



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA - EST

RUBEM SILAS DIAS SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TELEMETRIA PARA
MONITORAMENTO DE QUALIDADE DE ÁGUA EM RIOS AMAZÔNICOS**

Manaus

2023

RUBEM SILAS DIAS SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TELEMETRIA PARA
MONITORAMENTO DE QUALIDADE DE ÁGUA EM RIOS AMAZÔNICOS**

Projeto de pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentado à banca avaliadora do curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador Prof. Me. Rubens de Andrade Fernandes

Manaus

2023

Universidade do Estado do Amazonas – UEA
Escola Superior de Tecnologia - EST

Reitor:

André Luiz Nunes Zogahib

Vice-Reitor:

Kátia do Nascimento Couceiro

Diretora da Escola Superior de Tecnologia:

Ingrid Sammyne Gadelha Figueiredo

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica:

Israel Gondres Torné

Banca Avaliadora composta por:

Data da defesa: <01/09/2023>.

Prof. Ms. Rubens de Andrade Fernandes(Orientador)

Prof. Dr. Israel Gondres Torné

Prof. Dr. Jozias Parente de Oliveira

CIP – Catalogação na Publicação

Silva, Rubem Silas Dias

Desenvolvimento de um sistema de telemetria para monitoramento de qualidade de água em rios amazônicos / Rubem Silas Dias Silva; [orientado por] Rubens de Andrade Fernandes. – Manaus: 2023.

72 p.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Estado do Amazonas, 2023.

1. LoRaWAN. 2. Qualidade de água. 3. Sistemas Embarcados. I. Fernandes, Rubens de Andrade.

RUBEM SILAS DIAS SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TELEMETRIA PARA
MONITORAMENTO DE QUALIDADE DE ÁGUA EM RIOS AMAZÔNICOS**

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Nota obtida: 10,0 (Dez)

Aprovada em 01 / 09 / 23.

Área de concentração: Sistemas Embarcados

BANCA EXAMINADORA

Rubens de G. Fernandes
Orientador: Rubens de Andrade Fernandes, Ms.

Israel Sordres Torné
Avaliador: Israel Sordres Torné, Dr.

Jozias Parente de Oliveira
Avaliador: Jozias Parente de Oliveira, Dr.

AGRADECIMENTOS

Com este pequeno texto fora do padrão,
Gostaria de demonstrar minha gratidão.
Aos meus pais por cada lição e incentivo,
que compuseram o alicerce sob o qual eu vivo.

Aos avôs e avós, primos e primas declaro meu reconhecimento,
seus gestos sutis deram-me forças nesta jornada de amadurecimento.

À pilha de livros que me acompanhava, entretia e ensinava,
Agradeço pelas ideias e conceitos pelos quais dia a dia me apaixonava.
Aos pequenos conceitos físicos os quais nem chamam de importante,
mas que fizeram meu aprendizado bem mais excitante.

Aos meus queridos amigos, expresso o quanto sou afortunado,
por ter um bando tão divertido ao meu lado.
Um bando que me acompanharia por dias cantando,
ou no silêncio de uma biblioteca manifestando “shh, o pv tá estudando”.

Sou grato aos que com tintas de criatividade, gentileza e esperança,
pintam a vida de pequeninos com cores vibrantes.
e como o velho Manoel, inspiram estudantes a deixarem de parede,
e almejem ser árvores.

*“O poder da educação, em geral, é pouco eficaz.
Exceto nas felizes ocasiões em que ele é quase supérfluo.”
(Richard Feynman)*

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de telemetria de indicadores de qualidade de água. O propósito é viabilizar o monitoramento, remoto, periódico e auto-sustentável de parâmetros químicos e biológicos de rios amazônicos por meio de sensores precisos em longas distâncias. A implementação da pesquisa proposta se deu inicialmente com a modelagem de um dispositivo *hardware* microcontrolado, voltado à um regime de baixo consumo de energia, com recursos de *energy harvesting*, *backup* de bateria, conectividade LoRa e suporte a leitura de sensores laboratoriais de medição de qualidade de água. Em complemento ao sistema de *hardware* idealizado, o *firmware* desenvolvido foi pensado para coordenar acionamento de sensores, dispositivos periféricos e rádio LoRa de forma energeticamente eficiente, além de estabelecer uma comunicação via protocolo LoRaWAN com uma aplicação *web* para exibição de informação acerca da qualidade de água. Com a implementação do dispositivo de telemetria proposto, espera-se poder avaliar a autonomia do sistema em localidades remotas e comparar as medições realizadas pelo dispositivo com medições registradas pelo grupo de pesquisadores do laboratório LabRios, localizado no Centro de Estudos Superiores de Parintins, e dessa forma por em prova a viabilidade da solução desenvolvida como uma ferramenta válida para o monitoramento de parâmetros fluviais.

Palavras-chave: *Energy Harvesting*. LoRa. LoRaWAN. Monitoramento de água. Qualidade de água. Sistemas embarcados.

ABSTRACT

The present work presents the development of a telemetry system for water quality indicators. The purpose is to enable remote, periodic, and self-sustaining monitoring of chemical and biological parameters in Amazonian rivers through precise sensors over long distances. The implementation of the proposed research began with the modeling of a microcontrolled hardware device designed for low energy consumption, featuring energy harvesting, battery backup, LoRa connectivity, and support for reading laboratory water quality measurement sensors. In addition to the envisioned hardware system, the developed firmware was designed to efficiently coordinate sensor activation, peripheral devices, and LoRa radio communication, as well as establish communication via the LoRaWAN protocol with a web application for displaying water quality information. With the implementation of the proposed telemetry device, it is expected to assess the system's autonomy in remote locations and compare the measurements taken by the device with those recorded by the research group at the LabRios laboratory, located at the Center for Higher Studies in Parintins. This will ultimately test the viability of the developed solution as a valid tool for monitoring river parameters.

Keywords: Embedded systems. Energy Harvesting. LoRa. LoRaWAN. Water monitoring. Water quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Esquema básico de um sistema de telemetria.	19
2	Representação do conceito de um sistema IoT.	21
3	Wordcloud de tecnologias presentes em sistemas IoT.	22
4	Camadas do Modelo OSI.	24
5	Associação de camadas entre a pilha do modelo OSI e a pilha do protocolo TCP/IP.	25
6	Estrutura de comunicação entre camadas físicas.	25
7	Escala elementar de geográfica de rede.	26
8	Relação alcance entre conexão e autonomia de bateria de tecnologias de redes de comunicação.	27
9	Arquitetura de rede Lora/LoRaWAN.	28
10	Representação dos sinais de <i>up-chirp</i> e <i>down-chirp</i> no domínio do tempo.	29
11	Representação dos sinais de <i>up-chirp</i> e <i>down-chirp</i> no domínio da frequência.	29
12	Representação do tempo de duração dos sinais de <i>Spreading Factor</i> de 7 à 12.	31
13	Estrutura do pacote de mensagens LoRa.	33
14	Pilha do protocolo LoRaWAN.	34
15	Arquitetura de rede LoRaWAN.	35
16	Classes de comunicação LoRaWAN.	35
17	Ativação por OTAA.	37
18	Ativação por ABP.	38
19	Arquitetura proposta para o sistema de coleta de parâmetros de qualidade de água e compartilhamento de dado por meio da <i>stack</i> LoRaWAN.	39
20	Arquitetura proposta de <i>hardware</i>	41
21	Sondas de medição de parâmetros de qualidade de água BOQU.	42
22	Sensor de temperatura e umidade relativa EE060.	43
23	Cenários de funcionamento do <i>firmware</i> idealizado.	44
24	Fluxo de execução das tarefas pelo <i>sequencer</i>	45
25	linha de vida da operação do sistema de monitoramento de qualidade de água.	45
26	Ciclo de envio de mensagens com o sistema de medição conectado ao servidor de rede.	47
27	Ciclo de envio de mensagens com o sistema de medição desconectado do servidor de rede.	48
28	Placa de circuito impresso do sistema de telemetria.	50
29	Aplicação típica do CI LTC4121 para carregamento de baterias de Li-Ion.	51
30	Controlador de carga usado no projeto.	52
31	Curva de descarga da bateria.	53
32	Placa de circuito impresso construída.	54
33	Disposição das sondas de medição de parâmetros de qualidade de água.	54

