi Guaçu, São Paulo. O projeto desenvolvido, denominado *Plataforma IoT para Controle de Dosagem e Estoques de Químicos em ETA/ETEs*, busca integrar tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 como IoT e IA para aprimorar o monitoramento e a gestão dos processos em ETAs.

Essa plataforma visa melhorar a qualidade da água tratada em escala nacional, com perspectivas de internacionalização a médio e longo prazo.

A Figura 1.1 apresenta o diagrama da arquitetura da plataforma, destacando-se diferentes módulos: nós-sensores para monitoramento de variáveis como turbidez, pH e vazão; nós-atuadores, como bombas dosadoras e válvulas; e dispositivos para visualização e controle. Os dados capturados pelos sensores e atuadores passam por um conversor e um *node*, que processam as informações e as transmitem via um protocolo privado usando tecnologia LoRa, chegando ao *gateway*. No *gateway*, os dados são encaminhados para um *broker* MQTT na Internet, que gerencia a comunicação e distribui as mensagens para os dispositivos assinantes. A partir do *broker*, as informações podem ser armazenadas na nuvem, que conta com Bancos de Dados (BD) relacionais e não relacionais, poder computacional – envio de alertas de parâmetros fora do padrão – e algoritmos de IA e *Machine Learning* (ML) para análise e tomada de decisões automáticas, que são enviadas para os nós-atuadores. Para a implementação desses recursos em nuvem, foram utilizadas soluções da AWS, o que garantiu escalabilidade, confiabilidade e integração eficiente entre os componentes do sistema. Uma plataforma WEB permite o acesso aos dados em *soft real time*, disponível 24/7.

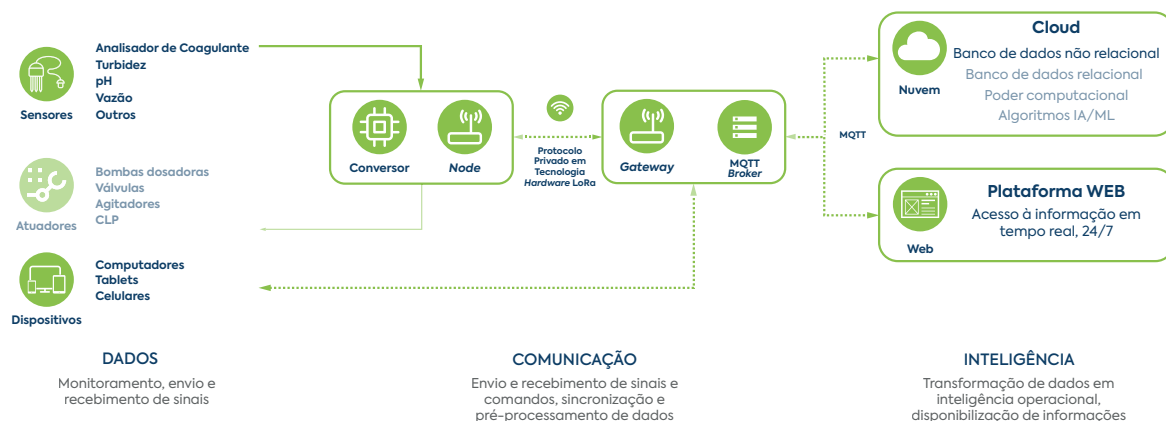


Figura 1.1 – Arquitetura da plataforma IoT proposta em uma visão geral do projeto.

O objeto de estudo da dissertação limita-se apenas aos componentes representados em cores intensas (verde e azul mais fortes) da Figura 1.1. Os elementos mais claros, como nós-atuadores, BD relacional, poder computacional e algoritmos de IA e ML, fazem parte do projeto maior, mas não estão incluídos no escopo da dissertação.

Dessa forma, motivados pela estrutura tecnológica presente nas RSSFs, esta dissertação propõe a concepção de uma plataforma IoT destinada à construção de uma RSSF para monitoramento de ETAs. A solução proposta consiste em um sistema micro-controlado compatível com os protocolos de comunicação RS485 e UART adotados no

processo de comunicação com sensores distribuídos na ETA, tais como sensores analisadores de coagulação, turbidímetros, colorímetros, pHmêtros, entre outros. Além disso, é embarcado no *hardware* um rádio LoRa, a fim de criar uma rede *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN), que atuará de dois modos distintos: *node*, quando o dispositivo é conectado a um sensor para envio da mensagem; ou *gateway*, quando em configuração para recebimento de informações dos sensores de monitoramento do sistema (*sensor nodes*), redirecionando os dados coletados para armazenamento no BD, em nuvem via protocolo MQTT. Além disso, é proposto o desenvolvimento de uma IHM, hospedada em nuvem e utilizando as linguagens *HyperText Markup Language* (HTML) e JavaScript (JS). A IHM permite telemetria da instrumentação da ETA de qualquer lugar e em qualquer dispositivo portátil. O sistema proposto encontra-se em funcionamento em seis ETAs: autarquia municipal de Mogi Guaçu/SP e outras cinco unidades da Iguá Saneamento distribuídas nos estados de Alagoas, Mato Grosso, Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo.

1.2 Objetivos

A seguir, são apresentados os objetivos geral e específicos desta dissertação.

1.2.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver um sistema de telemetria baseado em RSSFs e IoT para ETAs que possibilite a aquisição de informações em tempo real sobre os parâmetros de qualidade e operação do processo de floculação da água, integrando *hardware* e *software* para coleta e transmissão de dados a uma interface na nuvem.

1.2.2 Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos desta dissertação, é possível mencionar:

- Projetar e implementar um sistema microcontrolado capaz de operar em modo *node* e *gateway* conectado sensores utilizando protocolos de comunicação como RS485 e LoRa:
 - Identificar os tipos de sensores necessários para o monitoramento das variáveis críticas no processo de tratamento de água;
 - Determinar as especificações de comunicação e os protocolos que o sistema deve suportar;

- Selecionar um microcontrolador com suporte para interfaces de comunicação RS485 e LoRa;
 - Configurar o microcontrolador do rádio para operar em diferentes modos: modo *node* para coleta e envio de dados dos sensores e modo *gateway* para receber e retransmitir dados para nuvem;
 - Projetar o circuito do *hardware* integrando o microcontrolador com demais módulos da PCB;
 - Implementar um conversor de tensão adequado para garantir a compatibilidade dos sinais de comunicação e evitar danos ao *hardware*;
 - Configurar as interfaces UART e RS485 para conectar e obter leituras dos sensores distribuídos;
 - Configurar o módulo LoRa para criar uma LPWAN e definir modos de operação (*node* e *gateway*);
 - Programar o *firmware* para o modo *node*, incluindo funcionalidades para: leitura periódica dos dados dos sensores, armazenamento temporário dos dados em um *buffer* e transmissão dos dados para o *gateway* por meio do módulo LoRa;
 - Programar o *firmware* para o modo *gateway*, incluindo funcionalidades para: recepção dos dados dos *nodes* e retransmissão ao servidor na nuvem e armazenamento dos dados no cartão SD em caso de falhas de conexão com a nuvem.
 - Realizar testes de comunicação entre os *nodes* e o *gateway*, garantindo a precisão dos dados transmitidos e a estabilidade da rede LoRa;
 - Implementar testes de falhas para garantir que o sistema armazene os dados localmente em caso de interrupção na conexão com a nuvem.
- Desenvolver uma interface de monitoramento que permita a visualização e telemetria dos dados em tempo real por meio de uma plataforma *web*:
 - Identificar as informações e variáveis críticas que precisam ser monitoradas em tempo real;
 - Determinar os requisitos de usabilidade para a interface e a acessibilidade dos dados de qualquer localização;
 - Selecionar *frameworks* e linguagens adequadas para desenvolvimento de interfaces *web* em tempo real;
 - Configurar um servidor em nuvem para hospedar a aplicação *web* e o BD onde os dados dos sensores serão armazenados;

- Integrar o servidor com o *broker* MQTT para receber e gerenciar dados dos sensores em *soft real time*;
 - Criar o *layout* e os componentes de visualização da interface, incluindo gráficos para apresentar as variáveis monitoradas;
 - Programar a interface para atualizar os dados em *soft real time* com base nas mensagens recebidas via MQTT;
 - Configurar um banco de dados para armazenar dados históricos das leituras, permitindo a recuperação e análise posterior;
 - Realizar testes de desempenho para garantir que a interface carregue rapidamente e atualize os dados sem interrupções;
- Validar a solução proposta em ambiente relevante para verificar a eficácia do sistema de monitoramento, identificando e solucionando problemas operacionais comuns.
 - Avaliar o desempenho do sistema e sua capacidade de comunicação e transmissão de dados em condições operacionais diversas, especialmente em ambientes desafiadores do setor de saneamento.

1.3 Contribuições e Publicações

As contribuições desta dissertação estão inseridas no contexto do projeto *Plataforma IoT para Controle de Dosagem e Estoques de Químicos em ETA/ETEs*, realizado pela *start-up* paulista Conatus Ambiental, com apoio do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) por meio desta dissertação defendida pelo Programa de Pós-Graduação em Automação e Sistemas (PPGAS).

Uma contribuição consiste no estudo e análise de técnicas para telemetria em ambientes industriais no setor de saneamento, permitindo o monitoramento contínuo de variáveis críticas, armazenamento e tratamento de dados e controle de dosagem de químicos, e assim possibilitando a qualidade e a continuidade do fornecimento de água.

Os resultados dos estudos e desenvolvimentos realizados durante o mestrado foram publicados em dois artigos de congresso:

- [LIMA et al., 2024] L. C. Gonçalves, L. O. M. Lima, G. C. Menezes e L. S. de Oliveira. *Monitoramento de ETAs e Dosagem de Químicos: Uma Abordagem via Arquitetura IoT*. In XXV Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 2024. Nesse trabalho, foram desenvolvidos os *hardware* e *software* para aquisição de dados do processo de tratamento de água via sensores e transmissão dessas informações mensuradas para uma estrutura de servidor, banco de dados e interface de comunicação

com o usuário hospedados em nuvem. O arcabouço foi testado em um sensor via protocolo de comunicação UART e mostrou-se capaz de realizar o monitoramento das variáveis deste sensor.

- [GONCALVES et al., 2024] L. O. M. Lima, L. C. Gonçalves, G. C. Menezes, L. S. de Oliveira. *IoT-based Wireless Sensor Networks for Monitoring Drinking Water Treatment Plants*. In 2024 Symposium on IoT (SIoT), 2024. Nesse trabalho, o mesmo arcabouço é apresentado, porém ele, além de testado no sensor via protocolo de comunicação UART, foi utilizado também para aquisição de dados em outro sensor via protocolo RS485 e mostrou-se gerar um conjunto de informações ao longo do tempo sobre o processo.

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, cujos conteúdos são descritos a seguir.

O Capítulo 2 reúne a revisão bibliográfica necessária para o entendimento e fundamentação do trabalho. Nele, são abordados os conceitos e as tecnologias relacionadas ao monitoramento de ETAs, incluindo RSSFs, IoT, e protocolos de comunicação. Também são discutidos os desafios operacionais em ETAs, como a variabilidade das características da água bruta e as dificuldades na dosagem de químicos.

O Capítulo 3 descreve a metodologia e os materiais utilizados no desenvolvimento da solução proposta. Este capítulo detalha o projeto do *hardware*, incluindo a PCB desenvolvida, os sensores integrados e as interfaces de comunicação. Além disso, apresenta-se a arquitetura da plataforma de monitoramento em nuvem baseada em serviços da AWS, bem como as IHMs projetadas para facilitar a telemetria em ETAs.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir da implementação e validação da solução proposta. Inicialmente, descreve-se o *hardware* implementado, destacando suas características e aplicações. Em seguida, são apresentados os resultados de testes comparativos realizados com um turbidímetro comercial e o turbidímetro integrado ao sistema, evidenciando a confiabilidade dos dados. Por fim, o capítulo detalha dois estudos de caso: o primeiro realizado em ambiente controlado, avaliando a integração de múltiplos sensores e o segundo conduzido na ETA de Mogi Guaçu/SP, demonstrando a aplicabilidade do sistema em condições reais de operação.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões da dissertação, sintetizando os resultados alcançados e destacando as contribuições do trabalho para o setor de saneamento. Além disso, são discutidas as limitações enfrentadas e propostas direções para

trabalhos futuros, incluindo aprimoramentos no *hardware*, no protocolo de comunicação e na integração de novos serviços em nuvem e sensores adicionais.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta inicialmente uma revisão bibliográfica sobre o tratamento de água, apresentando um breve histórico sobre o seu surgimento e evolução, além de abordar os desafios atuais, como a sustentabilidade hídrica e o envelhecimento da infraestrutura das ETAs. Em seguida, as RSSFs são abordadas. Na sequência, é realizado um estudo sobre IoT e as implicações de uso de tal tecnologia. Por último, é apresentado o estado da arte da utilização de RSSF e IoT no tratamento de água, bem como algumas pesquisas sobre o tema.

2.1 Processo de Tratamento de Água

O tratamento de água potável é uma prática antiga e consolidada que permanece relevante e é cada vez mais promovida por organizações internacionais, governos e o setor privado. Essa abordagem visa melhorar a qualidade microbiológica da água destinada ao consumo humano, preparo de alimentos e higiene pessoal em diversos ambientes, como domicílios, escolas e unidades de saúde. Além disso, o tratamento local da água é amplamente utilizado em situações como viagens, operações de campo, resposta a emergências e desastres, bem como em contextos onde outras opções de fornecimento de água segura são inviáveis ou insuficientes. Estudos e análises globais apontam que essas estratégias podem melhorar significativamente a qualidade da água consumida e reduzir a incidência de doenças relacionadas à ingestão de água contaminada em cerca de 30% a 40% (FEWTRELL et al., 2005; CLASEN et al., 2007).

Angelakis, Voudouris e Tchobanoglous (2020) apresentam uma rica análise histórica sobre o tratamento de água, começando nos tempos pré-históricos, quando as práticas eram voltadas principalmente para melhorar características estéticas, como a redução da turbidez. Civilizações como a Minoica, em Creta, utilizavam técnicas rudimentares, como a decantação e a filtração com areia, para tratar a água da chuva coletada e armazenada em cisternas. No Egito, desenvolveu-se o conceito de coagulação, utilizando alúmen para sedimentar partículas suspensas, uma inovação significativa para a época.

Durante os períodos históricos, o crescimento das populações urbanas na Grécia Antiga levou ao desenvolvimento de aquedutos, cisternas e filtros de areia para a distribuição e purificação da água. Hipócrates, renomado médico grego, introduziu a "manga hipocrática", um dispositivo de tecido usado para filtrar água fervida, representando uma das primeiras tecnologias de filtragem sistemática. Na Roma Antiga, a engenharia hidráulica atingiu seu auge, com a construção de aquedutos, sistemas de esgoto e tanques

de sedimentação, tecnologias que influenciaram diretamente os sistemas de saneamento e abastecimento de água em várias regiões da Europa (ANGELAKIS; VOUDOURIS; TCHOBANOGLOUS, 2020).

Na Idade Média, houve pouco avanço no tratamento de água devido à estagnação científica. As cidades dependiam de poços e rios para abastecimento, frequentemente contaminados por resíduos, o que agravava os problemas de saúde pública. O renascimento dos avanços tecnológicos só ocorreu entre os séculos XV e XIX, com o surgimento de sistemas de tratamento mais sofisticados. Em 1804, foi documentado na Escócia o uso de filtros de areia em larga escala para purificar água potável, seguido, em Paris, por sistemas que utilizavam filtração com areia e carvão para melhorar a qualidade da água (ANGELAKIS; VOUDOURIS; TCHOBANOGLOUS, 2020).

No século XX, o tratamento de água sofreu uma revolução com a introdução da desinfecção por cloro e a expansão de outras tecnologias modernas, reduzindo drasticamente as doenças de origem hídrica em cidades ao redor do mundo (ANGELAKIS; VOUDOURIS; TCHOBANOGLOUS, 2020).

No Brasil, a história do tratamento de água e saneamento básico teve início com a construção de um poço por Estácio de Sá em 1561 e avançou com a implementação do primeiro aqueduto em 1750, os Arcos da Lapa, para transportar água do Rio Carioca ao centro do Rio de Janeiro (HERMANN, 2012). Durante o período colonial, o abastecimento era realizado de forma rudimentar, com vilas sendo responsáveis por captar e distribuir água por meio de fontes e chafarizes. A partir do século XIX, inspirado por conceitos higienistas e sanitaristas, o saneamento passou a ser visto como um instrumento de saúde pública, levando governos e agentes privados a investir em infraestrutura e criar códigos sanitários que regulamentavam moradias insalubres, gerando significativas mudanças nas cidades (PULHEZ; MARQUES, 2020).

No início do século XX, a iniciativa privada predominava na gestão dos serviços de saneamento nas grandes cidades, como no caso da Companhia City no Rio de Janeiro, responsável por esgoto e outros serviços urbanos durante o Segundo Reinado e parte do período republicano (PULHEZ; MARQUES, 2020). Com a expansão urbana nos anos 1930, o poder público ampliou investimentos em infraestrutura, marcados pela criação do Código de Águas em 1934, que regulamentou a gestão de recursos hídricos no país (BRASIL, 1934; SILVA, 1998). Em 1953, o governo Getúlio Vargas modernizou o saneamento com o primeiro Plano Nacional de Financiamento para Abastecimento de Água, criando serviços municipais de saneamento, ainda que com desigualdades regionais devido à falta de padronização nacional (REZENDE; HELLER, 2002; PULHEZ; MARQUES, 2020).

O Plano Nacional de Saneamento (PLANASA), criado em 1971, marcou a centralização das políticas do setor, mas foi extinto em 1992 em meio a uma crise econômica

e com incentivos à privatização (REZENDE; HELLER, 2002). Nos anos 2000, políticas nacionais começaram a ser estruturadas, como a criação da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental em 2003, e a aprovação da Lei Nacional de Saneamento Básico (Lei n. 11.445/2007), que estabeleceu diretrizes para planejamento, fiscalização e participação social na gestão dos serviços (SANTOS, 2023). Essas iniciativas refletem a evolução histórica do saneamento no Brasil, sempre influenciada pelas demandas de saúde pública e pelos desafios urbanos.

Em 2020, a Lei de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007) foi alterada pela Lei nº 14.026. A nova lei trouxe mudanças significativas, incluindo a definição de saneamento básico como o conjunto de quatro serviços públicos: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, além do manejo de águas pluviais urbanas, conforme o artigo 3º, inciso I. O objetivo central da alteração foi a universalização dos serviços de água e esgoto até 2033, promovendo a ampliação de investimentos privados no setor (BRASIL, 2020; FUNASA, 2019).

O tratamento de água potável tem uma longa trajetória histórica, evoluindo desde práticas rudimentares voltadas para a melhoria estética da água até os processos modernos que garantem segurança microbiológica e química. Esses avanços refletem esforços conjuntos de diferentes civilizações ao longo dos séculos, culminando nas tecnologias sofisticadas utilizadas hoje em dia, como as descritas por Angelakis, Voudouris e Tchobanoglous (2020).

No Brasil, esse histórico de evolução tecnológica foi incorporado e adaptado às necessidades locais, acompanhando o crescimento populacional e urbano do país. Atualmente, os sistemas de ciclo completo, amplamente empregados nas ETAs, representam o ápice dessa evolução. Os processos de tratamento em ETAs de ciclo completo geralmente incluem as etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração. Na coagulação e floculação, substâncias químicas como sais de ferro e alumínio, cal, cloro e polímeros são adicionadas à água bruta para facilitar a aglomeração de partículas e otimizar as etapas subsequentes. Nos decantadores, essas partículas formam flocos que sedimentam, permitindo que a água na parte superior do tanque fique mais clara. Em seguida, na etapa de filtração, os flocos remanescentes são removidos, produzindo uma água com qualidade adequada para consumo, necessitando apenas de desinfecção, ajuste de pH e fluoretação antes da distribuição. No Brasil, a fluoretação da água é uma exigência legal estabelecida pela Portaria nº 518/2004, posteriormente atualizada e substituída pela Portaria nº 888/2021, ambas do Ministério da Saúde (BRASIL, 2004; Brasil, 2021).

Esse método de tratamento de água começou a ser amplamente adotado no final do século XIX, inicialmente na Europa e nos Estados Unidos, como resposta a surtos de doenças transmitidas pela água, como cólera e febre tifoide. No Brasil, o modelo de tratamento em ETAs foi implementado de forma sistemática a partir das primeiras décadas do

século XX, acompanhando o avanço das políticas de saneamento básico e a necessidade de garantir água potável para as populações urbanas em expansão (GUEDES et al., 2017).

Dada a evolução histórica do tratamento de água e os avanços incorporados nas ETAs ao longo das décadas, fica evidente que o Brasil desenvolveu um modelo robusto para garantir a qualidade da água potável. No entanto, a manutenção desse padrão de excelência exige constante adaptação às novas realidades urbanas, às demandas crescentes e às incertezas relacionadas às mudanças climáticas. Paralelamente, o avanço das tecnologias emergentes e das ferramentas da chamada Indústria 4.0, como a IoT, a IA e as RSSFs, tem transformado diversos setores industriais, promovendo maior eficiência, automação e precisão.

Contudo, como destacado por Merlo (2022), a indústria de saneamento no Brasil ainda apresenta resistência à incorporação dessas inovações tecnológicas. A ausência de monitoramento contínuo e a dependência de análises laboratoriais convencionais prolongam o tempo de resposta a problemas críticos, como oscilações na qualidade da água bruta e falhas no processo de dosagem química. Esses desafios tornam-se ainda mais evidentes em cenários de alta variabilidade, como durante períodos de chuva intensa, quando as mudanças nas características da água ocorrem em ritmo acelerado, comprometendo a eficácia de métodos tradicionais como os testes de jarro (TSUTIYA, 2002; WONG et al., 2021).

Além disso, as limitações na capacitação dos operadores e a suscetibilidade a erros humanos evidenciam a necessidade de sistemas mais integrados e automatizados (ACHITE et al., 2023). Essas ferramentas podem não apenas mitigar falhas, mas também otimizar o processo, garantindo uma operação mais segura e eficiente, especialmente em momentos de alta demanda.

Para superar essas limitações e acompanhar as tendências tecnológicas globais, torna-se essencial explorar e implementar soluções modernas baseadas em RSSFs e IoT. Essas tecnologias podem fornecer uma base sólida para o monitoramento em tempo real, a análise preditiva e a tomada de decisões automatizada no contexto do tratamento de água. A seção seguinte abordará, em detalhe, a tecnologia IoT como um conceito integrador e habilitador de uma transformação digital mais ampla, inclusiva nas ETAs, destacando suas vantagens e desafios. Posteriormente, serão apresentadas as RSSFs, explorando seus princípios e potencial de aplicação, inclusive no setor de saneamento.

2.2 Internet das Coisas

O conceito de IoT foi introduzido por Kevin Ashton em 1999 para descrever como a adição de sensores e identificadores por radiofrequência, do inglês *Radio Frequency*

Identification (RFID), a objetos cotidianos poderia conectar o mundo físico ao digital, permitindo que tais objetos “comunicassem” informações sobre si mesmos e o ambiente em que estão inseridos (ASHTON et al., 2009). Com o avanço das tecnologias de comunicação e processamento de dados, a IoT evoluiu para uma infraestrutura complexa, composta por dispositivos físicos equipados com sensores, conectados a sistemas computacionais que coletam, processam e transmitem informações em tempo real. Essa conexão constante entre o físico e o virtual possibilita a criação de ambientes inteligentes, automatizados e adaptativos (NG; WAKENSHAW, 2017; NORD; KOOHANG; PALISZKIEWICZ, 2019).

De maneira ampla, a IoT pode ser compreendida como um ecossistema digital que interliga objetos e sistemas, permitindo que eles compartilhem dados e desempenhem ações autônomas. Uma representação abrangente desse ecossistema pode ser observada na Figura 2.1a, que ilustra os principais blocos funcionais de um sistema IoT, incluindo os dispositivos sensores, os *gateways*, a infraestrutura de rede e os servidores em nuvem, que processam e analisam os dados coletados em tempo real. Essa interconexão promove uma transformação significativa na interação com o ambiente ao redor, ao converter objetos antes passivos em componentes “inteligentes”, capazes de responder de maneira personalizada com base nos dados coletados e analisados (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). Segundo Ng e Wakenshaw (2017), essa “materialidade digital” dos objetos conectados confere a eles a capacidade de monitorar, atuar e se adaptar dinamicamente ao contexto em que estão inseridos.

Além de redefinir as possibilidades de automação e controle, a IoT apresenta características fundamentais, como a conectividade ubíqua, que permite a troca contínua de informações entre os dispositivos; a identificação única de cada componente conectado, garantindo rastreabilidade e monitoramento; e a capacidade de processamento em tempo real, viabilizada por sensores e sistemas computacionais interligados (MIORANDI et al., 2012; NORD; KOOHANG; PALISZKIEWICZ, 2019). A Figura 2.1b apresenta uma arquitetura baseada em três camadas, composta pela camada de dispositivos IoT, camada *fog* (em névoa) e camada em nuvem. Essa organização permite reduzir a latência de processamento, uma vez que a camada *fog* realiza o pré-processamento dos dados mais próximos dos dispositivos antes de enviá-los para a nuvem.

Por outro lado, uma visão mais detalhada e hierarquizada do sistema IoT é exibida na Figura 2.1c, que propõe uma arquitetura de cinco camadas. Essa arquitetura é inspirada no modelo de referência *Open Systems Interconnection* (OSI), amplamente utilizado em redes de comunicação para padronizar a interação entre sistemas heterogêneos. O modelo OSI organiza as funções de rede em sete camadas hierárquicas, permitindo uma separação modular das tarefas, onde cada camada oferece serviços para a camada superior e utiliza os serviços da camada inferior.

No contexto da IoT, a arquitetura de cinco camadas apresentada na Figura 2.1c

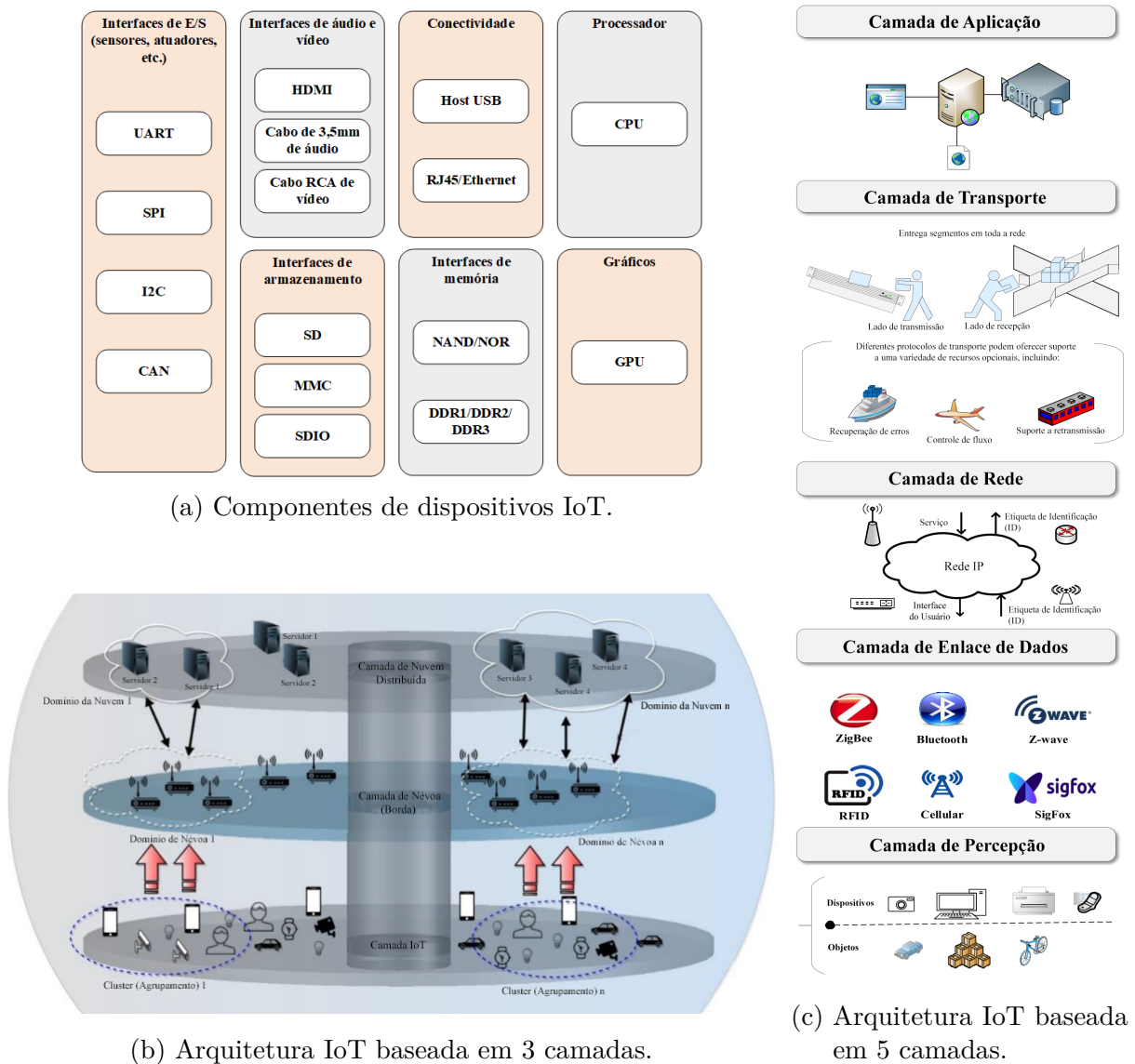


Figura 2.1 – Visão geral dos componentes e arquiteturas de dispositivos IoT (Fonte: Adaptado de KASSAB; DARABKH, 2020).

segue uma abordagem semelhante ao modelo OSI (KASSAB; DARABKH, 2020), organizando as operações em camadas funcionais que facilitam a comunicação e o processamento de dados:

- **Camada de Percepção:** Equivalente à camada física do modelo OSI, é responsável por capturar os dados do ambiente por meio de sensores e dispositivos.
- **Camada de Enlace de Dados:** Garante a transmissão local dos dados com o uso de protocolos adequados, como Bluetooth, ZigBee ou LoRa.
- **Camada de Rede:** Corresponde à camada de rede do modelo OSI, sendo encarregada do roteamento dos pacotes de dados entre os dispositivos e os sistemas centrais.

- **Camada de Transporte:** Semelhante à camada de transporte do modelo OSI, assegura a entrega confiável dos dados por meio de protocolos como *Transmission Control Protocol* (TCP)/*User Datagram Protocol* (UDP).
- **Camada de Aplicação:** Fornece os serviços e interfaces para os usuários finais, permitindo a visualização, análise e controle dos dados processados.

Essa segmentação modular facilita a integração, escalabilidade e gerenciamento das soluções IoT, pois cada camada é projetada para executar funções específicas, garantindo a eficiência e a interoperabilidade dos sistemas conectados. Além disso, a estrutura hierárquica permite que atualizações e melhorias sejam implementadas em camadas individuais, sem afetar o funcionamento das demais. Esses elementos conferem à IoT um papel central na criação de sistemas mais eficientes e integrados em diversas áreas, como indústria, cidades inteligentes, saúde e saneamento.

No entanto, apesar de seu potencial transformador, a implementação da IoT enfrenta desafios significativos, que precisam ser superados para garantir sua eficácia e aceitação em larga escala. A segurança é um dos principais obstáculos, uma vez que a interconexão massiva de dispositivos expande as vulnerabilidades a ataques cibernéticos, exigindo a implementação de mecanismos robustos de proteção (RAO; DEEBAK, 2023; SHIRVANI; MASDARI, 2023). Outro desafio é a privacidade dos dados, pois a coleta contínua de informações pessoais e contextuais levanta questões éticas e legais quanto ao uso e armazenamento dessas informações (GUPTA; JOSHI, 2023; LIU et al., 2024).

A interoperabilidade também surge como um ponto crítico, devido à falta de padronização entre os dispositivos e as plataformas utilizadas na infraestrutura IoT. Essa heterogeneidade dificulta a integração e a comunicação eficaz entre diferentes sistemas, limitando o alcance e a escalabilidade das soluções conectadas (NORD; KOOHANG; PALISZKIEWICZ, 2019; SAIDALA et al., 2024). Além disso, o gerenciamento do grande volume de dados gerados pelos dispositivos conectados exige a adoção de soluções tecnológicas avançadas, como algoritmos de IA e computação em nuvem, para viabilizar o armazenamento, processamento e análise eficientes dessas informações (MIORANDI et al., 2012).

Apesar desses desafios, a IoT tem sido amplamente estudada e aplicada em diferentes contextos, demonstrando seu potencial de impacto em setores essenciais. Na indústria 4.0, por exemplo, Kim (2017) examinou a integração de sistemas ciberfísicos, do inglês *Cyber Physical Systems* (CPS), na Indústria 4.0, juntamente com o uso de *big data*, IoT e computação em nuvem. O estudo apresentou uma visão geral das aplicações desses sistemas, bem como os desafios relacionados à segurança e à interoperabilidade entre dispositivos. Além disso, Manavalan e Jayakrishna (2019) investigaram o impacto da IoT no gerenciamento da cadeia de suprimentos, demonstrando como a tecnologia

pode ajudar a atender às demandas dos consumidores e propondo recomendações para o desenvolvimento de cadeias de suprimentos sustentáveis.

Em cidades inteligentes, soluções baseadas em IoT são utilizadas para gerenciar o tráfego, Ponnusamy e Alagarsamy (2023) propõem um sistema de robótica assistida pela IoT para o controle de tráfego em cidades inteligentes. A arquitetura desenvolvida integra sensores e robôs para monitorar o fluxo de veículos e detectar comportamentos anômalos em tempo real. Utilizando plataformas como Arduino e Raspberry Pi, a comunicação entre os dispositivos é realizada via protocolo MQTT. A pesquisa demonstrou que o sistema proposto melhora significativamente a gestão do tráfego, reduzindo atrasos e aumentando a eficiência na entrega de dados em comparação com métodos convencionais.

A monitorização da qualidade do ar também tem ganhado destaque nas cidades inteligentes com o avanço da IoT. Aserkar et al. (2024) propuseram uma solução baseada em IoT para monitorar poluentes críticos à saúde humana, como amônia, dióxido de carbono e material particulado PM2.5, utilizando sensores acessíveis e o microcontrolador ESP-WROOM-32 para comunicação via Wi-Fi e Bluetooth. Integrado à AWS, o sistema permite o acompanhamento em tempo real e alertas imediatos quando os níveis de poluição excedem os limites recomendados. Essa abordagem melhora significativamente o monitoramento da qualidade do ar em cidades inteligentes, garantindo uma resposta rápida e preventiva à poluição.

Na área da saúde, dispositivos conectados possibilitam o monitoramento remoto de pacientes e a automação de diagnósticos, contribuindo para a melhoria dos cuidados médicos e a redução de custos hospitalares (NORD; KOOHANG; PALISZKIEWICZ, 2019). Gopi et al. (2024) desenvolveram um sistema de monitoramento de saúde para idosos utilizando a IoT, com foco em melhorar a qualidade de vida e o gerenciamento remoto da saúde. O sistema utiliza sensores para medir temperatura corporal, frequência cardíaca e nível de oxigênio no sangue, enviando os dados coletados pelo controlador ESP8266 – *Node Micro-Controller Unit* (MCU) – para a plataforma ThinkSpeak. A análise dos dados permite monitoramento contínuo e localização via *Global Positioning System* (GPS), oferecendo suporte eficiente em hospitais, lares de idosos e para pessoas com limitações físicas.

Além disso, Parameshchari et al. (2023) propuseram um sistema de monitoramento de saúde baseado em IoT, capaz de realizar monitoramento em tempo real dos sinais vitais e de fatores ambientais em pacientes. O sistema utiliza cinco sensores, responsáveis por medir frequência cardíaca, temperatura corporal, temperatura ambiente, níveis de monóxido de carbono e dióxido de carbono, integrados a uma plataforma que envia atualizações contínuas ao corpo médico para diagnósticos e cuidados adicionais. A pesquisa também explorou técnicas inovadoras para a construção automática de Rede Neural Convolucional (RNC) para melhorar a precisão diagnóstica, apresentando resulta-

dos superiores em comparação com métodos convencionais. Essas abordagens evidenciam o impacto da IoT na expansão das capacidades de telemedicina, oferecendo suporte mais preciso e eficiente no atendimento hospitalar e remoto.

Assim, é possível perceber a necessidade de um esforço colaborativo entre pesquisadores e profissionais para enfrentar os desafios técnicos e práticos da IoT. Conforme apontado por Sicari et al. (2015), a construção de um ambiente IoT confiável depende do desenvolvimento de padrões interoperáveis, políticas de segurança robustas e soluções que respeitem a privacidade dos usuários. Além disso, estudos recentes sugerem que a IoT tem potencial para redefinir não apenas processos industriais e urbanos, mas também a forma como as pessoas interagem com seu ambiente, criando novas oportunidades econômicas e sociais (NG; WAKENSHAW, 2017; NORD; KOOHANG; PALISZKIEWICZ, 2019).

Assim, a IoT representa um avanço tecnológico significativo, capaz de integrar e transformar os sistemas existentes por meio da conectividade e automação. No entanto, para que suas aplicações sejam efetivas e sustentáveis, é essencial o desenvolvimento de soluções que equilibrem inovação, segurança e privacidade. Nesse contexto, as RSSFs desempenham um papel crucial na infraestrutura da IoT, uma vez que possibilitam a coleta, processamento e transmissão de dados em tempo real, oferecendo suporte para aplicações em áreas como saúde, monitoramento ambiental, indústria e cidades inteligentes. A seguir, serão discutidos os principais conceitos, características e desafios associados às RSSFs, destacando sua relevância na expansão e implementação de soluções baseadas em IoT.

Além dos desafios enfrentados pela IoT, as tecnologias de comunicação utilizadas desempenham um papel crucial em sua aplicação prática. A Figura 2.2 apresenta um resumo das principais tecnologias sem fio, organizadas de acordo com o alcance de suas redes, desde conexões de proximidade até redes de longo alcance. Essas tecnologias são fundamentais não apenas para a IoT, mas também para as RSSFs, que serão discutidas na seção seguinte.

2.3 Redes de Sensores sem Fio

A RSSF é um dos métodos mais eficazes para muitas aplicações em tempo real, devido à sua compactação, custo-benefício e facilidade de implantação (WAZIRALI et al., 2021). A função da RSSF é monitorar o campo de interesse, coletar os dados e transmiti-los para a estação base (ponto de acesso) para análise pós-processamento (BOUAZIZ; RACHEDI, 2016).

A segurança e o consumo de energia são alguns dos maiores desafios nas RSSFs, pois cada um afeta negativamente o outro. O aumento da complexidade de segurança de

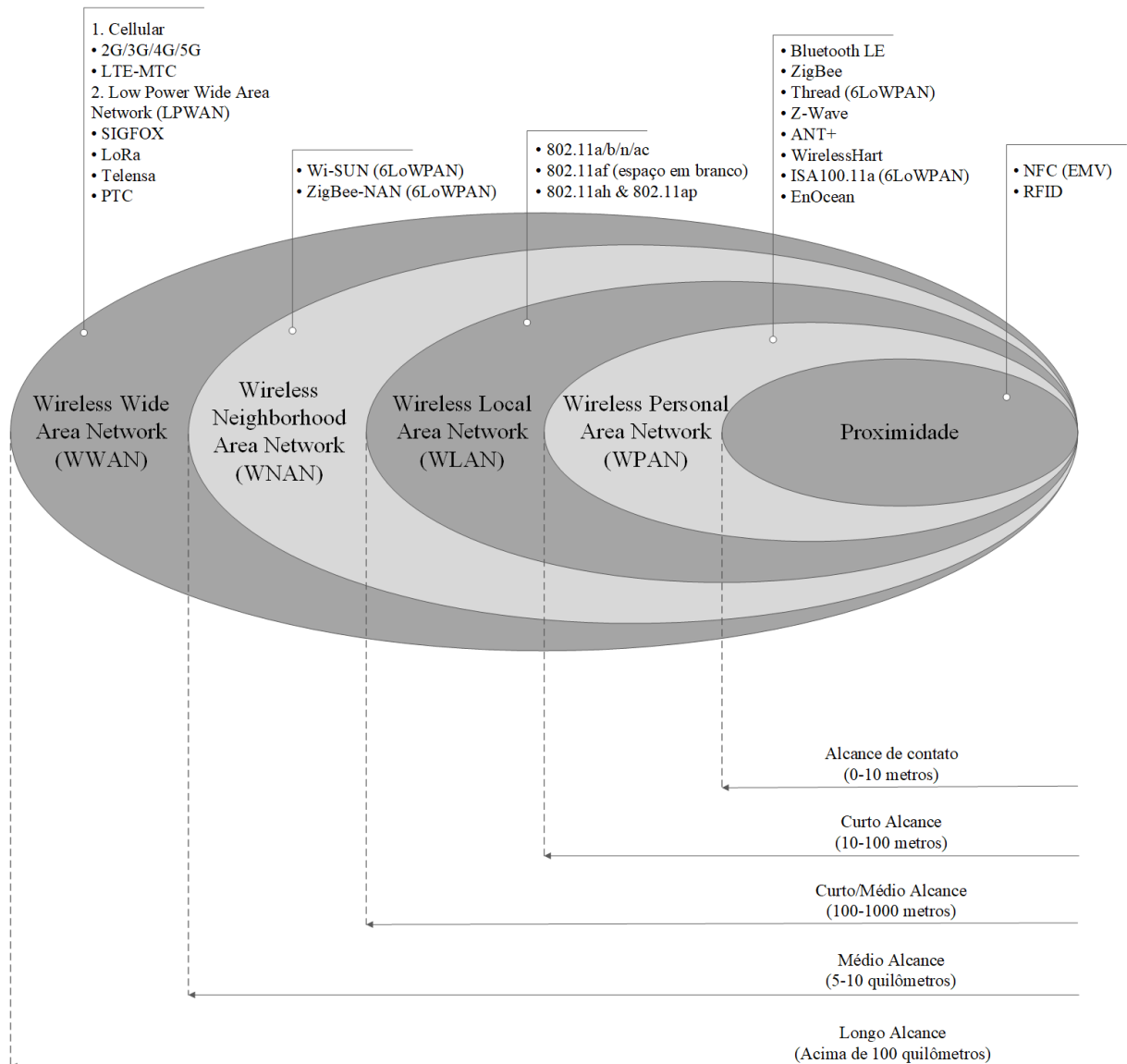


Figura 2.2 – Tecnologias de conectividade IoT sem fio (Fonte: Adaptado de KASSAB; DARABKH, 2020).

uma RSSF aumenta o consumo de energia de um nó e vice-versa. Dado os ambientes desafiadores nos quais esses sensores podem operar, a necessidade de reduzir tanto o consumo de energia quanto a complexidade de segurança é um dos desafios que os estudos recentes nesse campo estão abordando (KHASHAN; AHMAD; KHAFAJAH, 2021; AHMAD; SUNDARARAJAN; ABU-AIN, 2021).

Um nó sensor típico é composto por quatro unidades principais: a unidade de processamento, a unidade de sensoriamento/identificação, a unidade de comunicação e a unidade de fornecimento de energia (HEALY; NEWE; LEWIS, 2008; FAHMY, 2016), conforme mostrado na Figura 2.3. Os componentes mencionados têm elementos secundários, como filtros, amplificadores, transdutores, comparadores, entre outros. O dispositivo de sensoriamento coleta/detecta dados do ambiente de trabalho. A unidade de processa-

mento realiza várias tarefas de manipulação de dados, como coleta de dados, enquanto a unidade de comunicação transmite dados para as estações-base, e a unidade de energia, geralmente uma bateria de capacidade limitada, fornece energia para todos os outros dispositivos.

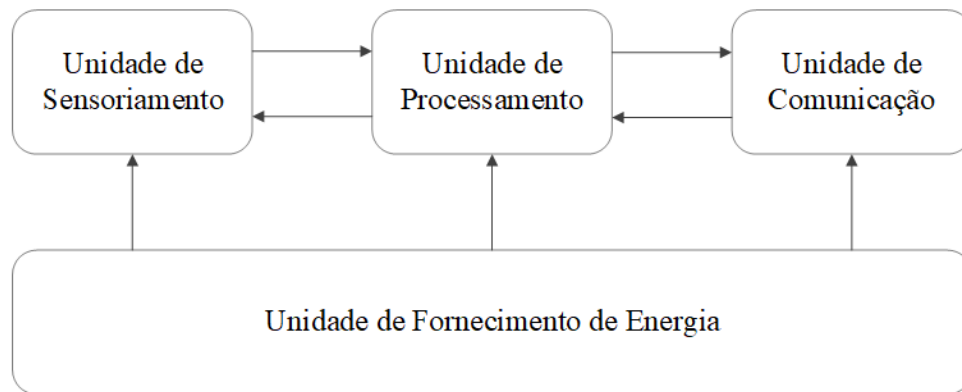


Figura 2.3 – Uma arquitetura típica de nó-sensor baseada em IoT.

Esses módulos em tempo real, como sensores, estão interconectados para transmitir dados coletados a repositórios centralizados, onde os dados são armazenados cumulativamente e acessíveis para usuários autorizados. Em comparação com sistemas de redes com ou sem fio convencionais, as características da IoT utilizando tecnologias sem fio são um pouco diferentes, já que o número de dispositivos de comunicação é bastante alto (KIM; KYUE, 2012). No entanto, o tráfego baseado em IoT geralmente não é muito crítico porque cada dispositivo coleta e transmite alguns dados para um respectivo servidor, de modo que os dados produzidos por um grande número de objetos podem, coletivamente, ter alguns efeitos na eficiência da rede. Assim, as RSSFs, que conectam uma ampla variedade de sensores inteligentes, tornaram-se a base para sistemas baseados em IoT, promovendo melhorias significativas para o futuro próximo (ABDUL-QAWY; ALMURISI; TADISSETTY, 2020).

A principal vantagem da IoT é a conscientização global, o processamento inteligente e a transferência confiável de informações. A chave é a realização das interações da informação entre um ser humano e um dispositivo ou entre dispositivos. Os dados podem ser transferidos através de diferentes redes sem a necessidade de intervenção humana. As aplicações IoT geralmente consistem em três camadas: percepção, rede e aplicação (ZHANG et al., 2017). As camadas de rede e aplicação são implementadas em dispositivos de alta potência que mantêm os dados seguros, enquanto a camada de percepção é implementada em uma RSSF de baixo consumo de energia. A RSSF consiste em múltiplos nós de sensores que se comunicam entre si usando diferentes frequências de rádio, capazes de realizar várias tarefas de sensoriamento, vigilância, medição e rastreamento (YI et al., 2019). Esses nós sem fio são dispositivos com recursos limitados, caracterizados por seu baixo poder de processamento, largura de banda reduzida, vida útil limitada da

bateria e capacidade de memória restrita (KHASHAN; AHMAD; KHAF AJAH, 2021). A comunicação entre as camadas da RSSF é ilustrada na Figura 2.4.