34	Variação sazonal dos parâmetros de qualidade de água de agosto à Novembro de 2022.	56
35	Média diária de medições de parâmetros de qualidade de água.	57
36	Gráfico de <i>boxplot</i> de pH.	58
37	Gráfico de <i>boxplot</i> de temperatura da água.	59
38	Gráfico de <i>boxplot</i> de temperatura do ar.	59
39	Gráfico de <i>boxplot</i> da condutividade elétrica da água.	60
40	Gráfico de <i>boxplot</i> da turbidez.	61
41	Gráfico de <i>boxplot</i> da umidade relativa.	62
42	Mapa de calor da correlação de <i>Pearson</i> para os parâmetros medidos.	63
43	Histograma de SNR.	65
44	Histograma de RSSI.	66
45	Trajeto percorrido pelo pacote de mensagens do dispositivo de coleta até a aplicação <i>web</i>	67
46	Plataforma de visualização dos parâmetros de qualidade de água coletados.	68

LISTA DE TABELAS

1	Capacidade dos níveis de <i>Spreading Factor</i>	30
2	Índices de <i>Coding Rate</i>	32
3	Resolução das sondas de qualidade de água. Fonte: (INSTRUMENT, 2022).	43
4	Dados estatísticos dos parâmetros de qualidade de água da série histórica.	56
5	Índices de correlação de <i>Pearson</i>	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ADR	<i>Adaptive Data Rate</i>
API	<i>Application Programing Interface</i>
CE	Condutividade Elétrica
CI	Circuito Integrado
CR	<i>Coding Rate</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSS	<i>chirp spread modulation</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
EST	Escola Superior de Tecnologia
ISO	<i>International Standards Organization</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial Sientific and Medical</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
ORP	<i>Oxidation-Reduction Potencial</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
Rb	<i>Bit Rate</i>

RNQA	Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade da Água
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SF	<i>Spreading factor</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
UR	<i>Umidade Relativa</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WLAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>
WQMP	<i>Water Quality Monitoring Program</i>
WQMS	<i>Water Quality Monitoring System</i>
WTD	<i>watchdog timer</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Qualidade de água	16
2.1.1	Parâmetros de qualidade de Água	16
2.1.1.1	Temperatura	16
2.1.1.2	pH	17
2.1.1.3	Condutividade elétrica	17
2.1.1.4	Oxigênio dissolvido	17
2.1.2	Programas de monitoramento de qualidade de água	17
2.2	Sistemas de Telemetria	18
2.3	Energy Harvesting	19
2.4	Internet das Coisas	20
2.5	Tecnologias de redes de comunicação	23
2.5.1	Redes de comunicação	23
2.5.1.1	Arquitetura de rede	23
2.5.1.2	Tecnologias de transmissão	25
2.5.1.3	Escala de cobertura de comunicação	25
2.5.2	Tecnologias de Rede LPWAN	26
2.6	LoRa e LoRaWAN	27
2.6.1	LoRa	27
2.6.1.1	Camada Física da tecnologia LoRa	28
2.6.1.1.1	<i>Bandwidth</i>	30
2.6.1.1.2	<i>Spreading Factor</i>	30
2.6.1.1.3	<i>Coding Rate</i>	31
2.6.1.2	<i>Pacote de mensagem LoRa</i>	32
2.6.2	LoRaWAN	33
2.6.2.1	Arquitetura LoRaWAN	34
2.6.2.2	Comunicação LoRaWAN	35
2.6.2.3	Métodos de ativação	36
2.6.2.3.1	OTAA	37
2.6.2.3.2	ABP	37
3	METODOLOGIA	39
3.0.1	Arquitetura de <i>Hardware</i>	40
3.0.1.1	Sondas e sensores	42
3.0.2	Arquitetura de <i>Firmware</i>	43
3.0.2.1	Fluxo de execução de tarefas	44

3.0.2.2	Características de operação	45
3.0.2.3	Sistema de armazenamento	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	Plataforma de <i>hardware</i>	49
4.1.1	Módulo de <i>Energy Harvesting</i>	50
4.1.2	Construção do dispositivo de telemetria	53
4.2	Adversidades enfrentadas no processo de construção	55
4.3	Análise de série histórica	55
4.3.1	Análise dos parâmetros de qualidade de água coletados	56
4.3.1.1	pH	57
4.3.1.2	Temperatura da água e do ar	58
4.3.1.3	Condutividade elétrica	59
4.3.1.4	Turbidez	60
4.3.1.5	Umidade relativa	61
4.3.1.6	Análise de coeficiente de correlação <i>Pearson</i>	62
4.3.2	Análise da qualidade da comunicação em LoRaWAN	65
4.3.3	Visualização de dados	67
5	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

É fundamental a adoção de medidas que visem promover a sustentabilidade social e ambiental, a fim de evitar ou mitigar processos danosos à vida no planeta e a integridade dos recursos naturais. Ao realizar tais ações é possível assegurar, de forma sustentável, o uso desses recursos pelas gerações futuras. Dentre esses recursos, a água se apresenta como essencial no desenvolvimento econômico, qualidade de vida da população e para sustentabilidade dos nutrientes no planeta (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2020). Dada essa importância, a gestão de recursos hídricos requer uma abordagem sistêmica para coleta, organização e análise de informações para chegar à decisão e seleção das melhores alternativas de aproveitamento da água de forma eficiente (RODRÍGUEZ, 2009). No contexto dos recursos hídricos a análise de qualidade da água representa importante e fundamental ferramenta para o gerenciamento dos recursos hídricos. O uso de indicadores de qualidade ambiental é uma estratégia que transforma um número elevado de informações técnicas em um conceito de qualidade de fácil compreensão, essencial para comunicação entre o meio acadêmico, a população e entidades tomadoras de decisão.

No entanto, monitorar cursos d'água é uma atividade que impõe múltiplos desafios. O monitoramento se dá normalmente com o deslocamento de equipes que realizam algumas medidas *in loco* e coletam amostras para realização de outras análises laboratoriais. Desde a definição de pontos de coleta até a operacionalização do monitoramento, a logística é sempre um gargalo para a quantidade e qualidade das análises. Dentro do contexto amazônico, este método de trabalho torna a aquisição de dados incipiente e escassa.

Dado esse cenário, é vista a possibilidade de utilizar a tecnologia para contornar os desafios apresentados com um sistema telemétrico de monitoramento de parâmetros de qualidade de água. O desenvolvimento de uma plataforma de coleta de dados automatizados pode minimizar vários problemas, diminuindo o uso de tempo com coletas, permitindo maior reprodutibilidade nas coletas e análises, além de possibilitar um menor intervalo entre aferições. Com o desenvolvimento desse sistema de monitoramento de qualidade de água proposto, seria possível alcançar maior confiabilidade e eficiência nas análises de parâmetros físicos e químicos da qualidade da água no rio Amazonas.

Este trabalho de pesquisa, tem como objetivo o desenvolvimento de sistema embarcado de telemetria para o monitoramento de parâmetros químicos e físicos de qualidade de água, na Escola Superior de Tecnologia (EST), como uma iniciativa na busca de soluções para desafios do desenvolvimento sustentável na região amazônica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão apresentados os principais conceitos e teorias relevantes ao tema abordado no trabalho. Nesse sentido, serão abordados os conceitos introdutórios acerca de telemetria e do compartilhamento de informação em meio IoT, nesse cenário. Também serão evidenciadas as principais características de redes de longo alcance a partir da arquitetura de uma rede LoRa com a utilização do protocolo LoRaWAN, que se mostra fundamental para a implementação do projeto proposto. E por fim, serão mostrados os fundamentos de sistemas de energy harvesting para aplicações de baixo consumo.

2.1 QUALIDADE DE ÁGUA

A água é um dos recursos mais valiosos e abundantes no nosso planeta, sendo fundamental para diversas formas de vida, e essencial para o mantimento de grande parte do ecossistema do planeta. Dentro da sociedade a água possui diversos fins, como em sistemas de produção agrícolas, processos industriais, atividades de lazer e consumo humano. No entanto, a água é um recurso limitado e vulnerável a uma série de fatores, incluindo poluição, mudanças climáticas e a própria degradação do ecossistema. Nesse contexto é importante garantir o uso seguro e a qualidade da água para os fins mencionados.

A qualidade de água é um conceito muito amplo, mas dentro do cenário proposto nesse trabalho, pode ser representada com o conjunto de características químicas, físicas e biológicas presentes na água, reflexo das condições naturais e utilização humana (DERISIO, 2016). Os diferentes parâmetros de qualidade de água se diferenciam em uma série de processos que se sucedem dentro do corpo hídrico, sendo influenciadas e tendo influência sobre o metabolismo de organismos aquáticos, além de responder às características locais da bacia hidrográfica (SANTOS et al., 2019). A análise desses indicadores permite correlacionar diferentes variáveis que contribuem para a saúde da água de uma bacia hidrográfica, de maneira a expressar de forma objetiva as mudanças na qualidade de água.