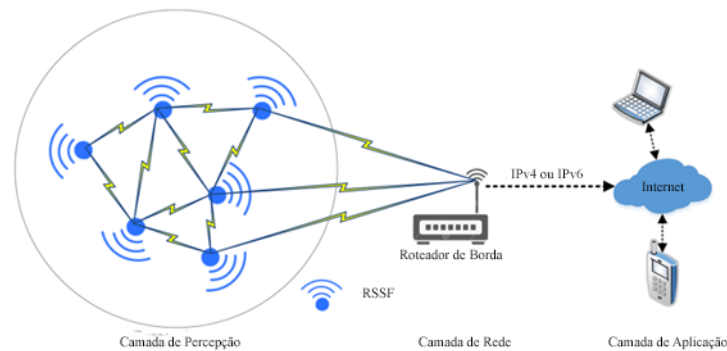


Figura 2.4 – Comunicação entre as camadas da RSSF.

De acordo com a Figura 2.4, as redes de sensores sem fio são responsáveis por traçar a topologia da rede e atualizar a tabela de roteamento na camada de percepção usando diferentes protocolos para manter a infraestrutura da rede (KUMAR; TIWARI, 2012). Em seguida, a RSSF começa a coletar dados de diferentes locais e os envia para a camada de rede (roteador de borda). Os nós da RSSF são o bloco básico de construção dessa camada e compartilham algumas características que os distinguem de outras redes sem fio (PATEL; KUMAR, 2018). Dentre essas características, destacam-se as seguintes: nós independentes sem controle central, nós estacionários ou móveis, faixa de transmissão limitada dos nós, topologia de rede em constante mudança, conexões de múltiplos saltos e largura de banda limitada.

Por outro lado, os nós da RSSF geralmente operam em ambientes não confiáveis e não monitorados regularmente. É devido a essa vulnerabilidade que dados valiosos podem ser facilmente vazados para partes não autorizadas, gerando grandes problemas de segurança e privacidade (ZHANG; HEYS; LI, 2012).

Com base nas características e desafios apresentados, é essencial compreender os principais avanços e trabalhos desenvolvidos no campo das RSSFs. Estudos recentes têm explorado diversos aspectos dessas redes, abordando desafios como eficiência energética, confiabilidade, segurança e aplicabilidade em diferentes cenários. A seguir, discute-se a contribuição de alguns trabalhos relevantes para este campo.

Diversos autores têm concentrado esforços em aumentar a eficiência energética das RSSFs, considerando que os nós sensores geralmente dependem de baterias de capacidade limitada. Por exemplo, Priyanga, Vimalraj e Lydia (2018) propuseram uma abordagem que distribui uniformemente o consumo de energia entre os nós sensores, utilizando algoritmos de formação e rotação de *clusters*, bem como mecanismos de comunicação de longo alcance para aumentar a vida útil da rede.

No que tange à segurança, Gashi, Luma e Januzaj (2022), Ngwenya e Ngoepe

(2020), Caudill (2019) destacam a importância do modelo Confidencialidade, Integridade e Disponibilidade (CIA) como um arcabouço eficaz para proteger dados em RSSFs, especialmente em cenários de IoT. Esse modelo é complementado por atributos adicionais, como autenticidade e não-repúdio, que são fundamentais para garantir a privacidade, a legalidade dos usuários e a integridade das operações realizadas pelos nós sensores (MALLIK; JENA, 2021). Entre as abordagens recomendadas para o fortalecimento da cibersegurança em RSSFs, destaca-se a Arquitetura de Confiança Zero, do inglês *Zero Trust Architecture* (ZTA), que oferece proteção avançada contra intrusões e ataques de *malware*, como sugerido pelo National Institute of Standards and Technology (NIST) para gerenciamento de cibersegurança em redes sensoriais (HAILEMARIAM, 2022).

Outra estratégia amplamente discutida é o uso de criptografia leve e algoritmos de *hashing*, que atendem às limitações de energia e processamento dos nós sensores, proporcionando transmissão de dados mais segura e confiável (BABU; PAVANI; NAIDU, 2019; CHARAF et al., 2020; ALJADANI; GAZDAR, 2022). A integração da tecnologia *blockchain* também tem sido proposta como uma solução promissora para reforçar a segurança em termos de confidencialidade, integridade e disponibilidade em redes IoT assistidas por RSSFs (WARKENTIN; ORGERON, 2020; ABDULLAH et al., 2019). Além disso, atributos como frescor e resiliência são mencionados como importantes extensões do modelo CIA para lidar com ataques específicos, incluindo negação de serviço e *replay* (ABIDIN; VADI; RANA, 2021; SINGH; SAINI, 2021; MOORTHY et al., 2020).

Além disso, Sarkar et al. (2019) exploram aplicações industriais e críticas, onde redes RSSF baseadas em IoT foram utilizadas para monitorar painéis fotovoltaicos de baixa potência. Esses sistemas permitem a coleta de dados em tempo real, garantindo maior controle operacional e manutenção eficiente. Da mesma forma, Islam e Dey (2019) desenvolveram um sistema de agricultura de precisão alimentado por energia solar, fornecendo aos agricultores informações úteis, como nível de água, intrusões de água salina e condições do solo, por meio de uma arquitetura IoT.

Há também um interesse crescente na integração das RSSFs com tecnologias emergentes, como IoT e redes 5G. Prakash, Kansal e Kakar (2019) apresentam uma revisão que propõe um protocolo otimizado que melhora a transmissão de dados e a seleção de *Clusters Heads* (CHs), demonstrando eficiência em simulações de redes heterogêneas.

Dado o papel essencial das RSSFs na coleta e transmissão de dados ambientais, sua aplicação em diferentes contextos continua a expandir, permitindo maior integração com tecnologias emergentes como IoT. Essas redes, caracterizadas por sua adaptabilidade e eficiência, têm servido como base para sistemas avançados de monitoramento que demandam conectividade confiável e operação em tempo real.

No entanto, embora as RSSFs ofereçam vantagens significativas para o senso-

riamento e a comunicação, seu uso em cenários específicos, como o monitoramento da qualidade da água, requer um planejamento cuidadoso para superar desafios relacionados à segurança, eficiência energética e confiabilidade. Esses aspectos são explorados de forma mais detalhada nas próximas seções, que abordam sistemas e pesquisas focados no monitoramento da qualidade da água, destacando soluções industriais e avanços tecnológicos que moldam este campo.

2.4 Sistemas de Monitoramento da Qualidade da Água

A seguir, são apresentadas as tecnologias atuais empregadas no monitoramento da qualidade da água. Uma vez que a indústria baseia seus produtos e serviços em tecnologias que surgiram de pesquisas, também é apresentada uma breve descrição dos principais trabalhos envolvendo RSSF e IoT nos últimos anos que se concentraram em aplicações de qualidade da água.

2.4.1 Tecnologias Industriais para Monitoramento da Qualidade da Água

A trajetória das tecnologias utilizadas no monitoramento da qualidade da água reflete, ainda que em um processo evolutivo lento, o avanço contínuo da automação industrial e a busca por soluções mais eficientes e integradas. Essa evolução pode ser organizada em três grandes fases: a introdução dos sensores especializados, o surgimento dos sistemas integrados de automação e, mais recentemente, o desenvolvimento de gêmeos digitais.

As empresas Hach¹, Chemtrac² e Analytical Technology, Inc. (ATi)³ desempenham papéis significativos no fornecimento de sensores para monitoramento da qualidade da água em ETAs. Embora essas empresas ofereçam tecnologias de monitoramento em tempo real, os dados gerados pelas medições são exibidos diretamente no visor dos equipamentos, sem serem salvos em um banco de dados. Assim, os dados que não são anotados ou registrados manualmente acabam sendo perdidos, o que pode comprometer a análise e o controle contínuo dos parâmetros de qualidade da água.

A Hach iniciou suas atividades, no fim da década de 40, com o desenvolvimento de *kits* de teste para análise de água. Ao longo das décadas de 1950 e 1960, expandiu seu portfólio para incluir uma variedade de instrumentos analíticos, incluindo sensores para monitoramento de parâmetros como pH, turbidez e condutividade, voltados para aplicações em ETAs.

¹<https://www.hach.com/>, acessado em 2 de novembro de 2024.

²<https://chemtrac.com/>, acessado em 10 de novembro de 2024.

³<https://www.badgermeter.com/en-GB>, acessado em 16 de novembro de 2024.

Estabelecida em 1985, a Chemtrac concentrou-se no desenvolvimento de tecnologias para monitoramento de processos de coagulação e floculação em ETAs. Desde sua fundação, a empresa tem fornecido sensores e analisadores para medir parâmetros como turbidez, carga zeta e partículas em suspensão, auxiliando no controle e na otimização dos processos de tratamento de água.

Já a ATi, fundada em 1992, especializou-se na fabricação de sensores e sistemas de monitoramento para a qualidade da água, incluindo detecção de cloro residual, ozônio, dióxido de cloro e outros parâmetros críticos em ETAs. Desde o início de suas operações, a ATi tem fornecido soluções para monitoramento em tempo real, contribuindo para a eficiência e segurança dos processos de tratamento de água.

Os integradores de sistemas, como Siemens⁴, Asea Brown Boveri (ABB)⁵ e Honeywell⁶, também desempenharam um papel central ao oferecer soluções de automação mais robustas e integradas. Essas empresas foram pioneiras na introdução de sistemas SCADA e Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), que permitiram a supervisão e o controle automatizado de processos, também em ETAs. Embora inicialmente conhecidas como fabricantes de sensores, empresas como Hach, Chemtrac e ATi expandiram seus portfólios para incluir controladores de processos, como os sistemas SC200 e SC4500 da Hach, o HydroACT da Chemtrac e o Q46D da ATi. Essas soluções permitem não apenas o monitoramento, mas também o controle de parâmetros críticos em ETAs, alinhando-se ao segundo momento tecnológico junto a integradores de sistemas como Siemens, ABB e Honeywell.

A Siemens, fundada em 1847, expandiu suas operações para o setor de saneamento ao longo do século XX, especializando-se em sistemas de automação e controle para plantas de tratamento de água, incluindo soluções SCADA que permitem a supervisão centralizada dos parâmetros de qualidade da água⁷.

A ABB, estabelecida em 1988 a partir da fusão de empresas com longa trajetória, também ingressou no mercado de saneamento nesse período, oferecendo tecnologias de automação industrial e sistemas de controle de processos para ETAs⁸.

A Honeywell, com origens que remontam a 1906, consolidou sua presença no setor de saneamento nas últimas décadas, fornecendo soluções de automação e controle que integram diversos sensores e sistemas para otimizar operações em ETAs⁹.

Apesar de sua eficiência, tais sistemas frequentemente demandam infraestrutura

⁴<https://www.siemens.com/global/en.html>, acessado em 9 de novembro de 2024.

⁵<https://global.abb/group/en>, acessado em 25 de novembro de 2024.

⁶<https://www.honeywell.com/us/en>, acessado em 3 de novembro de 2024.

⁷<https://www.siemens.com/br/pt/solucoes/industria-saneamento.html>, acessado em 17 de novembro de 2024.

⁸<https://new.abb.com/drives/pt/segments/agua-e-saneamento>, acessado em 4 de dezembro de 2024.

⁹<https://process.honeywell.com/us/en/industries/power-and-water/water-and-wastewater-treatment>, acessado em 3 de novembro de 2024.

de alta complexidade e investimento significativo, sendo mais comuns em operações de grande escala. Além disso, essas soluções, embora integradas, ainda dependem de intervenção humana em algumas etapas críticas, como ajustes operacionais baseados nos dados coletados.

Por fim, a incorporação de tecnologias avançadas, como gêmeos digitais, é realizada por empresas como Veolia¹⁰ e Xylem¹¹. A Veolia, fundada em 1853, consolidou sua atuação no setor de saneamento ao longo do século XX, especializando-se em soluções abrangentes para o tratamento de água e gestão de recursos hídricos. Recentemente, a empresa tem investido no desenvolvimento de gêmeos digitais que oferecem uma representação virtual das plantas de tratamento de água, integrando dados em tempo real e modelos preditivos para simulação e análise. Uma de suas principais soluções é o *Hubgrade Performance Plant*, um módulo digital que visa otimizar o desempenho de estações de tratamento de águas residuais, tanto para aplicações municipais quanto industriais. Essa plataforma integra dados em tempo real e análises avançadas para melhorar a eficiência operacional e assegurar a conformidade com os padrões ambientais¹².

A Xylem, criada em 2011 a partir de uma cisão da International Telephone & Telegraph (ITT) Corporation, rapidamente se estabeleceu no mercado de saneamento, focando em tecnologias inovadoras para o gerenciamento de água, incluindo o desenvolvimento de gêmeos digitais que permitem o monitoramento contínuo dos parâmetros de qualidade da água e a otimização dos processos antes que mudanças sejam implementadas na planta física. Uma de suas ofertas notáveis é a tecnologia de gêmeo digital aplicada a estações de tratamento de águas residuais. Essa solução cria modelos digitais dos processos de tratamento, permitindo simulações e análises que otimizam o consumo de energia e melhoram a qualidade do efluente. Por exemplo, uma estação na Itália implementou essa tecnologia e conseguiu reduzir o consumo de energia em 10%, mesmo com um aumento de 33% na carga de entrada¹³.

Contudo, embora altamente inovadores, os gêmeos digitais tendem a focar mais na visualização e análise de dados, sem necessariamente automatizar diretamente os ajustes operacionais, o que pode limitar sua aplicação em algumas ETAs.

A evolução das tecnologias para monitoramento da qualidade da água, que inclui sensores, sistemas de automação e gêmeos digitais, reflete tendências de inovação global, evidenciadas também pela análise de patentes na área de saneamento. Um estudo recente realizado por André, Amorim e Silva (2023) apresenta um mapeamento tecnológico focado no desenvolvimento de sensores e tecnologias IoT aplicados ao tratamento de água e eflu-

¹⁰<https://www.latam.veoliawatertechnologies.com/pt>, acessado em 30 de novembro de 2024.

¹¹<https://www.xylem.com/en-us/>, acessado em 1 de dezembro de 2024.

¹²<https://www.latam.veoliawatertechnologies.com/pt/solucao-digital-do-modulo-hubgrade-performance-plantt>, acessado em 30 de novembro de 2024.

¹³<https://www.xylem.com/pt-br/making-waves/water-utilities-news/digital-twin-helps-wastewater-treatment-plant-reduce-aeration-energy-by-10/>, acessado em 1 de dezembro de 2024.

entes. A pesquisa utilizou a base Orbit Intelligence para identificar patentes registradas entre 2002 e 2022, aplicando *strings* de busca específicas como "(Sensor+) AND (Monitoring) AND (C02F)" e "(IoT OR Internet of Things) AND (C02F)". Após refinamento, foram contabilizadas 1.005 patentes válidas relacionadas ao tema.

Os resultados indicam que a China lidera o registro de patentes, com 743 depósitos, seguida pelos Estados Unidos, com 117. O Brasil ocupa a 14^a posição, com apenas 20 patentes, revelando um baixo nível de investimento em pesquisa e desenvolvimento tecnológico no setor. Entre as patentes brasileiras, destaca-se a de número BR 10 2020 006154 2 A2, que combina sensores com um sistema de monitoramento remoto dos parâmetros de qualidade da água durante o tratamento. Esse sistema utiliza radicais hidroxila gerados por luz ultravioleta e peróxido de hidrogênio para processos de oxidação ou irradiação e inclui *hardware* para controle remoto de válvulas e um sensor de pH (RODRIGUES; RODRIGUES; WATANABE, 2020). A patente representa um exemplo significativo de inovação, demonstrando o potencial de integração de tecnologias avançadas no setor.

Essas informações reforçam a relevância de associar as tendências tecnológicas apresentadas às estratégias globais de inovação, promovendo maior adesão às tecnologias emergentes, como IoT e RSSF, para consolidar a universalização dos serviços de saneamento. A análise de patentes também permite identificar oportunidades de mercado e lacunas tecnológicas que podem orientar futuras pesquisas e investimentos no setor.

2.4.2 Pesquisas Desenvolvidas para Monitoramento da Qualidade da Água

A busca por soluções inovadoras para o monitoramento da qualidade da água tem atraído crescente interesse acadêmico e industrial, dada a importância estratégica da água potável para a saúde pública e a sustentabilidade ambiental. Tecnologias como IoT, RSSF e IA têm desempenhado um papel central nos avanços recentes, oferecendo soluções que combinam eficiência operacional, redução de custos e maior precisão na coleta e análise de dados.

Pesquisas recentes têm explorado o uso de tecnologias IoT para o monitoramento da qualidade da água em diversas aplicações. Por exemplo, AlMetwally, Hassan e Mourad (2020) desenvolveram um sistema baseado em IoT para monitorar parâmetros como pH, temperatura e turbidez em tempo real. Este sistema utiliza sensores e controle por microcontroladores para tomar decisões automáticas para manter os parâmetros de qualidade dentro de limites aceitáveis, melhorando a eficiência do consumo doméstico e reduzindo a necessidade de análises laboratoriais demoradas.

De maneira similar, o estudo de Wiryasaputra et al. (2024) desenvolveu um sistema baseado em IoT para monitoramento em tempo real da qualidade da água potável.

Este sistema, que integra sensores a uma arquitetura de computação em nuvem, coleta dados sobre pH, turbidez e temperatura e os transmite via *Narrow Band IoT* (NB-IoT) para análise. A abordagem inclui notificações em *soft real time* e utiliza ML para prever a potabilidade da água, destacando o modelo de árvore de decisão, do inglês *Decision Tree* (DT), como a solução mais precisa para prever a qualidade com até 97% de acurácia.

No contexto industrial, Nishan et al. (2024) propuseram um sistema de monitoramento em três níveis para águas residuais industriais. Utilizando sensores para medir temperatura, turbidez, sólidos dissolvidos totais, do inglês *Total Dissolved Solids* (TDS), e pH, a solução fornece dados em *soft real time* por meio de um aplicativo móvel. Este sistema evidenciou variações significativas nos parâmetros entre diferentes locais, sublinhando os impactos das descargas industriais sobre a qualidade da água e a necessidade de intervenções sustentáveis para mitigar a poluição.

Além disso, Adeleke, Nwulu e Ogbolumani (2023) integraram IoT e ML em um sistema híbrido para monitoramento e tratamento da qualidade da água. O uso de redes neurais artificiais, do inglês, *Artificial Neural Networks* (ANN), e Máquinas de Vetor de Suporte, do inglês, *Support Vector Machines* (SVM), permitiu prever a qualidade da água com alta precisão. Este sistema automatiza a correção de parâmetros críticos, como pH e potencial de oxidação-redução, do inglês, *Oxidation-Reduction Potential* (ORP), promovendo uma abordagem eficaz e inteligente para o gerenciamento de recursos hídricos.

No âmbito de modelos híbridos, o trabalho de Achite et al. (2023) apresentou uma combinação de RF com otimização por Algoritmos Genéticos, do inglês, *Genetic Algorithms* (GA), para prever a dosagem de coagulantes em ETAs. Este modelo superou métodos convencionais ao reduzir o tempo e custo de testes experimentais, como o teste de jarros, alcançando uma acurácia elevada (coeficiente de correlação de 0.975) na previsão de dosagens otimizadas com base em características da água bruta, como turbidez, condutividade e TDS.

Trabalhos recentes também demonstram o potencial das RSSFs para o monitoramento eficiente da qualidade da água. Por exemplo, Martínez et al. (2020) investigaram a integração de sistemas baseados em RSSF e IoT em estações de tratamento de águas residuais, utilizando sensores para medir parâmetros como nitrato e nitrito em tempo quase real. O estudo destaca como soluções descentralizadas podem otimizar o monitoramento e a gestão de dados, promovendo maior eficiência nas operações de tratamento.

De forma complementar, Zainurin et al. (2022) revisaram métodos modernos de monitoramento da qualidade da água, incluindo tecnologias baseadas em IoT e CPS. Embora essas abordagens sejam promissoras em termos de simplicidade e eficiência, os desafios relacionados à precisão e ao custo dos sensores ainda limitam sua aplicação em cenários específicos, como ETAs.

Por último, Fan e Xu (2021) propuseram um sistema de controle inteligente para floculação em processos de tratamento de água. Utilizando ANN e controle *fuzzy*, o sistema ajusta automaticamente os parâmetros de controle com base em dados como temperatura e turbidez, otimizando a dosagem de floclulantes e melhorando a qualidade da água tratada. Este avanço reduz a necessidade de ajustes manuais, aumentando a eficiência operacional em cenários de grande variabilidade na qualidade da água bruta.

Ademais, López-Ramírez e Aragón-Zavala (2023) abordaram o uso de RSSF no monitoramento da qualidade da água, explorando avanços em arquitetura de *hardware*, eficiência energética e integração de ML. Esses avanços destacam o potencial das RSSFs para superar lacunas de dados em monitoramento da qualidade da água.

No entanto, apesar desses avanços, a aplicação de RSSF para monitoramento em ETAs requer mais atenção. A literatura existente frequentemente foca em parâmetros gerais ou em corpos d'água naturais, enquanto estudos específicos sobre monitoramento de parâmetros em ETAs são menos frequentes. Este é um campo crítico, pois as ETAs desempenham um papel vital na mitigação de impactos ambientais e na gestão sustentável de recursos hídricos. Assim, estudos futuros devem investigar estratégias de implementação de RSSF para abordar desafios únicos, como ambientes químicos agressivos e a necessidade de alta precisão nos dados coletados.

Essa lacuna representa uma oportunidade significativa para pesquisa, com potencial para desenvolver soluções robustas que contribuam para o aprimoramento de operações em ETAs, promovendo a sustentabilidade e a eficiência no uso de tecnologias avançadas.

3 Projeto da Arquitetura de *Hardware* e Programação Embarcada

Neste capítulo, são apresentadas a metodologia e a arquitetura propostas para o desenvolvimento e implementação da solução baseada em IoT para o monitoramento de ETAs. Inicialmente, são descritos os componentes de *hardware* do dispositivo de RF, detalhando as interfaces UART e RS485 utilizadas para conexão com os sensores, além dos *firmwares* associados.

Adicionalmente, descreve-se a comunicação empregada no dispositivo. No momento, a comunicação é implementada apenas no modo *simplex*, atendendo às necessidades do projeto de mestrado, focada exclusivamente na telemetria. Para o projeto da Conatus Ambiental, quando forem integradas funcionalidades de controle com suporte a ML, a comunicação será reestruturada para operar no modo *half-duplex*.

Além disso, a arquitetura de computação em nuvem proposta é detalhada, abrangendo a integração de um *broker*, um BD não relacional e a estratégia de hospedagem em *site* estático para a IHM. Por fim, descrevem-se os *softwares* de aplicação da IHM da plataforma de monitoramento (telemetria) para ETAs.

Cabe destacar que a metodologia foi elaborada com base em premissas e limitações do escopo deste trabalho, incluindo:

- O *hardware* do dispositivo RF deve ser compatível com sensores UART e RS485.
- Inicialmente, os testes foram conduzidos considerando apenas a configuração *sensor-node*, visando minimizar custos e simplificar a validação do sistema. Embora a redundância seja uma premissa fundamental em sistemas de automação, nesta etapa optou-se por uma abordagem mais enxuta. No entanto, para a solução final, prevê-se a implementação de *shelters*, nos quais uma rede de sensores, distribuídos dentro de um raio ainda a ser definido, estará conectada a dois *nodes* por meio de um barramento, garantindo redundância na comunicação. Além disso, os sensores serão instalados em pares, permitindo continuidade na operação mesmo em caso de falha de um dos dispositivos.
- A comunicação do dispositivo será implementada inicialmente no modo *simplex*, restrita à funcionalidade de telemetria. Na fase de integração com controle baseado em ML, será adotada a comunicação *half-duplex*, garantindo maior flexibilidade no envio e recebimento de dados.

- O *firmware* inicial não implementará *Quality of Service* (QoS) ou características avançadas de protocolos estabelecidos, focando na comunicação básica para validação da arquitetura.
- A arquitetura em nuvem será limitada ao *broker*, ao BD não relacional e à hospedagem em *site* estático da IHM. Tecnologias como Lambda para alertas, BD relacional no Relational Database Service (RDS), ML (SageMaker) e IHM dinâmica (Amplify) não fazem parte do escopo do projeto de mestrado.
- Cada dispositivo contará com sua própria IHM, sendo que a integração em uma única IHM para toda a ETA será considerada em implementações futuras, quando a estratégia de hospedagem em *site* dinâmico for adotada.

3.1 Hardware

Este trabalho resultou no desenvolvimento de um *hardware* com as seguintes características: um sistema microcontrolado baseado no CI *System on a Chip* (SoC) ESP32-S3, capacidade de aquisição de dados de sensores por meio dos protocolos de comunicação RS485 e UART, rádio de comunicação LoRa configurável via *software*, que permite ao usuário selecionar seu modo de operação como *node* ou *gateway*, unidade de armazenamento de dados em *hardware* utilizando um cartão de memória SD e barramento de acesso ao GPIO para expansão de funcionalidades. A Figura 3.1 apresenta uma visão geral da organização dos principais circuitos que compõem o *hardware* e suas conexões ao microcontrolador.

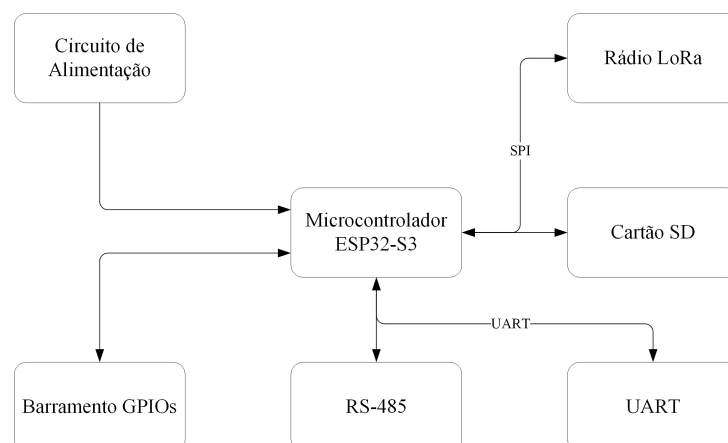


Figura 3.1 – Diagrama de blocos dos principais circuitos conectados ao ESP32-S3.

O microcontrolador ESP32-S3, mostrado na Figura 3.2, apresenta um conjunto de pinos de entrada e saída amplamente configurável, que permite a conexão com diversos periféricos. Entre os pinos destacados estão os destinados à comunicação serial (UART,

Por sua vez, a Figura 3.4 apresenta o circuito esquemático de interface para gravação de dados em um cartão de memória SD. Como mostrado no diagrama, o módulo do cartão é conectado diretamente aos pinos GPIO do ESP32-S3, com resistores *pull-up* de $10\text{ K}\Omega$ em cada linha de comunicação. Esses resistores são indispensáveis para o correto funcionamento do protocolo SPI, garantindo que os sinais sejam mantidos em níveis estáveis quando nenhum dispositivo estiver transmitindo dados, prevenindo, assim, erros de leitura e escrita. Esse arranjo assegura uma comunicação confiável entre o microcontrolador e o cartão de memória, permitindo a gravação eficiente dos dados (Expressif Systems, 2023, Chap.34).

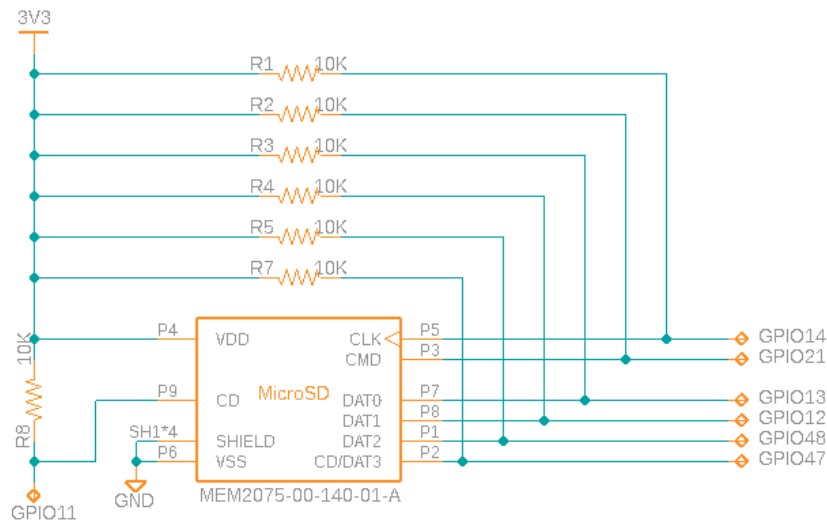


Figura 3.4 – Diagrama esquemático do circuito de interface entre o ESP32-S3 e o módulo de gravação no cartão de memória SD, incluindo resistores *pull-up* necessários para a comunicação SPI.

Já a Figura 3.5 apresenta o circuito esquemático do módulo de rádio LoRa, implementado com o CI SX1276. Este componente foi escolhido por suas características que atendem aos requisitos do projeto, incluindo frequência de operação programável ($137 - 1020\text{ MHz}$), alta sensibilidade, potência de transmissão de até 20 dBm , baixo consumo de corrente no modo RX e taxa de transmissão de dados programável de até 300 kbps . Como indicado no diagrama da Figura 3.5, a comunicação entre o SX1276 e o ESP32-S3 é realizada via protocolo SPI, garantindo alta velocidade e confiabilidade na transmissão de dados. Além disso, para maximizar o alcance do sinal de rádio, utiliza-se uma antena externa modelo ANT900, que opera nas frequências de 868 MHz ou 915 MHz , com ganho de 5 dBi .

Ainda consta no diagrama de blocos da Figura 3.1, o bloco de acesso ao GPIO, e de comunicação dos protocolos RS485 e UART. Nesse sentido, consta-se que o bloco de acesso ao GPIO e UART consiste apenas em um barramento que dá acesso aos pinos do ESP32-S3. Sendo que o barramento do GPIO foi incluído no projeto em ordem de surgir alguma ocorrência que necessite da inclusão de novas funções ao *hardware*, mas que até o

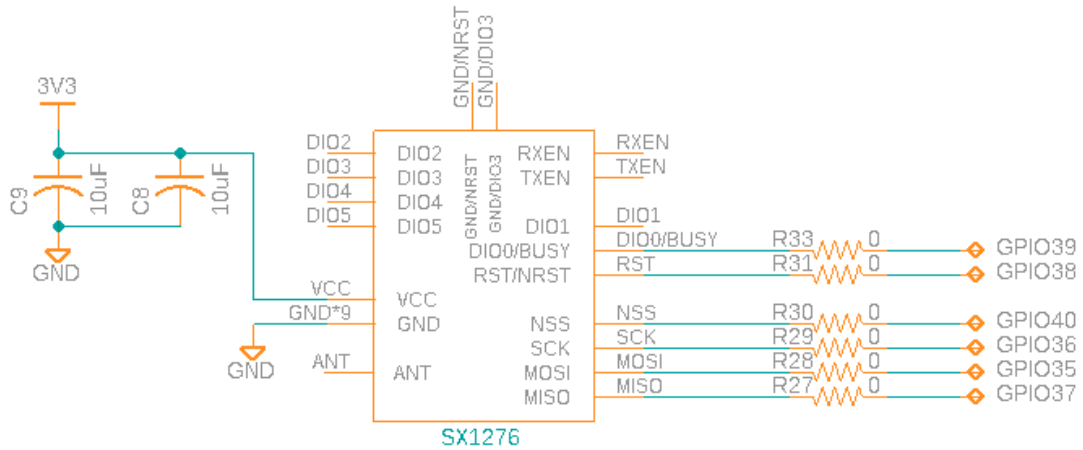


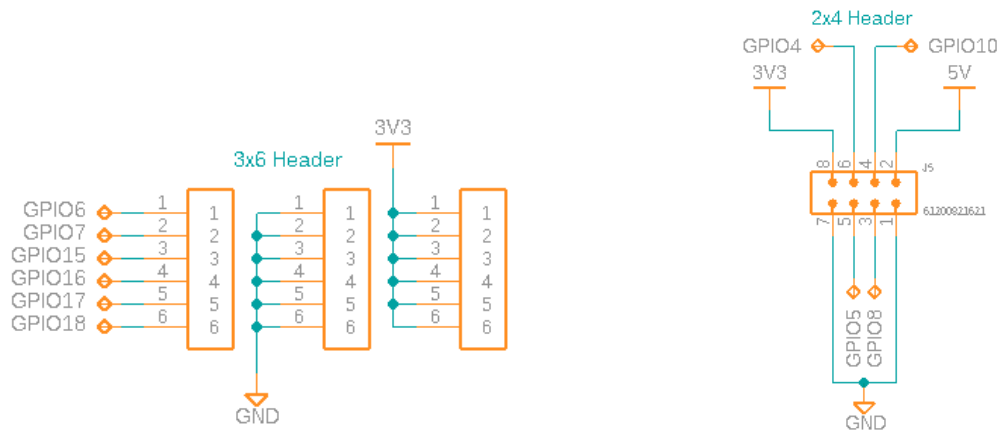
Figura 3.5 – Circuito esquemático do módulo de rádio LoRa baseado no CI SX1276.

presente momento não se encontra em uso. Por sua vez, o bloco do circuito que compõe o protocolo de comunicação RS485 baseia-se no CI MAX485.

Os barramentos de acesso ao GPIO e UART desempenham um papel fundamental na expansão e flexibilidade do *hardware*. No caso do GPIO, o barramento foi projetado para fornecer acesso direto a múltiplos pinos do ESP32-S3, facilitando a implementação de funcionalidades adicionais no sistema, caso necessário. A utilização desses pinos está disponível para atender futuras demandas de *hardware* que exijam integração de novos periféricos ou sensores, como mostrado na Figura 3.6a. Já o barramento UART, apresentado na Figura 3.6b, possibilita a comunicação serial básica e serve como meio de transmissão de dados entre o microcontrolador e dispositivos externos, garantindo flexibilidade e suporte a diversas interfaces. Ambos os barramentos foram desenhados para oferecer simplicidade e acessibilidade, assegurando que o sistema possa ser expandido e adaptado conforme as necessidades do projeto.

A Figura 3.7 apresenta o circuito esquemático de comunicação utilizando o protocolo Modbus RS485, implementado com o CI MAX485ESA+T. Este circuito é responsável por permitir a comunicação robusta e eficiente entre o dispositivo RF e sistemas externos, aproveitando a resistência a interferências e a capacidade de comunicação em longas distâncias do padrão RS485. O CI MAX485ESA+T foi escolhido por sua simplicidade de integração, baixo consumo de energia e suporte a taxas de comunicação elevadas. Como mostrado no diagrama da Figura 3.7, a comunicação diferencial ocorre através dos terminais A e B, enquanto resistores de *pull-up* e *pull-down* garantem a estabilidade da linha, e o resistor de terminação 120 Ω melhora a integridade do sinal em redes mais extensas. Os sinais de controle do CI (RE e DE) são gerenciados pelo ESP32-S3, possibilitando a ativação e desativação do modo transmissor de forma eficiente. Adicionalmente, a alimentação de 3,3 V é compartilhada com o restante do circuito, simplificando o *design* do *hardware*.

Apesar de não estarem explicitamente representados no diagrama de blocos da



(a) Diagrama esquemático do barramento GPIO do ESP32-S3, detalhando as conexões para alimentação, terra e os pinos digitais disponíveis para uso futuro.

(b) Diagrama esquemático do barramento UART do ESP32-S3, apresentando as conexões principais para alimentação, terra e os pinos de transmissão e recepção serial.

Figura 3.6 – Barramentos de acesso ao GPIO e UART, ilustrando as conexões diretas ao microcontrolador e sua utilidade em potencial para expansões do sistema.

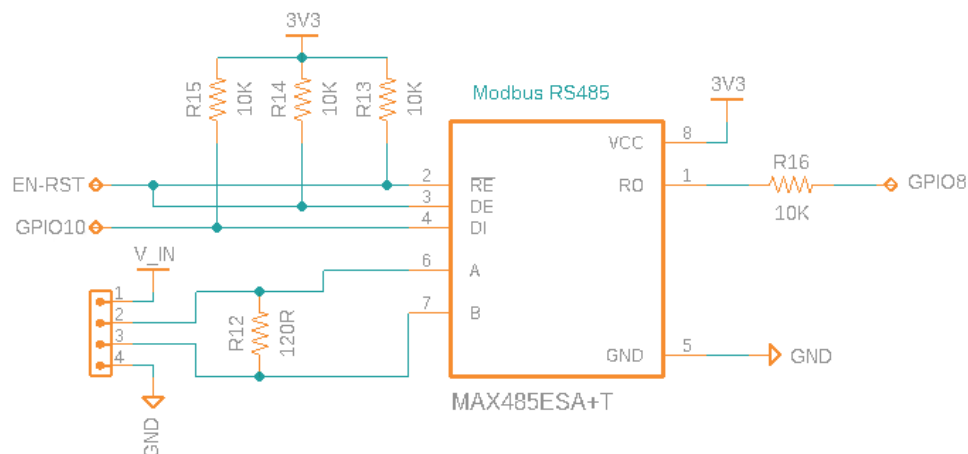
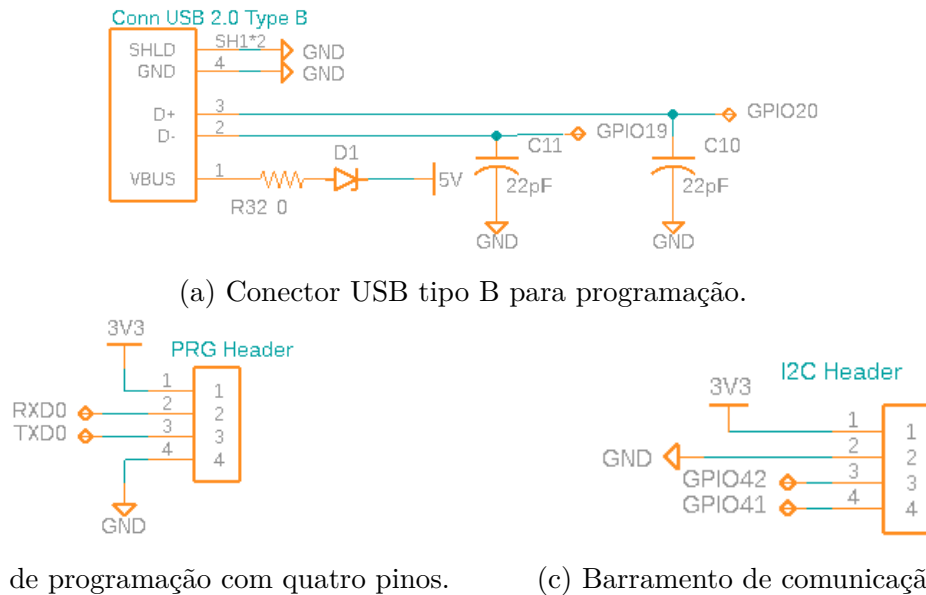


Figura 3.7 – Circuito esquemático de comunicação Modbus RS485 implementado com o CI MAX485ESA+T, incluindo resistores de *pull-up*, *pull-down* e terminação para estabilidade da linha.

Figura 3.1, alguns circuitos adicionais desempenham papéis importantes para a funcionalidade e a usabilidade da PCB. Entre esses circuitos estão outros *headers* de programação e comunicação, que facilitam o acesso ao microcontrolador e a integração com periféricos; botões e LEDs para interação direta com o usuário e indicação de estados do sistema; e furos de montagem aterrados, que garantem a segurança e a integridade mecânica do dispositivo ao minimizar ruídos elétricos e interferências. Esses elementos complementares são essenciais para a operação confiável e prática do sistema, conforme detalhado a seguir.

A Figura 3.8 apresenta os circuitos referentes aos conectores adicionais para pro-

gramação e comunicação do sistema. A Figura 3.8a exibe o conector USB tipo B, utilizado para fornecer alimentação e realizar a interface direta com o microcontrolador via pinos GPIO19 e GPIO20, permitindo a programação e depuração de forma prática. Este conector inclui um diodo de proteção que evita danos ao circuito caso haja inversão de polaridade na alimentação. Por outro lado, a Figura 3.8b detalha o conector de *header* para programação, que disponibiliza os pinos essenciais para gravação do *firmware*, incluindo alimentação (3,3 V), terra (GND) e os sinais de comunicação UART. Esse conector é utilizado principalmente durante o desenvolvimento e manutenção do *hardware*, garantindo acesso direto e confiável ao ESP32-S3. Além do mais, a Figura 3.8c apresenta o barramento I2C, que oferece acesso aos pinos GPIO42 e GPIO41, junto à alimentação (3,3 V) e GND, permitindo a conexão de dispositivos periféricos que utilizam esse protocolo de comunicação. Esses conectores ampliam a flexibilidade do sistema, facilitando tanto sua integração quanto sua manutenção.



(b) Header de programação com quatro pinos.

(c) Barramento de comunicação I2C.

Figura 3.8 – Conectores para programação e comunicação: USB tipo B, *header* de 4 pinos e barramento I2C.

Por fim, os esquemáticos apresentados na Figura 3.9 são organizados em diferentes funcionalidades essenciais para o projeto. Na Figura 3.9a corresponde ao circuito de *boot*, projetado para permitir a inicialização em modo de configuração por meio de um botão dedicado. A Figura 3.9b apresenta o circuito de *reset*, que possibilita a reinicialização segura do sistema. A Figura 3.9c descreve o circuito de *factory reset*, desenvolvido para restaurar o dispositivo às configurações de fábrica. A Figura 3.9d ilustra o circuito dos LEDs de status, compostos por LEDss verdes e azuis controlados por GPIOs, com resistores limitadores de corrente. Ademais, a Figura 3.9e apresenta o esquema dos furos de montagem, utilizados para a fixação física do dispositivo e conexão ao GND.

A Figura 3.10 apresenta o *layout* final da PCB desenvolvida para o dispositivo

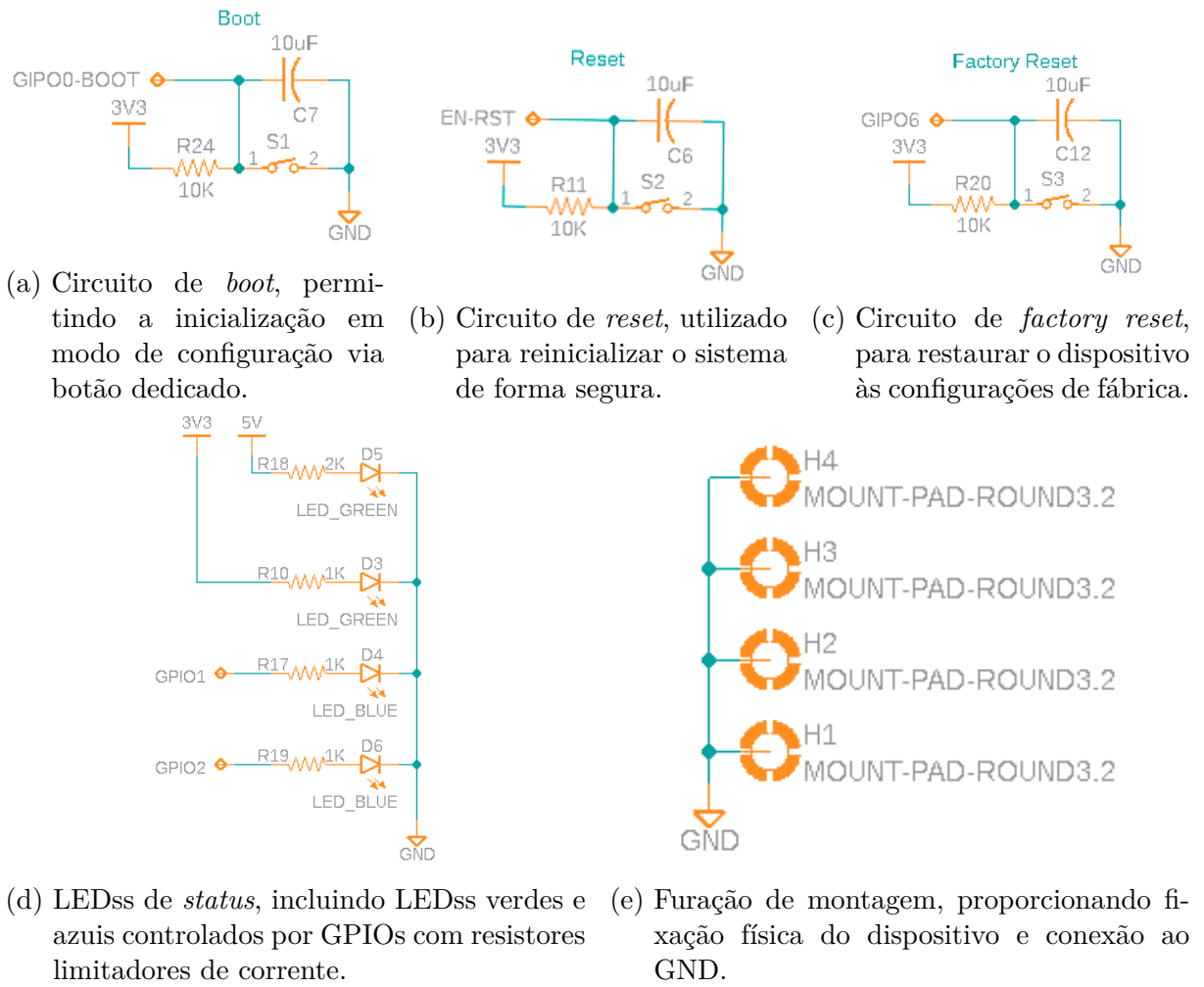
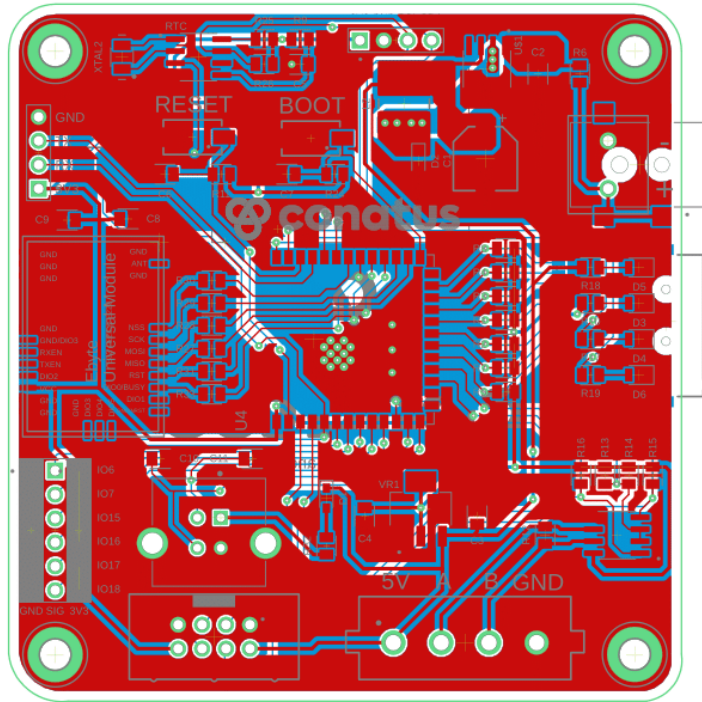
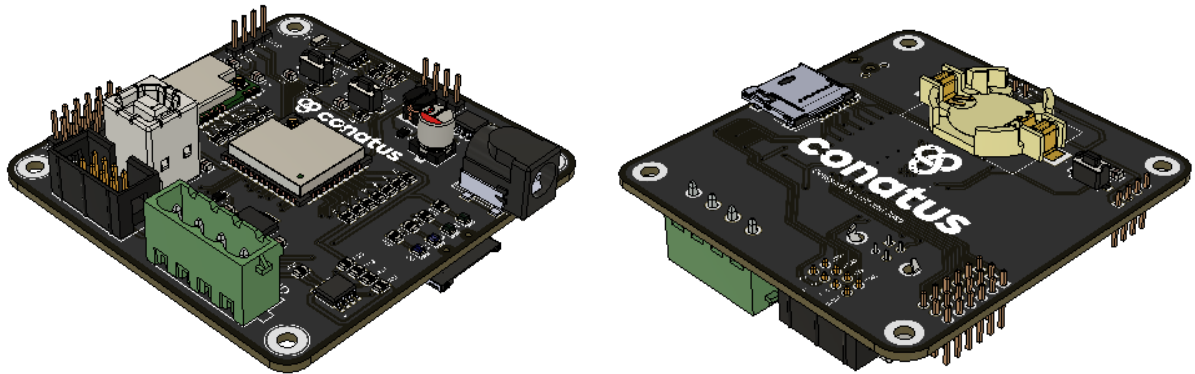


Figura 3.9 – Demais esquemáticos elétricos detalhados do projeto, incluindo circuitos de *boot*, *reset*, *factory reset*, LEDss de *status* e furos de montagem.