2.1.1 Parâmetros de qualidade de Água

2.1.1.1 Temperatura

Temperatura é a medida de intensidade de calor e um indicador da condição climática dos corpos hídricos. A temperatura da água é um importante indicador da taxa de reações físicas, químicas e biológicas em meio líquido (SCHNEIDER, 2017). A alteração antinatural de temperatura implica em efeitos diretos e indiretos na fauna e flora aquática, visto que o aumento de temperatura provoca o aumento do consumo de oxigênio dissolvido por conta da agitação dos seres aquáticos e como consequência diminui o poder de retenção de gases através desse líquido (DERISIO, 2016).

2.1.1.2 pH

O potencial hidrogênio, ou pH, é uma medida de avaliação do meio em acidez e alcalinidade, expressa pela relação numérica entre íons (H^+) e íons (OH^-). O pH consiste em uma escala adimensional que varia de 0 à 14, em que valores entre 0 e 7 indicam maior predominância de íons (H^+) e então o meio é considerado alcalino, enquanto que valores entre 7 e 14 indicam predominância de (H^-), e assim caracterizando um meio ácido (DERISIO, 2016). A manutenção natural do pH em rios é feito por meio da dissolução de rochas e fotossíntese de seres subaquáticos, absorção de gases e oxidação de matéria orgânica (TREVISAN et al., 2012).

2.1.1.3 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é a medida da capacidade da água de conduzir eletricidade e está relacionada à concentração de íons na água. Seu valor para análise de qualidade elétrica se dá na estimação da quantidade de substâncias químicas dissolvidas na água, como produtos químicos, metais pesados e nutrientes (SANTOS et al., 2019).

2.1.1.4 Oxigênio dissolvido

O oxigênio dissolvido se refere a quantidade de O_2 presente na água. O oxigênio dissolvido é fundamental para a existência de organismos aeróbicos. Esse é um importante parâmetro para a análise de contaminação de corpos d'água, A presença de oxigênio dissolvido decorre da dissolução de oxigênio atmosférico na água, que serve de margem para a predominância de organismos aeróbicos e anaeróbicos (TREVISAN et al., 2012).

2.1.2 Programas de monitoramento de qualidade de água

Conforme exposto neste capítulo, a água é um importante recurso natural para a sociedade. O monitoramento da qualidade da água é fundamental para a gestão de recursos hídricos e para o oferecimento de água em boas condições de consumo. Com o princípio de preservar este recurso natural, órgãos governamentais e empresas apresentam programas nacionais para o acompanhamento da qualidade de água em seus corpos hídricos, as chamadas WQMP's (*Water Quality Monitoring Programs*).

O monitoramento de qualidade de água em qualquer região, ainda é um processo complexo de se implementar, dado o número de fatores a se considerar para a construção de uma WQMP, especialmente quando é necessário uma infraestrutura a nível nacional e com recurso público. A construção de um WQMP são necessários os seguintes elementos (BEHMEL et al., 2016):

- Identificação dos objetivos de monitoramento (como os dados coletados serão utilizado);

- A determinação de uma rede de sítios de amostragem em lagos e rios;
- Seleção dos parâmetros de qualidade de água a serem medidos;
- Escolha da frequência de amostragem de dados;
- Estimativa de recursos técnicos e financeiros;
- Preparação da logística para a execução do monitoramento;
- Controle e compartilhamento dos dados coletados.

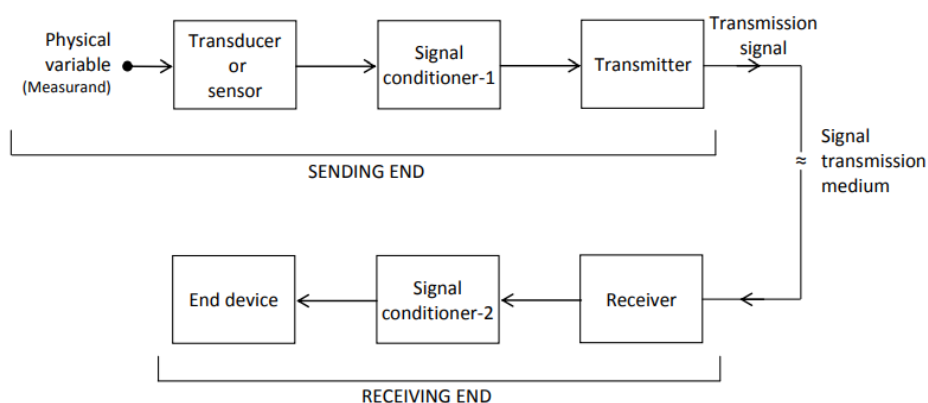
Os elementos apresentados podem ser vistos em duas perspectivas, através do aspecto logístico para a implementação de uma plataforma de monitoramento, mas também pelo aspecto técnico, que inclui os sistemas de monitoramento de qualidade de água, as WQMS (*Water Quality Monitoring Systems*), e constituem toda metodologia para a coleta dos dados de qualidade de água, seja ele automatizado ou manual. No Brasil, o processo de monitoramento e divulgação de parâmetros de qualidade de água é feito através da ANA (Agência Nacional de Águas) (ANA, 2023) com o RNQA (Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade da Água). Atualmente o processo de coleta e compartilhamento dos dados pelo RNQA é feito através de operadores de monitoramento espalhados em diversas regiões do Brasil que contribuem na plataforma com os dados locais. Dentro desse contexto, o sistema desenvolvido no presente trabalho se enquadra como um facilitador do processo de monitoramento da qualidade de recursos hídricos, oferecendo maior dinamicidade no processo de coleta e análise de água, especialmente levando em consideração que atualmente a coleta manual de amostras de água por equipes de pesquisa espalhadas pelo Brasil é o método predominante.

2.2 SISTEMAS DE TELEMETRIA

Os sistemas de telemetria no contexto de compartilhamento de dados, possuem o propósito de trafegar informação entre dispositivos em diferentes localidades, especialmente com a finalidade de controle ou monitoramento de algum processo (CARDEN; JEDLICKA; HENRY, 2002). O uso de sistemas de telemetria é comum em áreas como sistemas de monitoramento, controle de processos industriais, e procedimentos médicos em que há a necessidade de compartilhamento de informação precisa para análise e tomadas de decisão.

O núcleo de um sistema de telemetria é o procedimento de transmissão e recepção de informação no qual está fundamentado. Geralmente essa estrutura é dividida em dois subsistemas, o subsistema de transmissão e o subsistema de recepção (RANGE et al., 2006) que podem ser construído sobre redes com fio ou sem fio, como exposto na Figura 1.

Figura 1 – Esquema básico de um sistema de telemetria.



Fonte: (VERMA, 2017)

A estrutura fundamental dos subsistemas de telemetria se divide em três componentes, os elementos transmissores e receptores, que tratam o meio sob o qual a informação trafega, o componente condicionador de sinal, que processa e prepara o sinal para a transmissão de informação ou tradução de informação no caso de recepção, e o componente periférico do sistema de telemetria, que pode ser um sensor ou transdutor com informação útil, ou *End Point*, uma entidade do sistema que representa o ponto extremo de uma comunicação, com o papel de consumir ou acrescentar informação dentro de uma rede.

Dentro de uma aplicação, o sistema de telemetria é o principal componente no que diz respeito a comunicação de dados entre dispositivos. Por esse motivo, o desafio na sua implementação encontra-se na estruturação dos subsistemas apresentados, ou seja, na análise cuidadosa das tecnologias de rede e protocolos a serem inseridos na estrutura dos subsistemas de telemetria.

Em vista disso, o sistema telemétrico proposto neste trabalho é voltado para aplicações de monitoramento ambiental, composto por um *End-Node* com a finalidade de coletar e transmitir dados de qualidade de água. Nesse sentido, os subsistemas de recepção e transmissão serão compostos de tecnologias em rádio-frequência para longas distâncias, visando a aplicação deste sistema de telemetria em localidades remotas.