RF. O *layout* representa uma etapa essencial no projeto, pois define a disposição física dos componentes eletrônicos e as trilhas condutoras no circuito impresso, garantindo o funcionamento adequado do dispositivo e atendendo aos requisitos de desempenho e confiabilidade estabelecidos. Essa representação é fundamental para verificar a integridade elétrica, a compatibilidade dos componentes e a eficiência do design antes da fabricação.

Complementarmente, o projeto da PCB inclui a modelagem tridimensional dos componentes para assegurar que o dispositivo final seja compatível com os requisitos mecânicos e de montagem, além de facilitar a análise de possíveis interferências físicas entre os elementos do circuito. A Figura 3.11 ilustra o diagrama de posicionamento tridimensional dos componentes na PCB, apresentando vistas da parte superior (Figura 3.11a) e inferior (Figura 3.11b) do dispositivo. Essa abordagem permite verificar não apenas o alinhamento e o espaçamento dos componentes, mas também o cumprimento das dimensões especificadas para a integração com outras partes do sistema.

O projeto da PCB, incluindo seu *layout* e diagrama 3D, foi concebido conside-

Figura 3.10 – *Layout* da PCB do dispositivo RF.

(a) Parte superior da PCB do dispositivo RF. (b) Parte inferior da PCB do dispositivo RF.

Figura 3.11 – Diagrama de posicionamento dos componentes 3D.

rando a aplicação específica em sistemas de saneamento. Nesse contexto, o dispositivo de radiofrequência será utilizado para monitoramento e automação, integrando-se a uma infraestrutura de RSSF e IoT em ETAs. Assim, o desenvolvimento detalhado do *layout* e do modelo tridimensional assegura que o dispositivo atenda às demandas de robustez, confiabilidade e precisão exigidas por essas operações críticas.

3.2 Programação Embarcada dos *Nodes*

Conforme descrito na Seção 3.1, o *hardware* proposto foi projetado para operar em dois modos distintos:

- **Modo *Node*:** neste modo, o dispositivo se conecta diretamente aos sensores e realiza a aquisição e envio dos dados para o *gateway*.
- **Modo *Gateway*:** neste modo, o dispositivo recebe os dados enviados pelos *nodes* e retransmite essas informações para um servidor, onde são armazenadas em um banco de dados na nuvem.

A distinção entre os dois modos de operação é implementada por meio do *firmware* embarcado no *hardware*. O Algoritmo 3.1 descreve o funcionamento do *firmware* no modo *node*. Neste modo, o dispositivo realiza a comunicação com os sensores utilizando interfaces RS485 ou UART, configurando um tempo de amostragem fixo ($T_s = 15s$) para realizar leituras periódicas. Os dados são armazenados temporariamente em um *buffer* e enviados ao *gateway* via comunicação LoRa. O algoritmo também garante que a comunicação seja confiável, verificando o estado de envio antes de finalizar cada ciclo de amostragem.

Algoritmo 3.1 : Pseudo-código do *Firmware* embarcado no ESP32-S3 – Modo de Operação *node*.

```

1: Entrada: Nomes do node e gateway de destino e tipo de sensor.
2: Saída: Leitura do sensor.
3: Inicializar bibliotecas
4: Configurar registradores
5: Configurar GPIOs
6: Inicializar funções/tasks
7: Inicializar tempo de amostragem:  $T_s = 15s$ 
8: while Executar = True do
9:   Inicializar contagem de tempo:  $t = 0$ 
10:  Abrir comunicação com o sensor, RS485 ou UART
11:  Fazer a leitura do sensor
12:  Armazenar a leitura em buffer
13:  Enviar os dados do buffer para o módulo LoRa
14:  Enviar os dados com o módulo LoRa para o Gateway
15:  Verificar o estado de envio da mensagem
16:  while  $t \leq T_s$  do
17:    Aguardar
18:  end while
19: end while

```

Além do mais, no modo *node*, o *firmware* é responsável por configurar os registradores, inicializar os sensores e realizar leituras periódicas. Os dados coletados são ar-

mazenados em um *buffer* e enviados ao *gateway* utilizando comunicação LoRa, conforme descrito no Algoritmo 3.1. O fluxograma do modo *node* é apresentado na Figura 3.12, detalhando o fluxo de execução de cada etapa do pseudo-código.

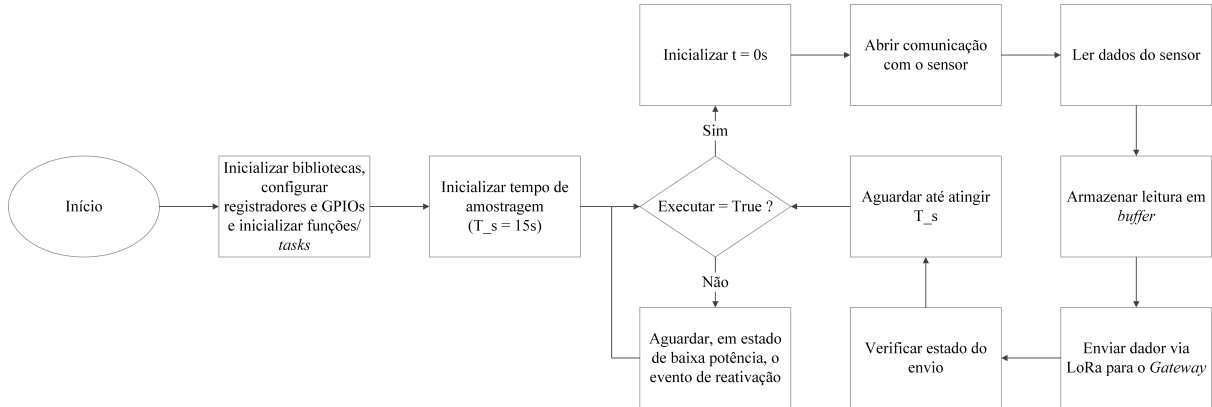


Figura 3.12 – Fluxograma do modo *node*, ilustrando o processo de aquisição de dados dos sensores e envio ao *gateway* utilizando comunicação LoRa.

Por outro lado, no modo *gateway*, o *firmware* inicializa a conexão com a Internet e o *broker* MQTT, monitorando continuamente os dados recebidos dos *nodes*. O Algoritmo 3.2 detalha o funcionamento do *firmware* no modo *gateway*. Neste caso, o dispositivo configura a comunicação com a Internet e estabelece conexão com o *broker* MQTT. O *gateway* é responsável por processar as mensagens recebidas dos *nodes*, avaliar a qualidade do sinal de recepção e retransmitir as informações ao servidor na nuvem. O algoritmo assegura a integração entre *nodes* e a infraestrutura de IoT, utilizando um tempo de amostragem menor ($T_s = 5s$) para minimizar latências na transmissão de dados.

O fluxograma do modo *gateway* é apresentado na Figura 3.13, destacando a lógica para a integração entre *nodes* e o *broker* MQTT.

O uso dos dois modos de operação, descritos nos Algoritmos 3.1 e 3.2, é essencial para garantir a escalabilidade, modularidade e eficiência na transmissão de dados, especialmente em aplicações voltadas ao saneamento básico. Essas aplicações incluem o monitoramento de parâmetros críticos da qualidade da água em ETAs, onde a confiabilidade e o desempenho da comunicação entre dispositivos são fatores fundamentais para a gestão eficiente dos processos operacionais.

Nesse contexto, a flexibilidade do sistema é evidenciada pela capacidade de adaptação às diferentes necessidades de monitoramento multiparâmetro. A quantidade de variáveis monitoradas por sensor pode variar conforme o modelo do dispositivo e as condições específicas de operação. No protótipo testado, o sistema foi configurado para transmitir dados a cada 15segundos, embora esse intervalo seja ajustável conforme a aplicação. Como consequência, o tamanho do *payload* das mensagens também varia: o turbidímetro, por exemplo, transmite uma variável junto aos dados do nó, resultando em mensagens de

Algoritmo 3.2 : Pseudo-código do *Firmware* embarcado no ESP32-S3 – Modo de Operação *gateway*.

```

1: Entrada: Nome do gateway e identidade e senha da rede.
2: Saída: Envio dos pacotes de informação para o broker MQTT ou armazenamento no
   cartão SD.
3: Inicializar bibliotecas
4: Configurar registradores
5: Configurar GPIOs
6: Inicializar funções/tasks
7: Inicializar conexão com a Internet
8: Inicializar conexão com o broker MQTT
9: Inicializar tempo de amostragem:  $T_s = 5s$ 
10: while Executar = True do
11:   Inicializar contagem de tempo:  $t = 0$ 
12:   if Conexão com a Internet = True then
13:     Fazer a leitura dos dados de conexão da Internet
14:     Armazenar a leitura em buffer
15:     Enviar os dados de conexão com a Internet do buffer para o broker MQTT
16:   else
17:     Salvar o dado de falta de conexão (bit baixo) com a Internet do buffer no cartão
       SD
18:   end if
19:   Checar se o gateway recebeu dados do node
20:   if Recepção de dados do node = True then
21:     Armazenar os dados da leitura do sensor em buffer
22:     Ler a qualidade do sinal de recepção do node
23:     Armazenar os dados da conexão com o node em buffer
24:     if Conexão com a Internet = True then
25:       Enviar os dados de leitura do sensor e da conexão com o node do buffer
       para o broker MQTT
26:     else
27:       Salvar os dados de leitura do sensor e da conexão com o node do buffer no
       cartão SD
28:     end if
29:   end if
30:   while  $t \leq T_s$  do
31:     Aguardar
32:   end while
33: end while

```

aproximadamente 64 *bytes*; já o analisador de coagulação transmite cinco variáveis, com *payloads* de cerca de 97 *bytes*. Por sua vez, os dispositivos configurados como *gateway* operam com mensagens de *payload* fixo, em torno de 55 *bytes*.

A comunicação LoRa foi implementada com os parâmetros padrão da biblioteca **LoRa.h**, utilizando *Spreading Factor* $SF7$, largura de banda de 125 *kHz* e taxa de codificação 4/5, o que resulta em uma taxa de dados aproximada de 5,47 *kbps*. A potência de

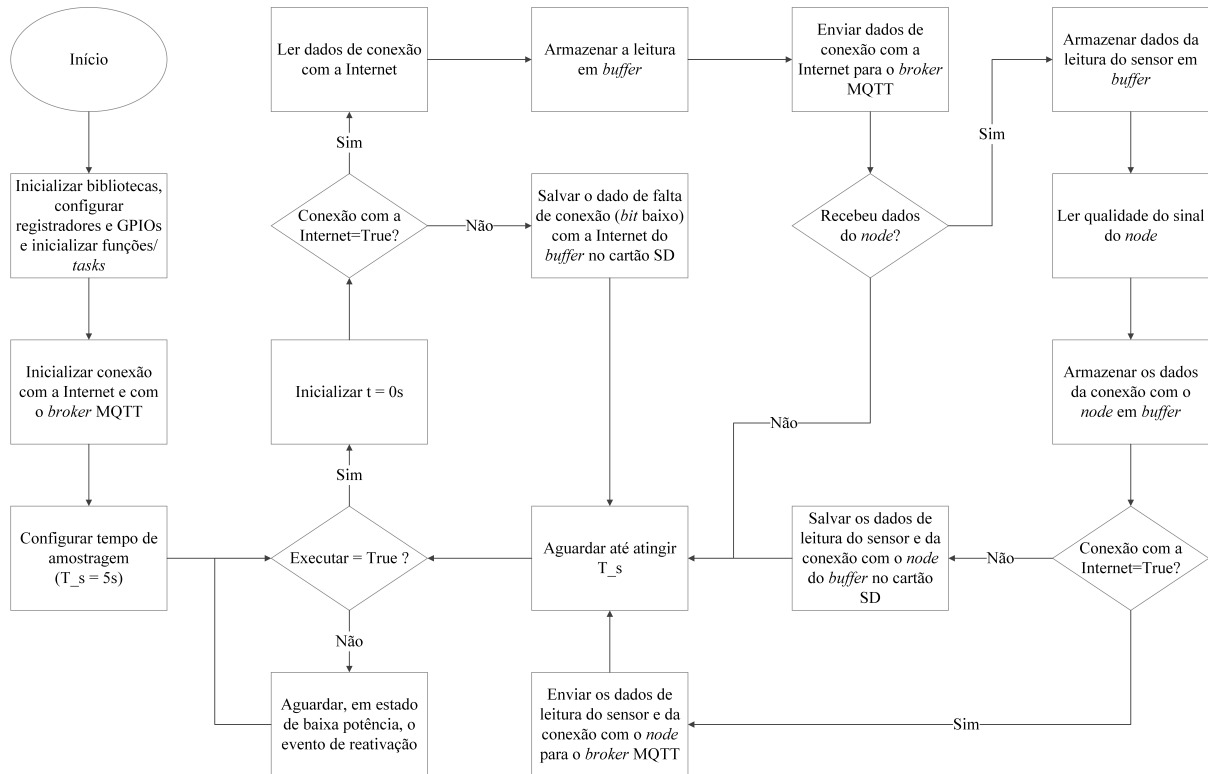


Figura 3.13 – Fluxograma do modo *gateway*, destacando a lógica de recepção de dados dos *nodes* e retransmissão ao *broker* MQTT para armazenamento em nuvem.

transmissão foi ajustada via `LoRa.setTxPower(txPower)`, dentro dos limites estabelecidos pela Anatel para a faixa de 915 MHz. Vale ressaltar que os pseudo-códigos apresentados representam um esboço inicial do protocolo de comunicação, cuja implementação completa não está incluída no escopo desta dissertação. Ainda assim, eles constituem uma base sólida para trabalhos futuros e para a consolidação da solução em cenários reais de saneamento.

3.3 Arquitetura da Plataforma de Monitoramento

A Figura 3.14 apresenta a solução completa da arquitetura em nuvem proposta para o monitoramento de ETAs. Entretanto, apenas a parte destacada sem opacidade foi desenvolvida nesta dissertação.

A arquitetura completa foi projetada para integrar dispositivos conectados via RSSF com uma plataforma em nuvem, utilizando serviços da AWS para processamento, armazenamento e gerenciamento dos dados coletados. O fluxo começa com os sensores, *nodes* e *gateways*, que transmitem os dados para o Amazon IoT Core via protocolo MQTT. Este serviço atua como *broker*, organizando as mensagens por tópicos. Os dados recebidos são processados em tempo real por funções Amazon Lambda, que analisam as informações para identificar anomalias e gerar alertas. O Amazon Kinesis Data Stream atua como um

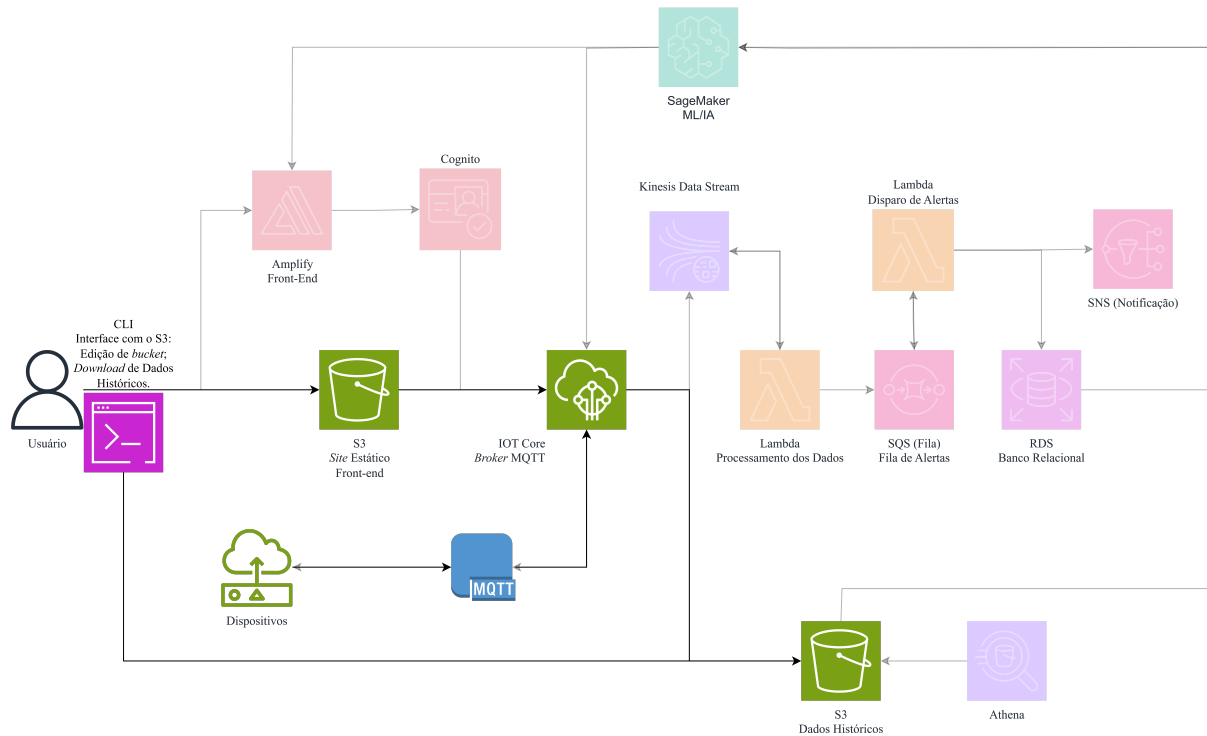


Figura 3.14 – Arquitetura completa da plataforma de monitoramento baseada em serviços da AWS. Os componentes destacados sem opacidade representam a implementação desenvolvida nesta dissertação.

serviço de *streaming* de dados, permitindo que grande volume total de dados sejam ingeridos e processados em tempo real antes de serem enviados para análise e armazenamento. Esses alertas podem ser armazenados em um BD relacional gerenciado pelo Amazon RDS e enviados para filas no Amazon Simple Queue Service (SQS) para posterior distribuição.

Além disso, notificações automatizadas podem ser configuradas por meio do Amazon Simple Notification Service (SNS), permitindo que eventos críticos sejam rapidamente comunicados a operadores. O Amazon SageMaker utiliza os dados de medição (armazenados no BD não relacional) e os dados de alerta (armazenados no BD relacional) para realizar previsões de dosagem ideal de produtos químicos nas etapas do tratamento de água nas ETAs por meio de modelos de ML/IA. Essas previsões também são enviadas como mensagens para tópicos MQTT no Amazon IoT Core, sendo direcionadas para os nós-atuadores (bombas de dosagem), além de serem salvas no BD não-relacional, com a mesma estrutura hierárquica dos nós-sensores. Além disso, as informações geradas pelo SageMaker são apresentadas na IHM, conforme indicado no fluxo para o Amplify. No armazenamento a longo prazo, os dados são enviados para o Amazon Simple Storage Service (S3), organizados em uma estrutura hierárquica e salvos no formato *JavaScript Object Notation* (JSON), possibilitando análises históricas. A solução prevê ainda o uso do AWS Amplify para hospedar uma interface dinâmica e do AWS Cognito para autenticação e gerenciamento seguro de usuários. Por fim, a recuperação de dados do S3 é planejada

para ser realizada via Amazon Athena, permitindo consultas otimizadas diretamente no armazenamento, mas este recurso ainda não foi implementado nesta etapa.

Na dissertação, foram implementados os componentes necessários para garantir a coleta e o armazenamento inicial dos dados na nuvem. Os dados são enviados para o IoT Core, onde são categorizados em tópicos MQTT, e armazenados no Amazon S3 de maneira estruturada. A organização dos dados no S3 segue uma hierarquia de pastas que facilita seu gerenciamento e acesso. Como alternativa ao uso do Athena, o acesso aos dados é realizado por meio do AWS Command Line Interface (CLI), permitindo o *download* direto dos arquivos para análises e auditorias. A implementação da IHM foi feita utilizando HTML e JS, hospedando-a em um *site* estático no S3 como uma solução temporária e funcional para o *Minimum Viable Product* (MVP). A Figura 3.15 ilustra o fluxo de dados da parte desenvolvida nesta dissertação.

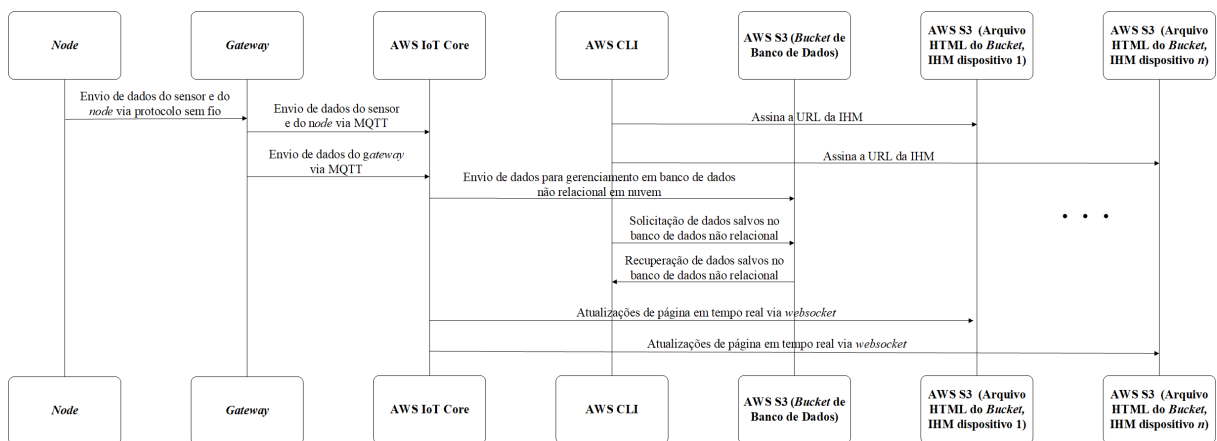


Figura 3.15 – Diagrama de fluxo de dados da plataforma de monitoramento.

Como mostrado na Figura 3.15, o envio dos dados dos sensores, *nodes* e *gateways* para a nuvem é realizado por meio do protocolo MQTT. Este protocolo foi escolhido devido à sua leveza e eficiência, sendo amplamente utilizado em aplicações IoT. Ele permite comunicação assíncrona e baseada em tópicos, garantindo que os dados sejam entregues de forma confiável mesmo em redes instáveis, o que é crucial para o monitoramento de sistemas de saneamento. O *broker* utilizado é o serviço AWS IoT Core¹. Este serviço permite a troca de mensagens entre dispositivos conectados, utilizando tópicos como canais de comunicação virtual. Políticas de acesso definem as permissões concedidas a diferentes dispositivos ou usuários para interagir com esses tópicos. Esse modelo de controle de acesso granular ajuda a proteger dados sensíveis e otimizar o desempenho do sistema, atendendo aos requisitos de segurança e escalabilidade do projeto.