2.3 ENERGY HARVESTING

Sistemas de colheita de energia, também conhecido como *Energy Harvesting* são técnicas para capturar e armazenar energia do ambiente e convertê-la em energia elétrica útil para sistemas eletrônicos. Em comparação com sistemas de alimentação por energias renováveis, como em usinas hidrelétricas e fazendas solares, que geram energia elétrica na ordem de megawatts de potência, as técnicas empregadas em sistemas de *energy harvesting* se enquadram em uma escala muito menor de potência, tipicamente de micro a milliwatts (KAZMIERSKI; BEEBY, 2011). Esses sistemas são especialmente úteis em aplicações de baixa potência em que a vida útil da bateria é

um fator limitante no contexto da aplicação, como em sistemas eletrônicos sem fio autônomos.

Na construção de sistemas de *energy harvesting*, diversas fontes de energia podem ser aproveitadas, por meio do desenvolvimento de circuitos capazes de aproveitar as peculiaridades de cada forma de energia. Dentre as mais comuns fontes de energia implementadas em sistemas de *energy harvesting* é possível citar (HARB, 2011):

- Energia mecânica;
- Eletromagnéticas;
- Térmica;
- Diferença de pressão;
- Biológica;
- Solar;
- Fluxo de água.

As soluções em *energy harvesting* são desenvolvidas visando contribuir com o circuito de gerenciamento de energia ou mesmo fornecer uma forma de conceder autossuficiência para uma aplicação de baixo consumo. A colheita de energia é um artifício importante no prolongamento do tempo de vida de baterias e na atenuação do descarte de baterias no ambiente. Nesse contexto, a colheita de energia solar é a mais comum, por conta da sua ampla disponibilidade, facilidade de instalação e portabilidade, especialmente em aplicações instaladas em locais remotos ou inacessíveis (BEEBY et al., 2007). Técnicas de *energy harvesting* e suas aplicações tem se apresentado como uma boa alternativa de fornecimento de energia limpa em sistemas eletrônicos de baixa potência e se tornado mais atrativas em soluções de microeletrônica (HARB, 2011).

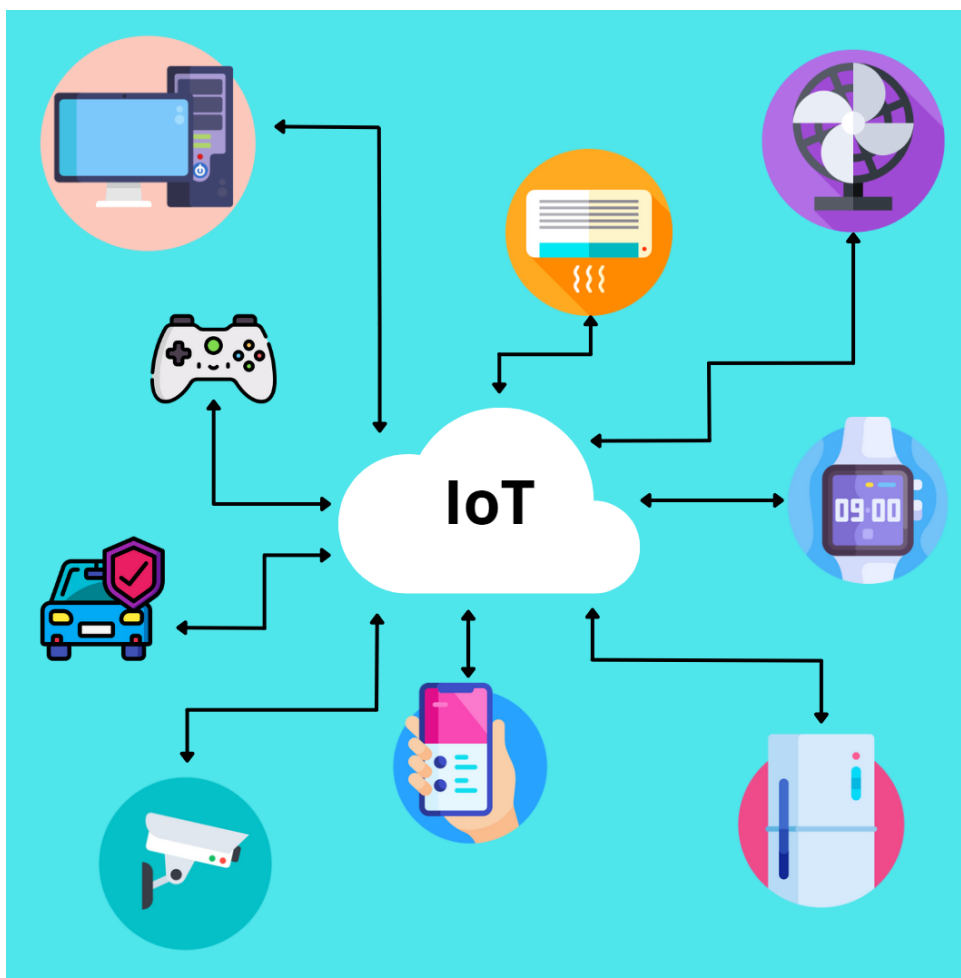
Tendo em vista o requisito de aplicação em localidades remotas do projeto proposto neste trabalho, e os pontos apresentados por (BEEBY et al., 2007), optou-se pela implementação de um sistema de *energy harvesting* por energia solar, visando agregar autonomia ao sistema quando em locais de difícil acesso, e a implementação de uma solução sustentável para alimentação do dispositivo de coleta.

2.4 INTERNET DAS COISAS

A internet das coisas (*Internet of Things*, IoT) é um movimento tecnológico fundamentado no princípio da interconexão de dispositivos para automatização de processos ou tarefas por meio de redes de comunicação de forma segura e prática. O objetivo do movimento é a unificação de sistemas dentro de uma mesma infraestrutura, para permitir não só que algum sistema possa ser operado dentro de uma rede, mas para obter informação de toda infraestrutura

(MADAKAM et al., 2015). Conforme ilustrado na Figura 2, dentro de um sistema IoT, é possível interligar desde sistemas industriais a dispositivos domésticos de uso cotidiano.

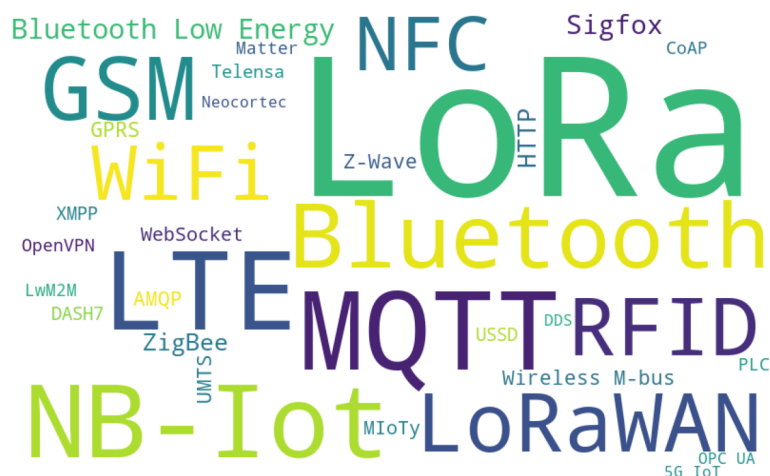
Figura 2 – Representação do conceito de um sistema IoT.



Fonte: Autoria própria

O termo “Internet” em “Internet das coisas” reflete a intenção do movimento se valer não só da qualidade, acessibilidade e abrangência das redes de internet disponíveis atualmente, mas também da capacidade de *hardware* com suporte a comunicação dentro de diversos protocolos e redes de comunicação. Porém, embora a internet seja um meio comum para comunicação entre dispositivos IoT, é comum ver sistemas IoT baseados totalmente em redes de comunicação sem a presença de internet, como é o caso redes Bluetooth ou redes LoRa sem o protocolo LoRaWAN, ou as demais redes compostas pelas tecnologias expostas na Figura 3.

Figura 3 – Wordcloud de tecnologias presentes em sistemas IoT.



Fonte: Autoria própria

A arquitetura de um sistema IoT, além dos recursos técnicos da estrutura de rede sob a qual o sistema se sustenta, também consiste em princípios como escalabilidade, extensibilidade e operabilidade entre os dispositivos do sistema, o que evidencia a dinamicidade que um sistema IoT deve possuir ao interagir com outros dispositivos (GOKHALE; BHAT; BHAT, 2018). Essas características se refletem nas mais diversas aplicações, como em sistemas de monitoramento e telemetria, onde é comum a necessidade de escalabilidade na adição de mais *End-Nodes* para uma maior cobertura de uma informação, ou mesmo em sistemas industriais, em que a operabilidade de um sistema é essencial. Uma das mais notáveis contribuições do movimento IoT para a tecnologia, é a possibilidade de tornar atividades, aplicações ou dispositivos inteligentes capazes de se comunicar entre si, e assim, promover aplicações inovadoras (FAROOQ et al., 2015), avanço em conhecimento e melhor qualidade de vida.

Dentro do espectro de tecnologias IoT, existem vários protocolos de comunicação que podem ser implementados em dispositivos IoT, cada um com características específicas para atender a diferentes requisitos de aplicação. Diante do escopo do sistema proposto neste trabalho, a escolha da tecnologia IoT foi feita sob pretexto de baixo consumo de energia e transmissão de dados em longas distâncias. Dentro dessas características optou-se pela a tecnologia LoRa e protocolo LoRaWAN, duas tecnologias comuns na formação de redes de comunicação para sistemas de monitoramento ambiental, agricultura inteligente, gerenciamento de logística e outras aplicações em que os dispositivos IoT estão localizados em áreas remotas (LIYA; ARJUN, 2020).

2.5 TECNOLOGIAS DE REDES DE COMUNICAÇÃO

2.5.1 Redes de comunicação

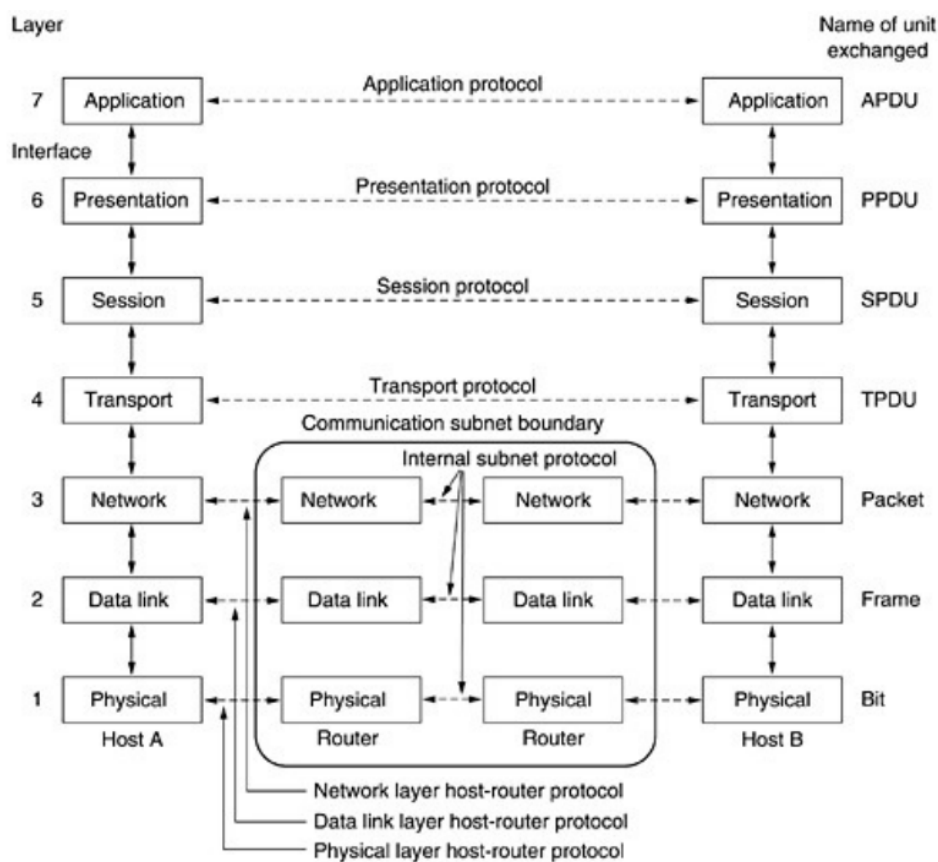
Redes de telecomunicações são infraestruturas formadas por um conjunto de computadores independentes e interconectados por uma única tecnologia, e que permite a transferência de informação entre si (TANENBAUM, 2003). As redes de comunicação são construídas baseadas em diferentes tecnologias e protocolos de comunicação, para possibilitar o tráfego de informações em diferentes formatos e velocidades. Portanto, cada estrutura de rede é construída visando atender algum requisito específico de conectividade, largura de banda e alcance geográfico.

Embora não haja uma divisão formal acerca dos componentes de uma rede de comunicação, é comum que uma rede seja caracterizada a partir da tecnologia de transmissão de dados e por sua cobertura geográfica de sinal (TANENBAUM, 2003). Cada tecnologia de transmissão ou nível de escala de abrangência de rede, tem a finalidade de segmentar diferentes tecnologias para atender os requisitos de uma aplicação.

2.5.1.1 Arquitetura de rede

Para que haja uma comunicação adequada e eficiente entre dispositivos, é fundamental a existência de uma arquitetura de rede que ofereça uma infraestrutura confiável e escalável para o suporte da comunicação. Nesse sentido, o modelo de arquitetura de rede que mais se destaca é o modelo OSI formulado pela ISO na década de 1990 (TANENBAUM, 2003). Conforme exposto na Figura 4, o modelo OSI propõe um sistema de sete camadas como referência para um sistema de rede, que permite modularizar as fases de uma comunicação. O modelo OSI não se trata de um protocolo a ser seguido na estruturação de uma rede de comunicação, mas um modelo para compreender e projetar uma arquitetura de rede flexível, robusta e interoperável (FOROUZAN, 2009).

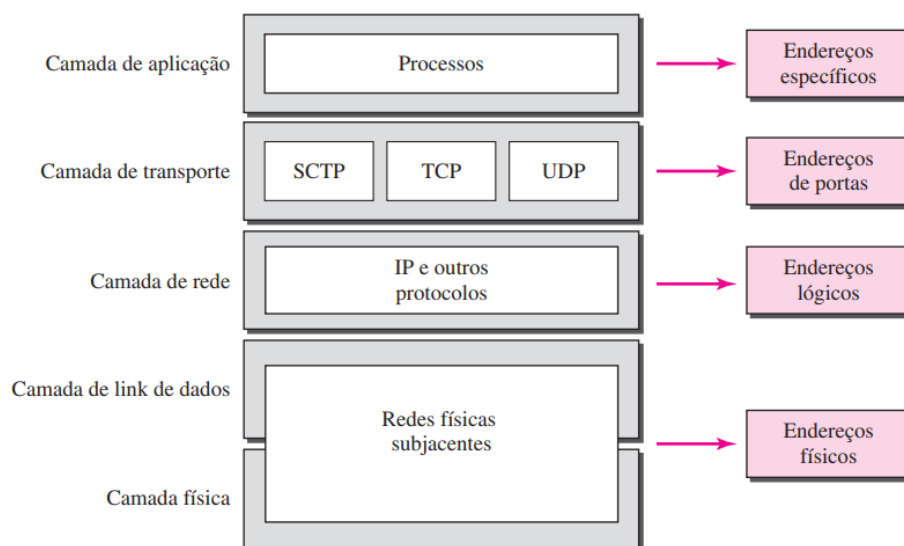
Figura 4 – Camadas do Modelo OSI.



Fonte: (TANENBAUM, 2003)

Embora o modelo OSI seja uma referência mundial de arquitetura de redes, é importante ressaltar que ele não caracteriza uma única forma de estruturar um sistema de rede, diversas tecnologias e protocolos de comunicação operam de maneira particular, e adotam um modelo de arquitetura próprio. Um exemplo a ser citado pode ser a pilha de rede do protocolo TCP/IP, com uma arquitetura baseada em apenas quatro camadas, mas conforme apresentado na Figura 5, ainda possui correspondentes com o modelo OSI.

Figura 5 – Associação de camadas entre a pilha do modelo OSI e a pilha do protocolo TCP/IP.

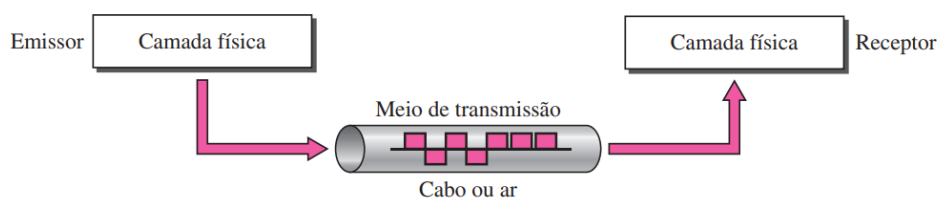


Fonte: (FOROUZAN, 2009)

2.5.1.2 Tecnologias de transmissão

A tecnologia de transmissão de informação diz respeito à forma e meio sob o qual um dado será transportado de um ponto a outro, como apresentado na Figura 6. Dentro desta configuração, o meio de transmissão geralmente pode ser um meio não guiado, também chamado de espaço livre, ou um meio guiado, que requer um condutor físico para interligar dois dispositivos. A informação normalmente é um sinal, resultado da conversão de dados (FOROUZAN, 2009).