Para armazenamento dos dados temporais de medição, o projeto utiliza o serviço AWS S3² como BD não relacional. Este serviço é projetado para armazenar e recuperar

¹https://aws.amazon.com/iot-core/?nc1=h_ls

²https://aws.amazon.com/s3/?nc1=h_ls

qualquer quantidade de dados de maneira segura e escalável. Essa escolha se justifica pela necessidade de armazenar grandes volumes de dados gerados pela RSSF de forma estruturada e facilmente acessível. Os dados das medições são salvos em um *bucket* – uma espécie de contêiner para objetos no S3 – no formato JSON, organizados em uma estrutura hierárquica (ano, mês, dia, dispositivo e tópico MQTT). Essa organização facilita a recuperação dos dados e sua análise posterior, especialmente em aplicações que exigem auditoria ou processamento histórico.

A criação da IHM foi realizada utilizando as linguagens HTML e JS e hospedada em um *site* estático, por meio do serviço AWS S3. Essa abordagem foi escolhida por sua simplicidade, robustez e baixo custo, características ideais para aplicações em saneamento. Cada IHM tem seus arquivos alocados também em um *bucket* individual e possui conteúdo fixo, sem ferramentas de gerenciamento para alterações. O acesso ao site estático de determinado dispositivo é realizado por meio do *endpoint* – local onde os arquivos estão hospedados – da IHM correspondente, disponível no *console* do S3.

O processo de hospedagem no AWS S3 envolve etapas claras e objetivas. Primeiro, cria-se um *bucket* por meio do *console* da AWS, assegurando que o nome seja globalmente único. Em seguida, definem-se políticas de acesso, configuradas para acesso restrito, visando preservar a integridade e confidencialidade dos dados. Após a configuração, os arquivos do *site* são carregados no S3, tornando-se acessíveis pelo *endpoint* correspondente.

Além disso, o uso do AWS CLI adiciona flexibilidade à manipulação de dados armazenados no BD. Por meio dessa ferramenta, é possível acessar diretamente os dados para análises ou backup, sem a necessidade de interação com a interface gráfica da AWS. Essa abordagem é vantajosa para automações, como auditorias periódicas dos dados ou integração com outras plataformas de análise. A geração de assinaturas temporárias de *Uniform Resource Locators* (URLs) pelo comando *aws s3 presign* permite o compartilhamento seguro dos arquivos por períodos controlados, alinhando-se às necessidades de confidencialidade e integridade no contexto de monitoramento ambiental e saneamento básico.

3.4 Estrutura e Funcionalidades da IHM

Nesta seção, são apresentados os detalhes do protótipo desenvolvido para a IHM, projetada para o monitoramento de variáveis operacionais em ETAs. Este protótipo ilustrativo tem como objetivo demonstrar as funcionalidades esperadas em versões futuras da IHM, que integrarão dados em tempo real, gráficos históricos e ferramentas de análise voltadas para a operação e manutenção dos sistemas monitorados.

A IHM desenvolvida apresenta uma estrutura visual clara e intuitiva, adaptada para atender às demandas de diferentes configurações de monitoramento em ETAs. O *layout* está organizado em duas seções principais: **Tempo Real** e **Histórico**. Na parte superior da interface, encontram-se as informações específicas da estação monitorada, incluindo o nome da ETA, o tipo de sensor monitorado pela IHM e a descrição da amostra monitorada, com base no local onde o sensor foi instalado na ETA, como ilustrado na Figura 3.16. Essa flexibilidade permite que a interface seja personalizada para diferentes contextos de instalação e operação da instrumentação.



Figura 3.16 – Protótipo ilustrativo da IHM para monitoramento de ETAs, com visualização de dados em tempo real e gráficos históricos.

A seção de **Tempo Real** exibe os valores monitorados em tempo presente, organizados em cartões que variam em quantidade e conteúdo de acordo com o tipo de sensor conectado. Por exemplo, a quantidade de variáveis apresentadas pode incluir tanto dados relacionados ao processo (como turbidez da água, medida em NTU, para um sensor do tipo turbidímetro) quanto variáveis ligadas à manutenção preditiva do sensor. Os cartões referentes à **Potência** e **Qualidade do Sinal de Transmissão** são informações fornecidas exclusivamente pelos dispositivos RF propostos neste trabalho. Esses dados, assim como os provenientes dos sensores conectados ao *hardware*, são transmitidos via tecnologia LoRa. A frequência de envio é uma variável configurável do sistema, definida conforme a necessidade da aplicação — neste trabalho, optou-se por um intervalo de 15 segundos entre transmissões. Essa funcionalidade integra os diversos componentes desenvolvidos, como o *hardware* de comunicação por rádio, o *broker* MQTT (implementado via serviço IoT Core gerenciado na nuvem) e os demais serviços de nuvem utilizados para processamento e armazenamento.

A seção intitulada **Histórico** apresenta gráficos com a evolução temporal de variáveis selecionadas, priorizando aquelas com maior sensibilidade ou suscetibilidade a

variações frequentes. Embora a funcionalidade não implemente, nesta versão prototípica, a recuperação de dados armazenados em BD, a visualização se dá de forma contínua a partir do momento em que a página é carregada. Ou seja, os gráficos são alimentados exclusivamente com os dados recebidos em tempo real após o carregamento, sem acesso retroativo. Assim, trata-se de uma representação temporal local e efêmera, em que os dados são processados e plotados dinamicamente por meio de *scripts* em JS na IHM. Em caso de recarregamento da página, os gráficos são reiniciados, e o processo de plotagem se reinicia a partir das novas amostras recebidas. O título “Histórico” é mantido nesta versão como uma referência à funcionalidade planejada para o sistema final, no qual se prevê a integração com serviços de BD em nuvem, permitindo a persistência e recuperação de dados históricos para análises mais robustas.

Embora o site seja estático e tenha sido desenvolvido com fins ilustrativos, sua interface já contempla elementos esperados em sistemas dinâmicos, incluindo a opção de exportação de dados dos gráficos, possibilitando a futura integração com ferramentas externas para análises avançadas ou geração de relatórios técnicos. Além disso, conta com um menu superior que organiza o acesso a diferentes áreas do sistema (como **COCKPIT**, **ESTAÇÕES**, **RELATÓRIOS** e **CONFIGURAÇÕES**) e opções de seleção de período de exibição (**Tempo Real**, **Histórico** ou ambos). O *design* responsivo da interface garante sua adaptabilidade a diferentes dispositivos, como monitores industriais, *notebooks* e *tablets*.

Essa abordagem modular e personalizável do protótipo demonstra o potencial de evolução da IHM para aplicações práticas em ETAs, com integração de dados em tempo real e ferramentas que atendam tanto às demandas de operação quanto de manutenção.

4 Experimentos e Resultados

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos no desenvolvimento e na aplicação da solução proposta para monitoramento em tempo real de parâmetros de qualidade da água em ETAs.

Embora o sistema proposto esteja atualmente em funcionamento em seis ETAs, incluindo a autarquia municipal de Mogi Guaçu/SP e outras cinco unidades da Iguá Saneamento localizadas nos estados de Alagoas, Mato Grosso, Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo, algumas limitações técnicas e operacionais encontradas no setor de saneamento influenciaram o escopo deste trabalho. A realidade sobre a defasagem na adoção de tecnologias avançadas, no Brasil, foi confirmada durante a implementação do sistema proposto, evidenciando a ausência de instrumentação em linha nas ETAs analisadas.

Dessa forma, o sistema desenvolvido nessa dissertação, em conjunto com os sensores analisadores de carga, passou a representar a única instrumentação de monitoramento contínuo em operação nessas unidades. No entanto, é importante destacar que os sensores analisadores de carga utilizados ainda não possuem padronização normativa no Brasil, o que torna extremamente desafiador estabelecer padrões primários ou secundários para sua calibração. Essa limitação impactou diretamente a possibilidade de avaliar com precisão a acurácia do sistema nas seis ETAs.

Além disso, a ausência de diversidade em relação à plataforma de telemetria multiparâmetros, associada à variabilidade operacional entre as unidades, reforçou a necessidade de concentrar os testes e resultados nos cenários foi possível realizar uma análise mais detalhada e controlada. Nesse sentido, os testes realizados na ETA de Mogi Guaçu/SP e no laboratório da Conatus Ambiental permitiram uma avaliação mais criteriosa da solução proposta, evidenciando sua funcionalidade, aplicabilidade e robustez em diferentes condições de operação. Os resultados são organizados de forma a demonstrar a robustez, a funcionalidade e a aplicabilidade do sistema em diferentes contextos operacionais, englobando tanto cenários controlados quanto em condições reais de operação.

Entre os elementos centrais da solução proposta, destaca-se o *hardware* desenvolvido, cuja implementação será descrita a seguir. A apresentação desse componente é fundamental para contextualizar os resultados obtidos nos cenários de teste mencionados.

Inicialmente, é descrito o *hardware* implementado, cuja concepção foi detalhada na Seção 3.1. Serão destacadas suas características técnicas, como o suporte a múltiplas interfaces de comunicação, a integração com sensores industriais e o uso modular que permite sua configuração tanto como *node* quanto como *gateway*.

Em seguida, são apresentadas as IHMs desenvolvidas para facilitar a telemetria em ETAs, oferecendo uma visualização eficiente e intuitiva dos dados monitorados. Essas interfaces desempenham um papel crucial ao simplificar a interação dos operadores com o sistema e ao permitir o acompanhamento em tempo real de parâmetros críticos, contribuindo para maior precisão e agilidade na tomada de decisões.

Posteriormente, é discutida a avaliação da solução com base na comparação entre os valores obtidos por um turbidímetro de bancada e os valores medidos pelo turbidímetro RS485 de terceiros, integrado ao sistema proposto. Essa análise busca verificar a confiabilidade e a consistência do *hardware* e da IHM, reforçando a viabilidade da solução.

Para complementar a apresentação dos resultados e ilustrar a aplicação do sistema em outras ETAs, é apresentada, parcialmente, a IHM do analisador de cargas instalado na ETA Sul, localizada em Cuiabá/MT. Essa inclusão tem como objetivo demonstrar a versatilidade da solução proposta, mesmo que as condições específicas de calibração e validação tenham limitado a análise quantitativa detalhada nas demais unidades.

Por fim, são detalhados dois estudos de caso que evidenciam a aplicabilidade do sistema em diferentes cenários:

- O primeiro estudo foi conduzido na ETA de Mogi Guaçu/SP, onde o *node* foi conectado a um analisador de coagulação em operação, validando o desempenho do sistema em campo.
- O segundo estudo foi realizado em ambiente controlado, utilizando um turbidímetro de terceiros e o analisador de coagulação conectados a diferentes *nodes*, que se comunicaram com o *gateway*. Este estudo destacou a capacidade do sistema de integrar diferentes sensores e de operar de forma confiável em condições laboratoriais.

Por se tratar de um trabalho focado no desenvolvimento dos dispositivos de rádio frequência, a seleção dos sensores utilizados nos estudos de caso não teve como critério principal aspectos metrológicos, como sensibilidade, exatidão, precisão, linearidade ou tempo de resposta. O analisador de coagulação foi escolhido por ser um sensor em desenvolvimento pela Conatus Ambiental, enquanto o turbidímetro foi selecionado com base em uma relação custo-benefício para viabilizar os testes. Assim, o objetivo dos estudos de caso não foi avaliar o desempenho individual dos sensores, mas sim validar a capacidade do sistema de integrar diferentes equipamentos e operar de forma confiável em distintos cenários.

Os resultados apresentados neste capítulo buscam evidenciar o impacto da solução desenvolvida no contexto de monitoramento ambiental, contribuindo para avanços significativos no setor de tratamento de água.

4.1 Hardware Implementado: Descrição e Funcionalidades

Nesta seção, são apresentados os resultados relacionados ao *hardware* desenvolvido para este trabalho, conforme discutido na Seção 3.1. O dispositivo implementado é uma solução versátil que pode atuar tanto como *node* quanto como *gateway*, e foi projetado para atender às necessidades de monitoramento de diversos sensores industriais do saneamento. A seguir, são detalhadas as características do *hardware* e suas aplicações em campo e em ambiente controlado.

A Figura 4.1 ilustra a PCB desenvolvida, cuja concepção foi descrita na Seção 3.1. Na Figura 4.1, pode-se observar a vista superior do *hardware*, destacando a integração dos circuitos eletrônicos e da antena externa conectada ao rádio LoRa. A placa possui dimensões compactas ($74,5 \times 71,5$ mm), permitindo sua aplicação em cenários diversos, como monitoramento de qualidade da água em ETAs.



Figura 4.1 – Placa do *hardware* introduzido na Seção 3.1 para atuação como *node* ou *gateway*.

A Figura 4.2 apresenta o dispositivo em campo, configurado como *node*, conectado via interface serial UART a um sensor analisador de coagulação, desenvolvido pela Conatus Ambiental, em operação na ETA de Mogi Guaçu/SP. Este *setup* foi utilizado para monitorar parâmetros críticos do processo de coagulação em tempo real, evidenciando a robustez e a aplicabilidade do *hardware* em condições reais de operação.

Além do sensor analisador de coagulação, o *hardware* foi avaliado em ambiente controlado conectado a um turbidímetro RS485 comercial, modelo VMS-3001-ZD-N01-* da fabricante chinesa Anhui Zhiqiong, conforme ilustrado na Figura 4.3. A Figura 4.3a mostra o turbidímetro durante os testes de operação, enquanto a Figura 4.3b apresenta o *node* evidenciando a conexão com o turbidímetro via protocolo RS485. Esses testes foram realizados para validar a precisão na transmissão dos dados monitorados e a interoperabilidade do *hardware* com dispositivos de diferentes fabricantes, conforme serão abordados

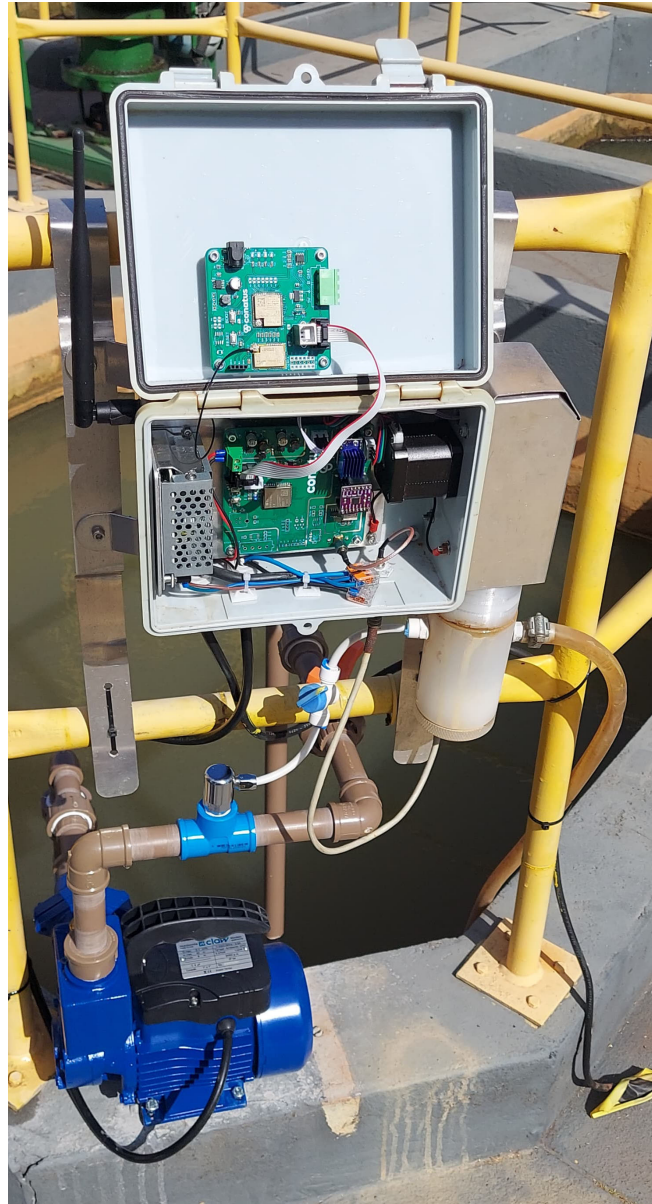
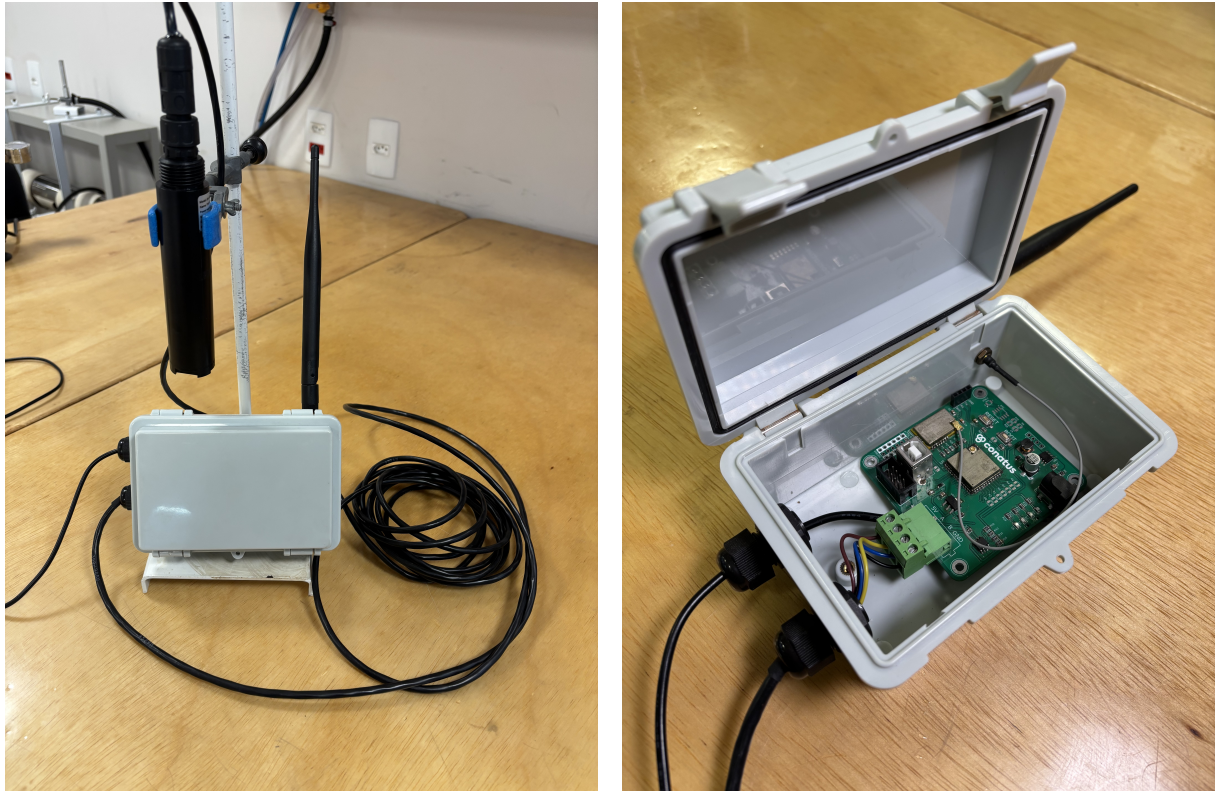


Figura 4.2 – *Node* conectado via serial UART com o sensor analisador de coagulação na ETA de Mogi Guaçu/SP.

nas Seções 4.3 e 4.4, respectivamente.

O dispositivo RF também foi configurado para operar como *gateway*, utilizando um *firmware* específico, descrito no Algoritmo 3.2. Nesta configuração, o *gateway* não possui sensores conectados diretamente, funcionando exclusivamente como ponto central de comunicação para a RSSF. O *hardware* é acondicionado de forma semelhante à do *node* apresentado na Figura 2.3, sendo instalado em uma caixa hermética com Índice de Proteção contra jatos de água de alta pressão (IP66). Este aspecto destaca a flexibilidade do *hardware* desenvolvido, que pode ser adaptado para diferentes funções no sistema de monitoramento.

Os resultados obtidos nos cenários de operação em campo e em laboratório de-



(a) Turbidímetro conectado ao *node* em ambiente controlado.

(b) Detalhe do *node* conectado ao turbidímetro via protocolo RS485.

Figura 4.3 – *Setup* experimental com o turbidímetro de terceiros conectado ao sistema proposto.

monstram a funcionalidade e confiabilidade do *hardware* implementado. No caso do *node* conectado ao analisador de coagulação, em operação contínua na ETA, foi possível verificar a robustez do sistema em condições adversas. Já os testes com o *node* conectado ao turbidímetro em ambiente controlado reforçam a precisão dos dados transmitidos e a compatibilidade do *node* com sensores industriais amplamente utilizados.

4.2 IHM: Visualização e Telemetria

A telemetria tem desempenhado um papel crucial no monitoramento remoto de processos industriais, permitindo o diagnóstico e a tomada de decisão em tempo real. No contexto do tratamento de água, a personalização das IHMs assegura que os operadores tenham acesso às informações mais relevantes de maneira clara e objetiva. Além disso, essas interfaces tornam o acompanhamento dos parâmetros operacionais mais intuitivo, permitindo que os operadores atuem de maneira proativa e eficiente. No presente projeto, foram desenvolvidas IHMs específicas para cada dispositivo monitorado, com o objetivo de atender às particularidades e demandas de cada aplicação. Nos próximos parágrafos, serão apresentadas as principais características dessas interfaces.

A primeira IHM, parcialmente ilustrada na Figura 4.4, corresponde ao analisador de coagulação, instalado na ETAs Sul, em Cuiabá/MT. A IHM consiste em uma página *web* que apresenta ao usuário em tempo real as condições de funcionamento do sensor. Essas informações incluem o funcionamento da parte mecânica do sensor, sua grandeza fundamental (que monitora o processo de coagulação do material particulado na água em tratamento), a detecção de ruído relevante no sistema e a medição da tensão de *offset*.

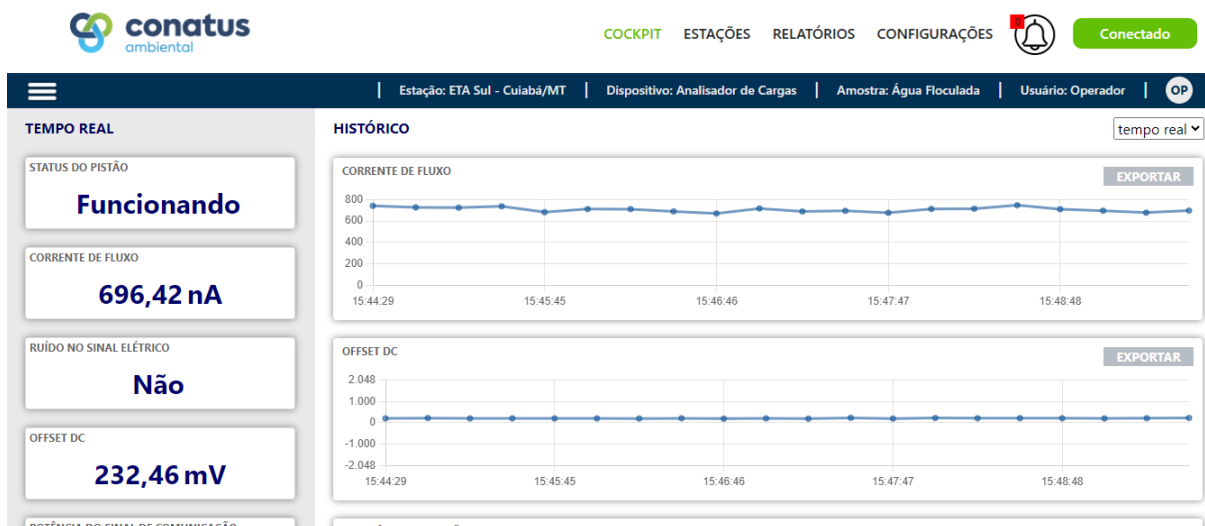


Figura 4.4 – Imagem parcial da interface de comunicação para telemetria dos parâmetros do analisador de coagulação instalado na ETA Sul, Cuiabá/MT.