Figura 6 – Estrutura de comunicação entre camadas físicas.



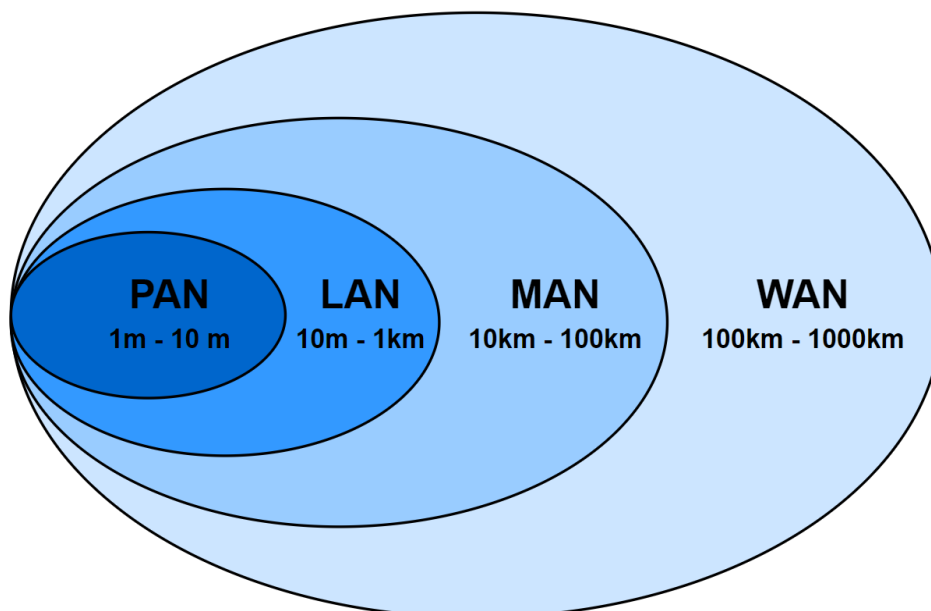
Fonte: (FOROUZAN, 2009)

2.5.1.3 Escala de cobertura de comunicação

Uma importante característica das redes de comunicação de dados é sua abrangência geográfica, pois possibilita a escolha dos tipos de tecnologias de transmissão e protocolos mais adequados para compor uma rede. Conforme indicado na Figura 7, o alcance das redes são classificadas fundamentalmente em PAN (*Personal Area Network*), LAN (*Local Area Network*), MAN (*Metropolitan Area Network*) e WAN (*Wide Area Network*). Com a evolução das tecnologias de comunicação, foram atribuídas variações às escalas de abrangência de rede, conforme o

escopo de um sistema de rede. Nesse contexto, é comum observar referência à essas classes de redes com um prefixo associado ao seu contexto, como WLAN (*Wireless Local Area Network*) que enfatiza a conectividade sem fio, ou em redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) associada à aplicações de baixo consumo de energia.

Figura 7 – Escala elementar de geográfica de rede.



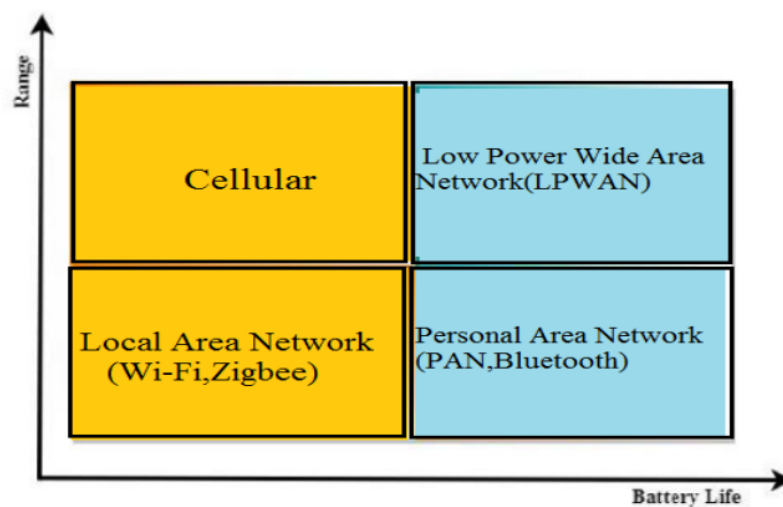
Fonte: Autoria própria

O desenvolvimento das tecnologias de redes de telecomunicações trouxe contribuições para a sociedade, com a oferta de serviços televisivos, de telefonia e internet. Assim, com constante desenvolvimento da tecnologia e a alta demanda por conectividade e comunicação rápida, é vista a importância de redes de comunicação confiáveis e eficientes.

2.5.2 Tecnologias de Rede LPWAN

As redes de comunicação LPWAN são uma subclassificação da classe de redes de comunicação WAN, voltadas especialmente para redes de comunicação sem fio com foco em baixo consumo de energia e direcionada para a aplicações de longa distância. Essa classificação de redes de comunicação nasceu em virtude da demanda de aplicações IoT por sistemas de baixo consumo de energia, característica comumente encontrada em redes PAN, porém com longo alcance na comunicação entre os dispositivos da rede, semelhante às tecnologias móveis (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). Nesse contexto, foi idealizado o conceito das LPWAN's, que conforme ilustrado na Figura 8, se encontra em um ponto intermediário entre as necessidades de alcance e aproveitamento de energia.

Figura 8 – Relação alcance entre conexão e autonomia de bateria de tecnologias de redes de comunicação.



Fonte: (LIYA; ARJUN, 2020)

Mesmo sendo um campo recente em tecnologias de rede, as LPWAN's tem se mostrado como elemento principal de comunicação em diversos sistemas IoT, onde é comum ter um número massivo de *End Points*, trafegando pequenos pacotes de mensagens, como em aplicações de monitoramento de áreas rurais, sistemas de *Smart Cities* e aplicações de geolocalização (LIYA; ARJUN, 2020).

2.6 LORA E LORAWAN

2.6.1 LoRa

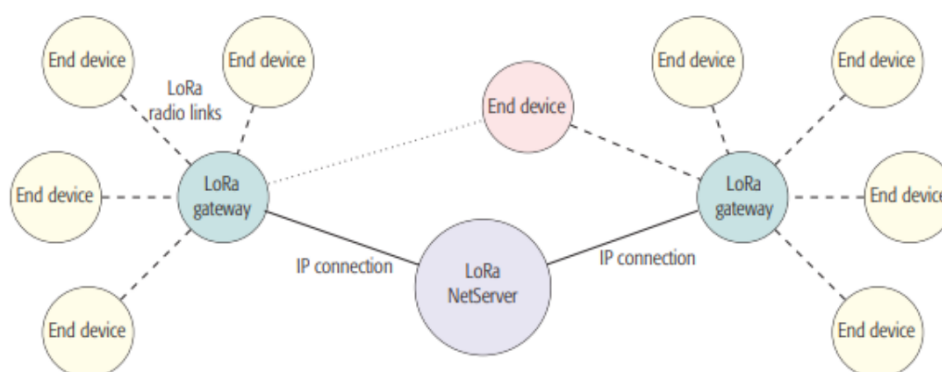
LoRa é uma tecnologia de comunicação que atua na camada física de uma rede de comunicação que opera nas frequências Sub GHz ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) conforme regulamentado para um determinado país ou região.

As faixas de frequência de Sub GHz referem-se a uma parte do espectro de radiofrequência abaixo de 1 GHz. Essa faixa de frequência é conhecida por sua capacidade de fornecer um alcance maior do que as frequências mais altas, além de uma melhor penetração de sinal em obstáculos. Por essa razão, é amplamente utilizada em aplicações de IoT, como sensores de monitoramento ambiental, redes de energia inteligente, agricultura inteligente e outras aplicações de longo alcance. Para que haja regulamentação sobre o uso do espectro de frequência, os sinais em Sub GHz são divididos nas chamadas faixas de radiofrequência ISM, reservadas internacionalmente pela ITU (*International Telecommunication Union*) para aplicações industriais, científicas e médicas (CASTELLS-RUFAS; GALIN-PONS; CARRABINA, 2018).