Complementando o analisador de coagulação, o sistema também inclui o turbidímetro, cuja interface é apresentada na Figura 4.5. O equipamento foi utilizado para aferir a turbidez de amostras durante os testes realizados em ambiente controlado.



Figura 4.5 – Imagem parcial da interface de comunicação para telemetria dos parâmetros do turbidímetro de terceiros, utilizados nos testes em ambiente controlado na Conatus, Mogi Guaçu/SP.

A quantidade de itens monitorados varia conforme as características construtivas de cada sensor, como pode ser observado ao comparar as Figuras 4.4 e 4.5. O sensor analisador de cargas, por exemplo, monitora quatro parâmetros principais. No caso do turbidímetro, os dados monitorados são restritos às medições específicas de turbidez, refletindo sua função única no sistema de telemetria. Adicionalmente, ambas as IHMs compartilham informações relacionadas à qualidade e potência do sinal de telecomunicação, essenciais para garantir a confiabilidade na transmissão de dados dos dispositivos RF configurados como *nodes*.

Por fim, a Figura 4.6 apresenta a interface para o *gateway*, instalada na ETA Aristides Bueno, em Mogi Guaçu/SP, que centraliza e transmite os dados dos sensores para o servidor. Por meio da Figura 4.6 é possível perceber que os gráficos históricos pre-



Figura 4.6 – Interface de comunicação para telemetria dos parâmetros do *gateway*, instalado na ETA Aristides Bueno, Mogi Guaçu/SP.

sentes nas IHMs foram implementados apenas para variáveis cujos valores apresentavam alterações significativas ao longo do tempo. Dessa forma, para grandezas cuja variação era praticamente nula, optou-se por não gerar tais gráficos, priorizando a clareza e a organização das informações exibidas. Os cartões CANAL e ENDEREÇO apresentam o canal de comunicação da rede por onde os dados trafegam e o endereço *Internet Protocol* (IP) do dispositivo, respectivamente, e, como eles são estáticos, não apresentam gráfico de histórico.

As IHMs desenvolvidas facilitam o monitoramento em tempo real e otimizam os processos operacionais, promovendo uma gestão eficiente e segura dos recursos. Dessa forma, tornam-se ferramentas indispensáveis para o controle operacional e a redução de falhas ou interrupções nos sistemas.

4.3 Comparação de Medições: Turbidímetro de Bancada e Turbidímetro RS485 de Linha.

Para verificar a confiabilidade e a precisão das medições realizadas pelo sistema proposto, foram realizados testes comparativos entre um turbidímetro comercial de bancada, considerado um padrão secundário de calibração, e um nó-sensor, composto por um turbidímetro comercial de linha integrado ao *hardware* desenvolvido nesta dissertação. O objetivo foi avaliar a concordância entre as medições realizadas por ambos os dispositivos e, assim, validar a eficácia do nó-sensor para aplicações práticas em processos de monitoramento da qualidade da água.

O turbidímetro de bancada utilizado foi o modelo AKSO TU430, com faixa operacional de 0 a 1000 *NTU* e precisão de $\pm(0,5NTU + 5\%)$. Já o turbidímetro de linha, configurado para operar na faixa de 0 a 200 *NTU*, foi adquirido pela Conatus Ambiental com recursos próprios, visando sua futura aplicação em campo. Para os testes, foram preparadas suspensões de turbidez em diferentes concentrações utilizando polímero de formazina, conforme recomendado pelas normas Environmental Protection Agency (EPA) 180.1 e International Organization for Standardization (ISO) 7027. As concentrações escolhidas, que variaram entre 10 *NTU* e 200 *NTU*, cobrem uma faixa de valores representativa para aplicações típicas em ETAs.

Os experimentos foram realizados nos dias 24, 25 e 26 de abril de 2024, em ambiente controlado. Em cada um desses dias, uma nova série de testes foi conduzida, totalizando três séries de testes. Cada amostra foi analisada em triplicata, com as leituras do turbidímetro de bancada registradas manualmente e as medições do turbidímetro de linha transmitidas em tempo real para a IHM do sistema proposto. Essa abordagem demonstrou a eficácia do sistema integrado para registro e monitoramento contínuo, permitindo a coleta e análise dos dados em tempo real.

Os resultados das três séries de testes, correspondentes aos três dias de experimentos, estão apresentados na Figura 4.7, que evidencia a proximidade entre as medições realizadas pelos dois dispositivos, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9927. Essa alta correlação confirma a confiabilidade das medições realizadas pelo nó-sensor, validando sua aplicação como uma solução viável para monitoramento de turbidez.

Embora os dados se ajustem a um modelo linear com elevado R^2 , observou-se uma maior variabilidade nas medições do turbidímetro de linha para valores de turbidez inferiores a 50 *NTU*, devido à menor sensibilidade desses dispositivos em baixas concentrações. Na indústria de tratamento de água, turbidímetros com precisão de $\pm 2\%$ ou $\pm 0,02NTU$ são comumente utilizados, com maior variabilidade observada justamente para valores abaixo de 50 *NTU*. Apesar dessa limitação, os resultados gerais mostram

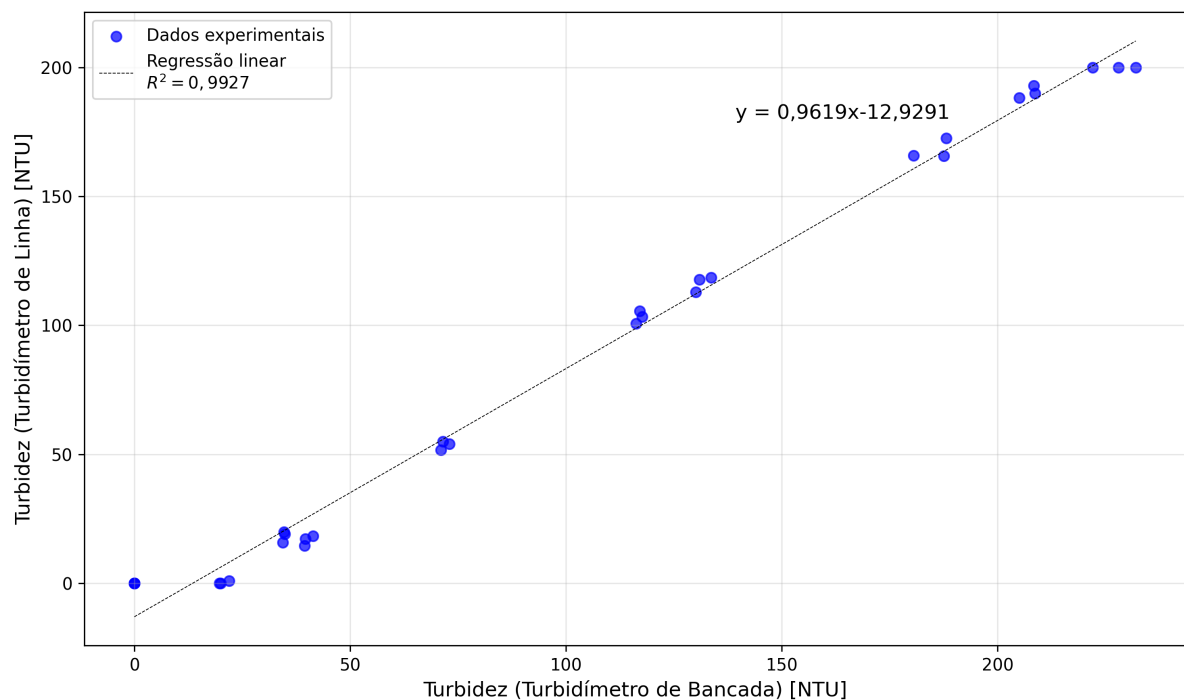


Figura 4.7 – Comparação entre os valores de turbidez medidos pelo turbidímetro de bancada e pelo nó-sensor. Dados combinados das três séries de testes realizadas nos dias 24, 25 e 26 de abril de 2024.

que as medições realizadas pelo nó-sensor são suficientemente precisas para aplicações práticas, especialmente na faixa operacional superior a 50 *NTU*, onde as medições estão dentro dos padrões industriais, que exigem uma precisão mínima de $\pm 10\%$.

A integração da IHM foi essencial para o monitoramento contínuo durante os testes. A interface permitiu acompanhar em tempo real as medições realizadas pelo nó-sensor, identificando eventuais discrepâncias e assegurando a integridade dos dados coletados. Essa funcionalidade é especialmente relevante para aplicações em campo, onde a visualização imediata das medições pode auxiliar na tomada de decisões operacionais.

Em resumo, os resultados obtidos demonstram que o nó-sensor desenvolvido pode ser considerado uma solução confiável para monitoramento de turbidez, validada pela comparação com o turbidímetro de bancada. A concordância entre as medições reforça a aplicabilidade do sistema proposto para utilização em ETAs, contribuindo para o avanço tecnológico do setor de saneamento.

4.4 Avaliação em Ambiente Controlado do Arcabouço com Multiparâmetros

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos no primeiro estudo de caso, conduzido em um ambiente controlado nas instalações da Conatus Ambiental, localizadas em Mogi Guaçu/SP. Este cenário foi escolhido para avaliar a funcionalidade e a confiabilidade da solução desenvolvida em condições mais estáveis e monitoradas, permitindo uma análise criteriosa do comportamento do sistema. Além disso, este estudo representou a primeira aplicação da plataforma proposta com múltiplos sensores conectados simultaneamente, destacando sua capacidade de integração e operação com diferentes dispositivos.

Os testes foram realizados utilizando dois sensores: um turbidímetro de terceiros, conectado ao *node* por meio do protocolo RS485, e um analisador de coagulação, utilizando comunicação serial UART. Ambos os *nodes* estavam configurados para transmitir os dados coletados ao *gateway* central, responsável por enviar as informações para a nuvem. A integração de múltiplos sensores ao sistema buscou validar a robustez da comunicação na RSSF, bem como a consistência dos dados monitorados.

A Figura 4.8 apresenta os dados coletados durante o experimento, que incluem: corrente de fluxo (principal medição do analisador de coagulação), turbidez (principal medição do turbidímetro), potência do sinal de conexão entre *nodes* e *gateway*, e *status* de conectividade do *gateway* com a **AWS!** (**AWS!**). Os dados referem-se ao monitoramento realizado no dia 17 de abril de 2024, no intervalo de 10h25 às 23h59. Esse período foi selecionado para contemplar tanto o funcionamento contínuo do sistema quanto situações específicas que evidenciam a resposta do sistema a falhas simuladas e interrupções controladas.

Entre 12h00 e 13h50, ocorreu uma interrupção simulada na conectividade com a Internet, como indicado pelo *status* de conexão do *gateway* na Figura 4.8. Durante esse período, os dados coletados pelos sensores foram armazenados localmente no cartão de memória SD do *gateway*. Após a restauração da conexão, foi possível realizar a recuperação manual dos dados armazenados localmente, demonstrando a eficácia do mecanismo de redundância implementado para mitigar falhas temporárias de comunicação com o servidor na nuvem. A recuperação desses dados, no entanto, ainda precisa ser feita manualmente, uma vez que a ausência de um módulo *Real Time Clock* (RTC) funcional na PCB impede o registro confiável de carimbos de tempo durante a desconexão, dificultando a organização automática das informações após o restabelecimento da comunicação.

Além disso, os testes destacaram o impacto da qualidade do sinal de rádio entre os *nodes* e o *gateway*. Em momentos de baixa intensidade do sinal, os dados foram transmitidos com atraso, mas sem perda, evidenciando a robustez da comunicação LoRa.

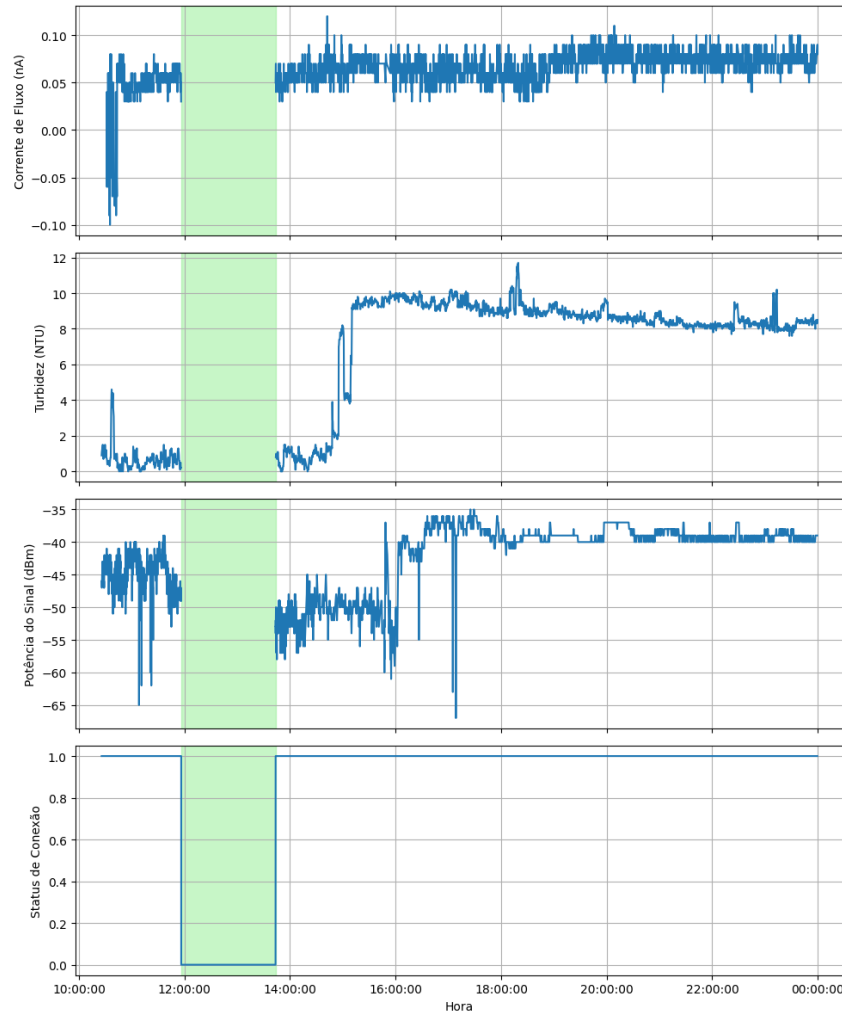


Figura 4.8 – Monitoramento dos parâmetros em ambiente controlado, de cima para baixo: corrente de fluxo (principal medição do analisador de coagulação), turbidez (principal medição do turbidímetro), potência do sinal de conexão entre os dispositivos, *status* de conexão do *gateway* com a Internet.

A análise dos dados de turbidez e corrente de fluxo mostrou que as medições eram consistentes com os valores esperados, reforçando a confiabilidade do sistema para diferentes tipos de sensores industriais.

Este estudo de caso demonstrou que o sistema é capaz de integrar múltiplos sensores e operar de forma eficiente em condições controladas. A capacidade de armazenar dados localmente durante falhas de comunicação, aliada à robustez da transmissão em redes de baixa potência, evidencia o potencial da solução para atender às demandas operacionais do setor de saneamento, mesmo em cenários desafiadores.

4.5 Analisador de Coagulação em Ambiente Operacional

Nesta última seção de estudo de caso, é analisada a aplicação do sistema desenvolvido em um ambiente operacional real. Diferentemente dos testes realizados em laboratório, este estudo foi conduzido na ETA Municipal de Mogi Guaçu/SP, permitindo avaliar o desempenho do sistema em condições práticas de operação. A escolha da unidade de Mogi Guaçu como cenário de estudo se deve à proximidade geográfica com a Conatus Ambiental, empresa responsável pelo desenvolvimento e suporte técnico do projeto, o que facilitou o acompanhamento contínuo e a realização de ajustes necessários durante os testes.

A Figura 4.9 apresenta os resultados coletados durante o monitoramento da ETA, destacando os seguintes parâmetros, dispostos de forma hierárquica: *status* de conectividade com a Internet, potência do sinal entre o *gateway* e o *node*, frequência de operação do pistão do sensor analisador de coagulação e corrente de fluxo, que é a principal grandeza medida no processo de coagulação. Os dados foram coletados no dia 5 de maio de 2024, entre 14h15 e 23h56, abrangendo tanto períodos de funcionamento regular quanto eventos operacionais que impactaram o sistema.

No intervalo destacado em amarelo na Figura 4.9, entre 19h30 e 19h45, houve uma interrupção temporária nos dados do sensor analisador de coagulação. Esse evento coincidiu com uma manutenção preventiva realizada pela equipe da ETA, que incluiu a limpeza do sensor. Durante esse procedimento, os circuitos responsáveis pela aquisição de dados e pelo motor de passo foram desligados, resultando na ausência de leituras da frequência de operação do pistão e da corrente de fluxo, ambas registradas como 0 Hz e 0 nA, respectivamente. Este comportamento, embora esperado, evidencia o correto funcionamento do sistema ao refletir as condições operacionais em tempo real. Além disso, a conectividade da RSSF foi preservada, com o *node* mantendo sua comunicação com o *gateway* mesmo durante a interrupção.

Outro evento relevante foi observado no intervalo destacado em cinza, entre 22h00 e 22h50, quando o *gateway* perdeu temporariamente a conexão com a Internet. Durante esse período, o *status* de conectividade do *gateway* foi registrado como inativo, indicando a ausência de comunicação com o servidor na nuvem. Como consequência, os dados do sensor não puderam ser transmitidos em tempo real. No entanto, o sistema ativou automaticamente o mecanismo de armazenamento local no cartão de memória SD, preservando os dados coletados durante a desconexão. Após a restauração da conexão, foi necessário realizar a recuperação manual das informações armazenadas localmente para completar o histórico de medições no banco de dados em nuvem. Esse recurso destaca a robustez do sistema, garantindo a integridade dos dados mesmo em cenários de falhas temporárias de comunicação.

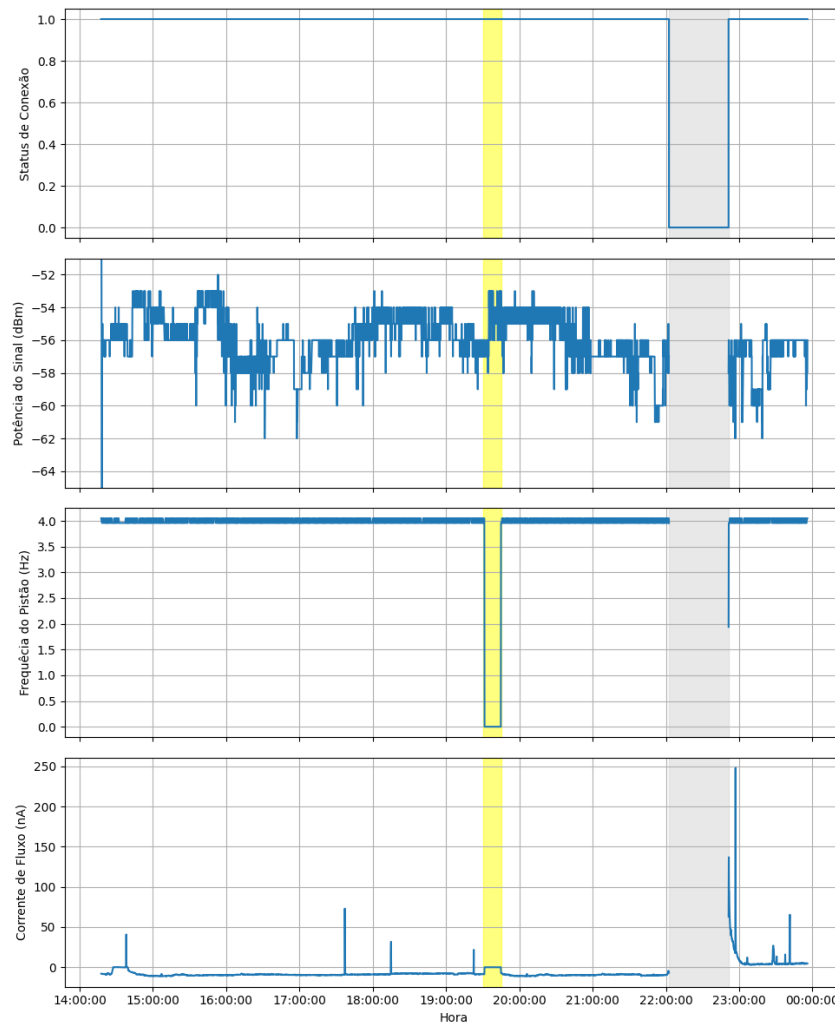


Figura 4.9 – Parâmetros do monitoramento na ETA Municipal de Mogi Guaçu/SP. De cima para baixo: *status* de conexão do *gateway* com a Internet, potência do sinal entre *gateway* e *node*, frequência do pistão do sensor analisador de coagulação e corrente de fluxo (principal grandeza medida pelo sensor).

Os resultados obtidos demonstram a eficácia e a resiliência da solução proposta em um ambiente operacional real. A manutenção do sensor analisador de coagulação, embora tenha causado uma interrupção nas medições, ilustrou a capacidade do sistema de registrar eventos críticos do processo, auxiliando os operadores na análise e otimização das condições de operação. Por outro lado, a perda temporária de conexão com a Internet evidenciou a importância do armazenamento local como estratégia complementar para garantir a continuidade do monitoramento.

Em resumo, o sistema desenvolvido atendeu às demandas práticas do setor de saneamento, oferecendo uma solução confiável para monitoramento contínuo e em tempo real. Os resultados apresentados reforçam a viabilidade da aplicação do *hardware* e do *software* desenvolvidos em condições reais de operação, com potencial para aprimorar significativamente a gestão de processos em ETAs em todo o Brasil.

5 Conclusões

O tratamento de água enfrenta desafios crescentes, amplificados pelas variabilidades naturais da água bruta, pressões regulatórias e a necessidade de maior eficiência nos processos operacionais. A adoção de soluções tecnológicas avançadas no setor de saneamento ainda é limitada, especialmente no Brasil, onde muitas ETAs dependem de práticas manuais e análises intermitentes, dificultando o acompanhamento em tempo real de parâmetros críticos.

Nesse cenário, a integração de tecnologias como IoT e RSSFs surge como uma resposta promissora para modernizar os processos de monitoramento e controle em ETAs. A solução desenvolvida neste trabalho, parte de um projeto maior conduzido pela Conatus Ambiental, foi concebida para preencher essa lacuna tecnológica, proporcionando uma plataforma integrada que combina sensores industriais, transmissão em tempo real e interfaces intuitivas para o acompanhamento remoto dos dados.

Ao longo deste trabalho, foi possível identificar a importância de uma abordagem robusta para lidar com desafios como a ausência de padronização de sensores emergentes e a necessidade de comunicação eficiente em ambientes industriais. A solução desenvolvida abrangeu desde o projeto e implementação de um *hardware* modular, capaz de operar como nó-sensor ou *gateway*, até a integração com interfaces de usuário projetadas para facilitar a interação com os dados monitorados. Essa proposta alia flexibilidade técnica e operacional, permitindo sua aplicação em diferentes cenários do setor de saneamento.

Os resultados alcançados evidenciaram a robustez e a aplicabilidade do sistema em diferentes contextos. Em ambientes controlados, o sistema demonstrou capacidade de operar com múltiplos sensores e apresentou medições consistentes em relação a outros equipamentos comerciais. Em campo, o sistema operou continuamente na ETA de Mogi Guaçu/SP, comprovando sua eficiência em condições reais de operação, mesmo diante de desafios como interrupções de conectividade. Além disso, a IHM implementada destacou-se como uma ferramenta essencial, permitindo o acompanhamento remoto e contínuo das medições, simplificando a gestão dos processos de tratamento e otimizando a resposta a eventuais desvios.

Este trabalho representa um passo importante no avanço tecnológico do setor de saneamento, propondo uma solução integrada que alia inovação, praticidade e escalabilidade. Ao incorporar tecnologias emergentes e atender às especificidades do setor, o sistema desenvolvido oferece maior controle e confiabilidade aos processos de tratamento de água, pavimentando o caminho para futuras aplicações em larga escala.

5.1 Trabalhos Futuros

Embora a solução proposta tenha demonstrado sua eficácia em diferentes cenários de aplicação, há ainda diversos aprimoramentos e expansões que podem ser explorados para consolidar e ampliar sua aplicabilidade. Esses avanços contemplam tanto o aperfeiçoamento do *hardware* e do protocolo de comunicação quanto a ampliação dos recursos computacionais e da infraestrutura em nuvem.

Uma das melhorias no *hardware* inclui a incorporação de um RTC alimentado por uma bateria tipo moeda. Essa funcionalidade permitiria que os dados armazenados no cartão de memória SD fossem enviados para a nuvem com a ordem cronológica correta, mesmo em situações de desconexão temporária com a Internet. Essa adição garantiria maior precisão na reconstrução do histórico de dados, sendo particularmente útil em ambientes com conectividade instável.

No âmbito da IHM, um avanço significativo seria a transição para um modelo de site dinâmico, possibilitando uma navegação por níveis. A página inicial apresentaria uma visão macro da ETA, destacando as principais informações de forma semelhante a sistemas supervisórios, enquanto camadas mais internas permitiriam o monitoramento detalhado de cada sensor. Essas camadas adicionais poderiam incluir não apenas parâmetros secundários dos sensores, mas também dados meteorológicos e das condições climáticas do manancial, fornecendo uma visão integrada e estratégica para os operadores.

Outro aspecto relevante é a evolução do protocolo de comunicação utilizado na RSSF. A implementação de recursos avançados do protocolo, como suporte à QoS, mecanismos de cibersegurança aprimorados e controle eficiente de congestionamento na rede e interferência a fatores externos, promoveria maior confiabilidade e interoperabilidade na rede. Além disso, a adaptação do protocolo para operação em modo *full-duplex* viabilizaria a introdução de nós-atuadores na rede, ampliando sua funcionalidade para além do monitoramento passivo. Essa evolução permitiria ações automáticas e em tempo real, como o ajuste de válvulas ou a dosagem de produtos químicos, elevando o sistema a um novo patamar de automação e controle operacional.

Do ponto de vista computacional, a expansão dos serviços em nuvem AWS apresenta uma oportunidade significativa para aumentar a robustez e escalabilidade da solução. Serviços como o AWS Amplify e o Cognito permitiriam a criação de autenticações seguras e a gestão de usuários em plataformas dinâmicas. A introdução do SageMaker possibilitaria a integração de IA para análise preditiva, identificando tendências nos dados e detectando anomalias nos processos de tratamento.

A integração entre o Lambda e o SNS seria outro avanço importante. O Lambda pode ser configurado para identificar automaticamente parâmetros fora do esperado nos

dados transmitidos pelos sensores. Uma vez detectada uma anomalia, o SNS poderia ser usado para enviar notificações em tempo real para operadores ou supervisores da ETA. Essas notificações, que poderiam incluir alertas por e-mail ou mensagens de texto, garantiriam uma resposta ágil a possíveis problemas operacionais, minimizando riscos e otimizando o tempo de reação.

Além disso, o uso do Athena facilitaria a realização de consultas e análises diretamente no banco de dados, enquanto o RDS serviria como um banco de dados relacional para a gestão eficiente de grandes volumes de dados estruturados. Essas ferramentas, combinadas, forneceriam uma base sólida para análises mais detalhadas e para a geração de relatórios operacionais.

Finalmente, a realização de estudos em novas ETAs, abrangendo diferentes características de qualidade da água bruta e variabilidades extremas, permitirá validar a solução em cenários mais desafiadores. A inclusão de sensores adicionais, como o sensor de potencial de oxidação-redução (ORP), é uma melhoria promissora. Esse tipo de sensor, amplamente utilizado no controle de processos químicos e biológicos, seria extremamente interessante para o monitoramento da eficiência de processos de oxidação e desinfecção no tratamento de água.

Essas evoluções, combinadas, têm o potencial de transformar a solução desenvolvida em uma plataforma completa e integrada para monitoramento, controle e automação de ETAs, contribuindo de maneira significativa para a modernização e eficiência dos processos de tratamento de água.

Referências

- ABDUL-QAWY, A. S. H.; ALMURISI, N. M. S.; TADISETTY, S. Classification of energy saving techniques for iot-based heterogeneous wireless nodes. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 171, p. 2590–2599, 2020.
- ABDULLAH, A. et al. Cybersecurity: a review of internet of things (iot) security issues, challenges and techniques. In: IEEE. *2019 2nd International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*. [S.l.], 2019. p. 1–6.
- ABELL, R. et al. Freshwater ecoregions of the world: a new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *BioScience*, American Institute of Biological Sciences, v. 58, n. 5, p. 403–414, 2008.
- ABIDIN, S.; VADI, V. R.; RANA, A. On confidentiality, integrity, authenticity, and freshness (ciaf) in wsn. In: SPRINGER. *Advances in Computer, Communication and Computational Sciences: Proceedings of IC4S 2019*. [S.l.], 2021. p. 87–97.
- ACHITE, M. et al. Modeling and optimization of coagulant dosage in water treatment plants using hybridized random forest model with genetic algorithm optimization. *Environment, Development and Sustainability*, Springer, v. 25, n. 10, p. 11189–11207, 2023.
- ADELEKE, I. A.; NWULU, N. I.; OGBOLUMANI, O. A. A hybrid machine learning and embedded iot-based water quality monitoring system. *Internet of things*, Elsevier, v. 22, p. 100774, 2023.
- Agência Nacional de Águas (ANA). *Lista de termos para o Thesaurus de Recursos Hídricos*. 2015. Disponível em: <www.ana.gov.br>. Acesso em 25 de maio de 2022.
- AHMAD, R.; SUNDARARAJAN, E. A.; ABU-AIN, T. Analysis the effect of clustering and lightweight encryption approaches on wsns lifetime. In: IEEE. *2021 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*. [S.l.], 2021. p. 1–6.
- ALJADANI, N.; GAZDAR, T. A novel security architecture for wsn-based applications in smart grid. *Smart Cities*, MDPI, v. 5, n. 2, p. 633–649, 2022.
- ALMETWALLY, S. A. H.; HASSAN, M. K.; MOURAD, M. H. Real time internet of things (iot) based water quality management system. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 91, p. 478–485, 2020.
- ANDRÉ, A. C. L.; AMORIM, M. C. C. de; SILVA, K. C. D. da. Mapeamento tecnológico de sensores e sistemas iot para monitoramento da qualidade de água e efluentes no setor de saneamento: Análise de patentes. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 19, n. 57, p. 114–124, 2023.
- ANGELAKIS, A.; VOUDOURIS, K.; TCHOBANOGLIOUS, G. Evolution of water supplies in the hellenic world focusing on water treatment and modern parallels. *Water Supply*, IWA Publishing, v. 20, n. 3, p. 773–786, 2020.

- ASERKAR, A. A. et al. Real-time air quality monitoring in smart cities using iot-enabled advanced optical sensors. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, v. 15, n. 4, 2024.
- ASHTON, K. et al. That ‘internet of things’ thing. *RFID journal*, Hauppauge, New York, v. 22, n. 7, p. 97–114, 2009.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: A survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.
- BABU, P. D.; PAVANI, C.; NAIDU, C. E. Cyber security with iot. In: IEEE. *2019 Fifth International Conference on Science Technology Engineering and Mathematics (ICONSTEM)*. [S.l.], 2019. v. 1, p. 109–113.
- BAKKER, K. Water security: research challenges and opportunities. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 337, n. 6097, p. 914–915, 2012.
- BARROS, S. C. de. *Instrumentação e controle de uma estação de tratamento de água*. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- BEEK, E. V.; ARRIENS, W. L. *Water security: Putting the concept into practice*. [S.l.]: Global Water Partnership Stockholm, 2014.
- BOEHM, C. *Falta de saneamento básico causa mais de 273 mil internações em 2019*. 2021. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2021-10/falta-de-saneamento-basico-causa-mais-de-273-mil-internacoes-em-2019>>. Acesso em 26 de maio de 2022.
- BOUAZIZ, M.; RACHEDI, A. A survey on mobility management protocols in wireless sensor networks based on 6lowpan technology. *Computer Communications*, Elsevier, v. 74, p. 3–15, 2016.
- BRASIL. *Código de Águas*. 1934. Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d24643compilado.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2024.643%2C%20DE%2010%20DE%20JULHO%20DE%20201934.&text=Decreta%20o%20C%C3%B3digo%20de%20%20C3%81guas.&text=%C3%81GUAS%20P%C3%9ABLICAS-,Art.,de%20uso%20comum%20ou%20dominicais.>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- BRASIL. *Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989*. [S.l.]: Presidência da República Brasília, DF, 1997.
- BRASIL. *Portaria nº 518, de 25 de março de 2004*. 2004. <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2004/prt0518_25_03_2004.html>. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BRASIL. *Presidente Jair Bolsonaro sanciona o novo marco de saneamento básico do Brasil*. 2020. Acesso em: 20 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/secretariageral/pt-br/noticias/2020/julho/presidente-jair-bolsonaro-sanciona-o-novo-marco-de-saneamento-basico-do-brasil>>.

Brasil. *Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021*. 2021. <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-317946561>>. Atualiza os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seus padrões de potabilidade.

CARTAXO, A. d. S. B. et al. Saneamento ambiental no brasil: Água e esgoto desafios e perspectivas. In: *Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*. João Pessoa: Ecogestão Brasil: [s.n.], 2019. p. 249–255.

CAUDILL, G. W. Privacy management in the internet of things (iot). *Women Securing the Future with TIPPSS for IoT: Trust, Identity, Privacy, Protection, Safety, Security for the Internet of Things*, Springer, p. 131–139, 2019.

CHARAF, L. A. et al. A distributed xacml based access control architecture for iot systems. In: IEEE. *2020 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*. [S.l.], 2020. p. 1–5.

CHONG, C.-Y.; KUMAR, S. P. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 91, n. 8, p. 1247–1256, 2003.

CLASEN, T. et al. Interventions to improve water quality for preventing diarrhoea: systematic review and meta-analysis. *Bmj*, British Medical Journal Publishing Group, v. 334, n. 7597, p. 782, 2007.

Expressif Systems. *ESP32-S3 – Technical Reference Manual*. 2023. 1–1482 p. Disponível em: <www.espressif.com>.

FAHMY, H. M. A. *Wireless sensor networks: concepts, applications, experimentation and analysis*. [S.l.]: Springer, 2016.

FAN, K.; XU, Y. Intelligent control system for flocculation of water supply. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2021. v. 1939, n. 1, p. 012064.

FEWTRELL, L. et al. Water, sanitation, and hygiene interventions to reduce diarrhoea in less developed countries: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet infectious diseases*, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 42–52, 2005.

FUNASA. *Manual de saneamento*. 5. ed. Brasília, DF: Funasa, 2019. ISBN 978-85-7346-060-5.

GASHI, L.; LUMA, A.; JANUZAJ, Y. The integration of wireless sensor networks, mobile networks and cloud engineering for a decision support system-a systematic literature review. In: IEEE. *2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. [S.l.], 2022. p. 1–8.

GONCALVES, L. C. et al. Monitoramento de etas e dosagem de químicos: Uma abordagem via arquitetura iot. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA 2024*. [S.l.: s.n.], 2024. v. 4, n. 1, p. 1–6.

- GOPI, R. S. et al. Elderly people health care monitoring system using internet of things (iot) for exploratory data analysis. *Babylonian Journal of Artificial Intelligence*, v. 2024, p. 54–63, 2024.
- GUEDES, A. F. et al. Tratamento da água na prevenção de doenças de veiculação hídrica. *Journal of Medicine and Health Promotion*, v. 2, n. 1, p. 452–461, 2017.
- GUPTA, P.; JOSHI, T. Towards a secure and ethical framework for big data privacy in the internet of things (iot) landscape. *International Journal of Applied Health Care Analytics*, v. 8, n. 8, p. 54–71, 2023.
- HAILEMARIAM, K. Networks, internet of things, and their challenges. *Google Scholar*, 2022.
- HEALY, M.; NEWE, T.; LEWIS, E. Wireless sensor node hardware: A review. *SENSORS, 2008 IEEE*, IEEE, p. 621–624, 2008.
- HERMANN, C. Buscar vitruvius nos trópicos-percepções de viajantes ingleses da primeira metade do século xix sobre o aqueduto da carioca. *Revista Concinnitas*, v. 2, n. 21, p. 105–124, 2012.
- ISLAM, M. S.; DEY, G. K. Precision agriculture: renewable energy based smart crop field monitoring and management system using wsn via iot. In: IEEE. *2019 International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI)*. [S.l.], 2019. p. 1–6.
- KASSAB, W.; DARABKH, K. A. A–z survey of internet of things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations. *Journal of Network and Computer Applications*, Elsevier, v. 163, p. 102663, 2020.
- KHASHAN, O. A.; AHMAD, R.; KHAFAJAH, N. M. An automated lightweight encryption scheme for secure and energy-efficient communication in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 115, p. 102448, 2021.
- KIM, H.; KYUE, D. Technology and security of iot. *Journal of The Korea Institute of Information Security and Cryptology*, v. 22, n. 1, p. 7–13, 2012.
- KIM, J. H. A review of cyber-physical system research relevant to the emerging it trends: industry 4.0, iot, big data, and cloud computing. *Journal of industrial integration and management*, World Scientific, v. 2, n. 03, p. 1750011, 2017.
- KUMAR, V.; TIWARI, S. Routing in ipv6 over low-power wireless personal area networks (6lowpan): A survey. *Journal of Computer Networks and Communications*, Wiley Online Library, v. 2012, n. 1, p. 316839, 2012.
- LIMA, L. O. M. et al. Iot-based wireless sensor networks for monitoring drinking water treatment plants. In: *2024 Symposium on Internet of Things (SIoT)*. [S.l.: s.n.], 2024. v. 1, p. 1–5.
- LIU, J. et al. Internet of things challenges and future scope for enhanced living environments. In: *Advances in Computers*. [S.l.]: Elsevier, 2024. v. 133, p. 201–246.
- LÓPEZ-RAMÍREZ, G. A.; ARAGÓN-ZAVALA, A. Wireless sensor networks for water quality monitoring: a comprehensive review. *IEEE access*, IEEE, v. 11, p. 95120–95142, 2023.

- MAJID, M. et al. Applications of wireless sensor networks and internet of things frameworks in the industry revolution 4.0: A systematic literature review. *Sensors*, MDPI, v. 22, n. 6, p. 2087, 2022.
- MALLIK, P.; JENA, O. P. Analysis of security vulnerabilities of internet of things and it's solutions. In: SPRINGER. *Intelligent Systems: Proceedings of ICMIB 2020*. [S.l.], 2021. p. 393–402.
- MANAVALAN, E.; JAYAKRISHNA, K. A review of internet of things (iot) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & industrial engineering*, Elsevier, v. 127, p. 925–953, 2019.
- MARCKMANN, K. et al. Caracterização de carvão ativado proveniente da cinza da casca do arroz para uso em tratamento de água e efluentes. *II Encontro Nacional de Tecnologia Urbana, Passo Fundo*, v. 11, 2015.
- MARKOPOULOU, D.; PAPAKONSTANTINO, V. The regulatory framework for the protection of critical infrastructures against cyberthreats: Identifying shortcomings and addressing future challenges: The case of the health sector in particular. *Computer law & security review*, Elsevier, v. 41, p. 105502, 2021.
- MARTÍNEZ, R. et al. On the use of an iot integrated system for water quality monitoring and management in wastewater treatment plants. *Water*, MDPI, v. 12, n. 4, p. 1096, 2020.
- MERLO, P. d. S. Q. *Aplicações de conceitos da indústria 4.0 no processo de abastecimento de água potável no brasil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 2022.
- MIORANDI, D. et al. Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad hoc networks*, Elsevier, v. 10, n. 7, p. 1497–1516, 2012.
- MOORTHY, R. et al. Wsn in defence field: A security overview. In: IEEE. *2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC)*. [S.l.], 2020. p. 258–264.
- NG, I. C.; WAKENSHAW, S. Y. The internet-of-things: Review and research directions. *International Journal of Research in Marketing*, Elsevier, v. 34, n. 1, p. 3–21, 2017.
- NGWENYA, M.; NGOEPE, M. A framework for data security, privacy, and trust in “consumer internet of things” assemblages in south africa. *Security and Privacy*, Wiley Online Library, v. 3, n. 5, p. e122, 2020.
- NISHAN, R. K. et al. Development of an iot-based multi-level system for real-time water quality monitoring in industrial wastewater. *Discover Water*, Springer, v. 4, n. 1, p. 43, 2024.
- NORD, J. H.; KOOHANG, A.; PALISZKIEWICZ, J. The internet of things: Review and theoretical framework. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 133, p. 97–108, 2019.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). *Water Security for Better Lives*. [S.l.]: OECD Publishing, 2013. 171 p. ISBN 978-92-64-202405.

PAGANINI, W. da S.; BOCCHIGLIERI, M. M. O novo marco legal do saneamento: universalização e saúde pública. *Revista USP*, n. 128, p. 45–60, 2021.

PARAMESHACHARI, B. et al. Health-care monitoring of patient using cnn based model in internet of things. In: IEEE. *2023 International Conference on Applied Intelligence and Sustainable Computing (ICAISC)*. [S.l.], 2023. p. 1–6.

PATEL, N. R.; KUMAR, S. Wireless sensor networks' challenges and future prospects. In: IEEE. *2018 International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)*. [S.l.], 2018. p. 60–65.

PONNUSAMY, M.; ALAGARSAMY, A. Traffic monitoring in smart cities using internet of things assisted robotics. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 81, p. 290–294, 2023.

PRAKASH, R.; KANSAL, P.; KAKAR, V. K. Optimized hybrid clustered protocol for iot heterogeneous wireless sensor networks. In: IEEE. *2019 IEEE Conference on Information and Communication Technology*. [S.l.], 2019. p. 1–6.

PRIYANGA, M.; VIMALRAJ, S. L. S.; LYDIA, J. Energy aware multiuser & multi-hop hierarchical-based routing protocol for energy management in wsn-assisted iot. In: IEEE. *2018 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. [S.l.], 2018. p. 701–705.

PULHEZ, M. M.; MARQUES, E. *A evolução das políticas de saneamento básico*. 2020. Publicado em: 28 dez. 2020. Atualizado em: 13 mai. 2024. Acesso em: 20 nov. 2024. Disponível em: <<https://pp.nexojornal.com.br/linha-do-tempo/2020/12/28/a-evolucao-das-politicas-de-saneamento-basico>>.

RAO, P. M.; DEEBAK, B. D. A comprehensive survey on authentication and secure key management in internet of things: Challenges, countermeasures, and future directions. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 146, p. 103159, 2023.

REZENDE, S. C.; HELLER, L. O saneamento no brasil: políticas e interfaces. In: *O saneamento no Brasil: políticas e interfaces*. [S.l.]: Editora UFMG, 2002. p. 310–310.

Bruno Cesar de Medeiros Rodrigues, Eric Augusto de Medeiros Rodrigues e Alex Okajima Watanabe. *Sistema para Geração de radicais Hidroxila na Combinação de Luz Ultravioleta e Peróxido de Hidrogênio de Forma Automática, com Monitoramento Remoto de Parâmetros de Qualidade de Água*. 2020. BR 10 2020 006154 2 A2. Disponível em: <<https://busca.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController?Action=detail&CodPedido=1569048&SearchParameter=HIDROXILA%20%20%20%20%20%20&Resumo=&Titulo=>>>.

SAIDALA, R. K. et al. Interoperability and standardization in the internet of things. In: IEEE. *2024 Ninth International Conference on Science Technology Engineering and Mathematics (ICONSTEM)*. [S.l.], 2024. p. 1–6.

SANTOS, N. M. C. L. d. *A Lei 14.026/2020: análise do novo marco legal do saneamento básico, seus impactos e percepções*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023.

- SARKAR, S. et al. Iot based wireless sensor network (wsn) for condition monitoring of low power rooftop pv panels. In: IEEE. *2019 IEEE 4th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*. [S.l.], 2019. p. 1–5.
- SATHYA, K. et al. A comprehensive review on comparison among effluent treatment methods and modern methods of treatment of industrial wastewater effluent from different sources. *Applied Water Science*, Springer, v. 12, n. 4, p. 70, 2022.
- SHIRVANI, M. H.; MASDARI, M. A survey study on trust-based security in internet of things: Challenges and issues. *Internet of Things*, Elsevier, v. 21, p. 100640, 2023.
- SICARI, S. et al. Security, privacy and trust in internet of things: The road ahead. *Computer networks*, Elsevier, v. 76, p. 146–164, 2015.
- SILVA, E. R. da. *O curso da água na história: simbologia, moralidade e a gestão de recursos hídricos*. Tese (Doutorado) — Tese de doutoramento, Escola Nacional de Saúde Pública, 1998.
- SINGH, S.; SAINI, H. S. Learning-based security technique for selective forwarding attack in clustered wsn. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 118, n. 1, p. 789–814, 2021.
- TARIQ, N.; ASIM, M.; KHAN, F. A. Securing scada-based critical infrastructures: Challenges and open issues. *Procedia computer science*, Elsevier, v. 155, p. 612–617, 2019.
- Texas Instrument. *Datasheet LM1117 — 800mA, Low-Dropout Linear Regulator*. 2023. 1–43 p. Disponível em: <www.ti.com>.
- TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de água*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- United Nations Education, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). *Managing Water Under Uncertainty and Risk*. [S.l.]: Unesco World Water Assessment Programme, 2012. v. 1.
- United State Society on Dams (USSD). *Guidelines for construction cost estimating for dam engineers and ownersr*. Denver, CO, 2012. 73 p.
- VERONES, F. et al. Biodiversity impacts from water consumption on a global scale for use in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Springer, v. 22, p. 1247–1256, 2017.
- WARKENTIN, M.; ORGERON, C. Using the security triad to assess blockchain technology in public sector applications. *International Journal of Information Management*, Elsevier, v. 52, p. 102090, 2020.
- WAZIRALI, R. et al. Secure watermarking schemes and their approaches in the iot technology: an overview. *Electronics*, MDPI, v. 10, n. 14, p. 1744, 2021.
- WIRYASAPUTRA, R. et al. An iot real-time potable water quality monitoring and prediction model based on cloud computing architecture. *Sensors*, MDPI, v. 24, n. 4, p. 1180, 2024.

- WONG, Y. J. et al. Toward industrial revolution 4.0: Development, validation, and application of 3d-printed iot-based water quality monitoring system. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 324, p. 129230, 2021.
- XLSEMI. *Datasheet XL1509 – 2A 150KHz 40V Buck DC to DC Converter*. 2019. 1–28 p. Disponível em: <www.xlsemi.com>.
- YADAV, G.; PAUL, K. Architecture and security of scada systems: A review. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Elsevier, v. 34, p. 100433, 2021.
- YI, L. et al. A novel block encryption algorithm based on chaotic s-box for wireless sensor network. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 53079–53090, 2019.
- ZAINURIN, S. N. et al. Advancements in monitoring water quality based on various sensing methods: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, MDPI, v. 19, n. 21, p. 14080, 2022.
- ZHANG, G. et al. A new digital watermarking method for data integrity protection in the perception layer of iot. *Security and Communication Networks*, Wiley Online Library, v. 2017, n. 1, p. 3126010, 2017.
- ZHANG, X.; HEYS, H. M.; LI, C. Energy efficiency of encryption schemes applied to wireless sensor networks. *Security and Communication Networks*, Wiley Online Library, v. 5, n. 7, p. 789–808, 2012.