A tecnologia LoRa possui um método de comunicação baseado em modulação de sinal por frequência, com o objetivo de possibilitar a transmissão de informação em longas distâncias,

resistente a ruídos e eficiente no consumo de energia (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). LoRa é uma abreviação para *Long Range*, uma tecnologia idealizada pela Semtech Corporation com a finalidade de compor a pilha do protocolo LoRaWAN dentro de uma estrutura de rede conforme exposto na Figura 9 (SEMTECH, 2023). A tecnologia LoRa, é voltada principalmente para aplicações IoT, monitoramento ambiental, *Smart Cities*, e particular, em áreas com pouca infraestrutura de rede disponível.

Figura 9 – Arquitetura de rede Lora/LoRaWAN.



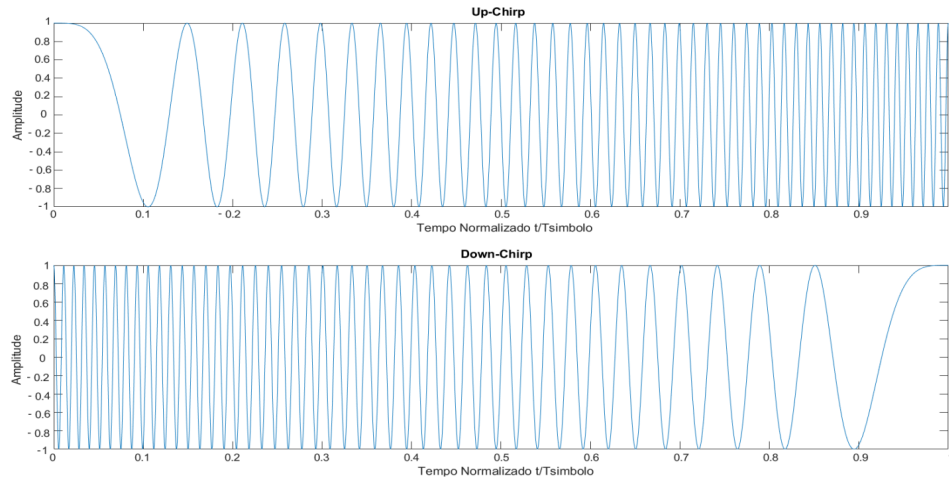
Fonte: (CENTENARO et al., 2016)

2.6.1.1 Camada Física da tecnologia LoRa

Em seu fundamento, a tecnologia LoRa trabalha com a modularização de sinais de radiofrequência por meio de uma técnica de modulação por espalhamento espectral de *Chirp*, o chamado *Chirp Spread Spectrum (CSS)*.

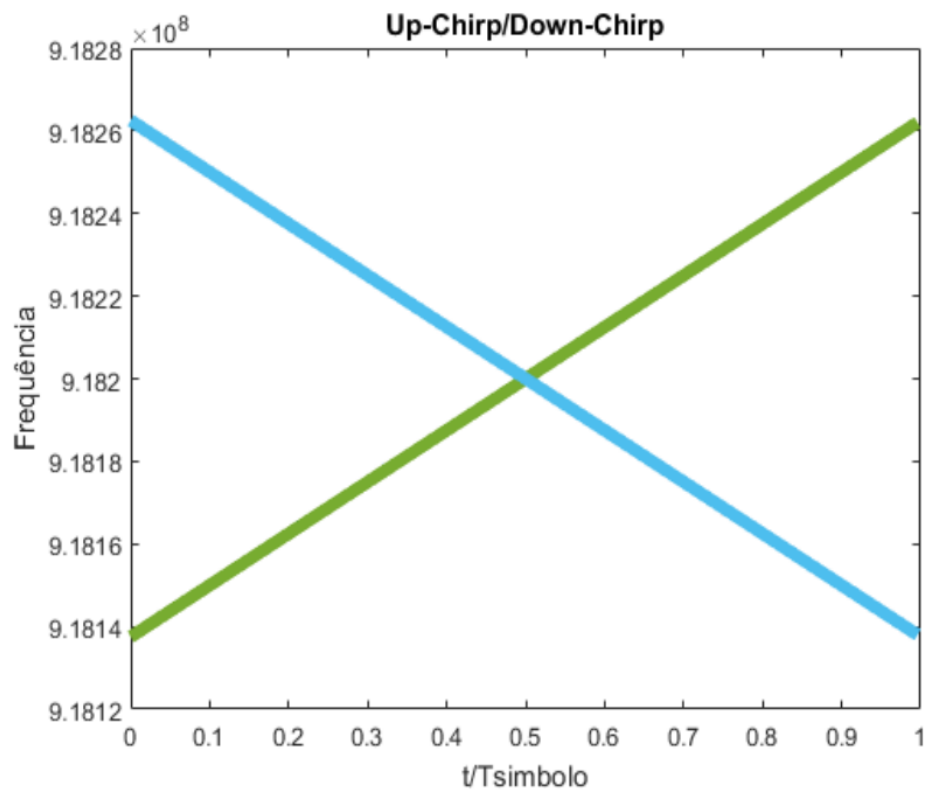
Técnicas de espalhamento espectral consistem em difundir um sinal no domínio da frequência, com o objetivo de estender a banda do sinal de banda base (SANTOS; CUNHA, 2019). A tecnologia LoRa vale do contexto de espalhamento do espectro de frequência para a utilização de *Chirps* como sinais moduladores. Os *Chirps* são sinais que variam sua frequência sob o espectro de frequência de maneira crescente (*up-chirps*) ou de maneira decrescente (*down-chirps*) mantendo a fase constante entre os símbolos da comunicação, o que significa, que a decodificação de um símbolo está relacionada com velocidade com que o *chirp* se espalha no espectro de frequência. Quanto mais lento, melhor a capacidade do receptor da comunicação decodificar um sinal atenuado abaixo da menor potência de sinal em uma banda de frequência acima do ruído de fundo, o chamado *Noise Floor*(RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). As Figuras 10 e 11 apresentam os sinais de *up-chirps* e *down-chirps* no domínio do tempo e da frequência.

Figura 10 – Representação dos sinais de *up-chirp* e *down-chirp* no domínio do tempo.



Fonte: (SANTOS; CUNHA, 2019)

Figura 11 – Representação dos sinais de *up-chirp* e *down-chirp* no domínio da frequência.



Fonte: (SANTOS; CUNHA, 2019)

A modulação de um sinal LoRa é composta por três elementos de comunicação responsáveis pelo desempenho, alcance e confiabilidade da mensagem, são eles o *Coding Rate Spreading Factor* e a *Bandwidth* (RAYCHOWDHURY; PRAMANIK, 2020). A partir desses parâmetros é possível obter a taxa de transmissão de dados da comunicação o (*Bit Rate*), valor usado de referência para o cálculo de outros indicadores como o pacote de mensagem e *Time-on-Air* da mensagem (DEVALAL; KARTHIKEYAN, 2018).

Tabela 1 – Capacidade dos níveis de *Spreading Factor*.

<i>Spreading Factor</i> (SF)	Largura do <i>Chip</i>
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096

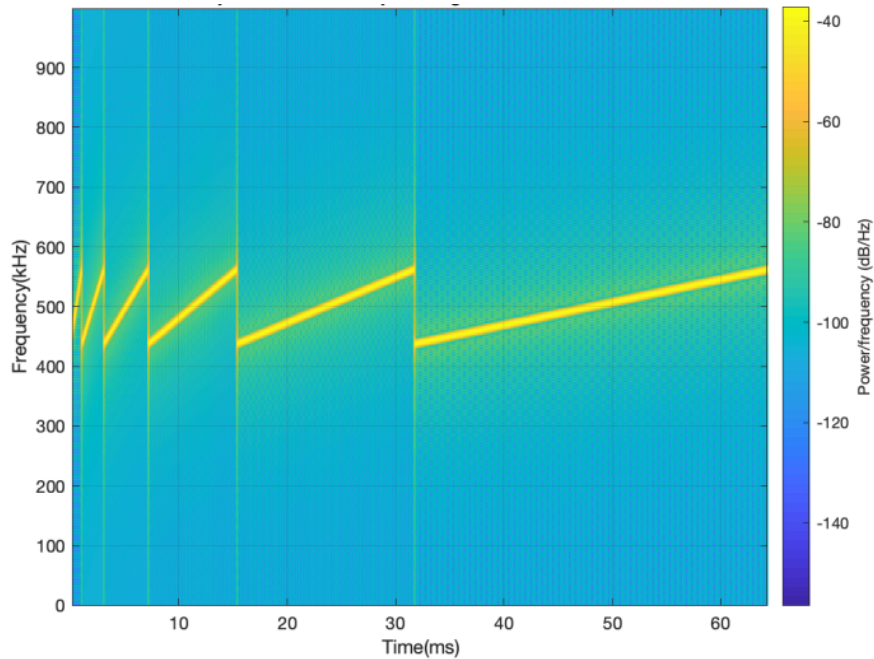
2.6.1.1.1 *Bandwidth*

A *Bandwidth* é a faixa de frequência no qual a tecnologia LoRa opera. Na comunicação via LoRa são suportadas várias larguras de banda, e podem variar conforme cenário de uso e aplicação. Dentre as frequências mais comuns de uso, encontram-se 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz. É importante ressaltar, que a largura de banda aliada ao *Spreading Factor* e *Condng Rate* é um dos parâmetros que afeta a taxa de transmissão de dados e a imunidade a interferência de ruído (BOUGUERA et al., 2018).

2.6.1.1.2 *Spreading Factor*

O *Spreading Factor* é o parâmetro que determina o espelhamento do sinal no espectro de frequência e é codificado em *Chips*, onde cada símbolo é transmitido com com a largura de $2^{(SF)}$ *Chips*. A largura em *Chips* representa a capacidade em bits de representação de um símbolo, conforme apresentado na Tabela 1 (NOREEN; BOUNCEUR; CLAVIER, 2017). Para a comunicação LoRa, a largura dos *Chirps* de comunicação variam com *Spreading Factor* 7 à 12. A Figura 12 ilustra o tempo de transmissão de um símbolo em cada *Spreading Factor* dentro da banda de frequência de 125 kHz.

Figura 12 – Representação do tempo de duração dos sinais de *Spreading Factor* de 7 à 12.



Fonte: (SANTOS; CUNHA, 2019)

Conforme visto na Tabela 1, cada valor de *Spreading Factor* possui uma carga de informação que é levada através de um *Chirp* em uma largura de banda. Além disso, conforme ilustrado na Figura 12 é observado que o tempo de transmissão de um símbolo, o *Time-on-Air*, é afetado pela escolha do SF. Essa relação *Spreading Factor* e *Bandwidth* é descrita através da Equação 1 (RAYCHOWDHURY; PRAMANIK, 2020).

$$T_s = \frac{2^{(SF)}}{BW} \quad (1)$$

Onde:

- SF → *Spreading Factor*;
- BW → *Bandwidth*.

2.6.1.1.3 Coding Rate

O *Coding Rate* da mensagem indica a porção da mensagem que realmente carrega informação e quanto da mensagem é redundante. Na modulação LoRa é possível configurar quatro níveis de *Coding Rate*, conforme exposto na Equação 2 e na Tabela 2. O *Coding Rate* significa a quantidade de informação redundante adicionada a mensagem com a finalidade de garantir a integridade da informação útil na transmissão de mensagens. Porém é importante ressaltar que, um *Coding Rate* elevado significa a adição de mais símbolos ao pacote de mensagem, o que resulta no aumento do *Time-on-Air* da transmissão de um dado.

Tabela 2 – Índices de *Coding Rate*.

<i>Coding Rate</i> (CR)	$CR = \frac{4}{(4+n)}$
1	4/5
2	4/6
3	4/7
4	4/8

$$CR = \frac{4}{(4+n)} \quad (2)$$

Onde:

- $n \in \{1, 2, 3, 4\}$.

A relação entre os parâmetros de comunicação *Bandwidth*, *Spreading Factor* e *Coding Rate* possibilitam a estimação da velocidade de transmissão de uma mensagem, a chamada *Bit Rate*, expressa conforme a Equação 3 (RAYCHOWDHURY; PRAMANIK, 2020).

$$Rb = SF * \frac{1}{Ts} * CR \quad (3)$$

Onde:

- CR → *Coding Rate*;
- Rb → *Bit Rate*;
- SF → *Spreading Factor*;
- Ts → *Symbol Duration Time*.

2.6.1.2 Pacote de mensagem LoRa

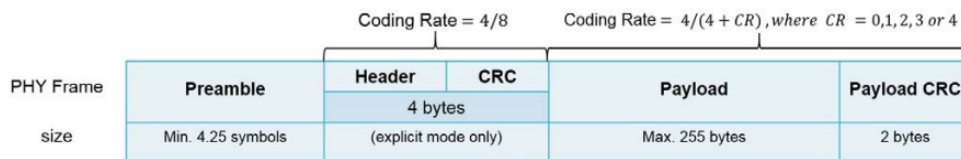
A estrutura do pacote de mensagens LoRa, permite um máximo de 256 bytes, estruturada conforme indicado na Figura 13. O pacote LoRa possui os seguintes componentes (NOREEN; BOUNCEUR; CLAVIER, 2017):

- *preamble*: Conjunto de informação usada na sincronização de mensagens, serve para estabelecer uma conexão entre transmissor e receptor. Geralmente é uma mensagem com um padrão de informação conhecido por ambas as extremidades da comunicação.
- *Header Field*: Contém informações acerca da comunicação, como o *forward error correction* (FEC) indicativo da redundância da mensagem configurada através do CR, o

Spread Factor e a *Bandwidth*, e uma parcela para o CRC (*Cyclic Redundancy Check*) das mensagens do *Header Field*.

- *Payload*: Campo que carrega a informação a ser transmitida na comunicação.
- *CRC*: Parcela de byte responsável por comprimir o conteúdo do pacote de comunicação em um código único na comunicação. É uma técnica para validação da integridade da mensagem durante a comunicação.

Figura 13 – Estrutura do pacote de mensagens LoRa.

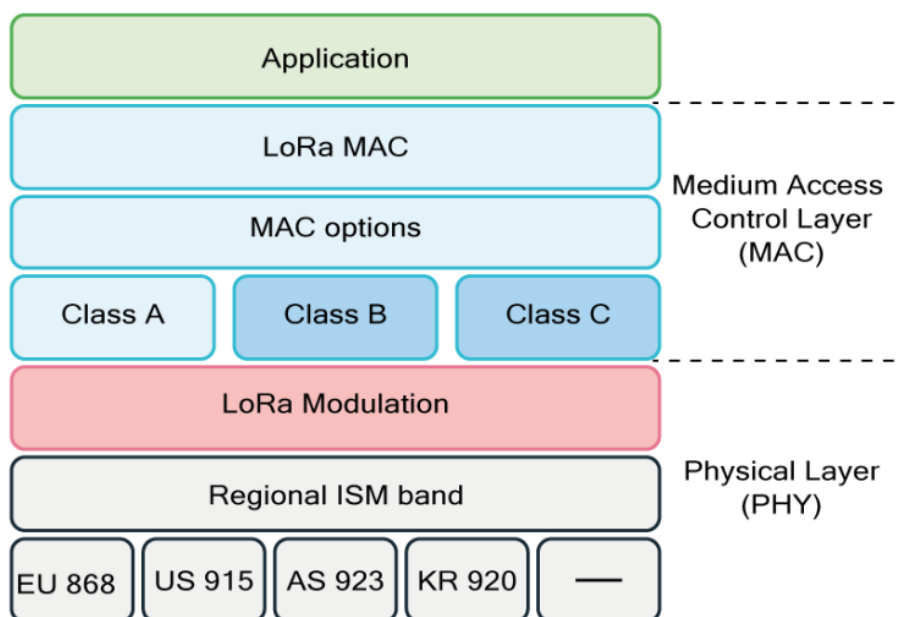


Fonte: (NOREEN; BOUNCEUR; CLAVIER, 2017)

2.6.2 LoRaWAN

LoRaWAN é um protocolo de comunicação desenvolvido pela LoRa Alliance, para operar na camada MAC (*Media Access Control*) de uma rede de comunicação baseada LoRa em sua camada física (ALLIANCE, 2023). LoRa e LoRaWAN são tecnologias idealizadas para aplicações IoT com escopo de baixo consumo de energia e cobertura de grandes áreas geográficas. A pilha do protocolo se divide entre aplicação, serviços da camada MAC com o gerenciamento do acesso dos dispositivos LoRa à rede LoRaWAN por meio de três classes de comunicação e serviços da camada física, conforme apresentado a Figura 14.

Figura 14 – Pilha do protocolo LoRaWAN.

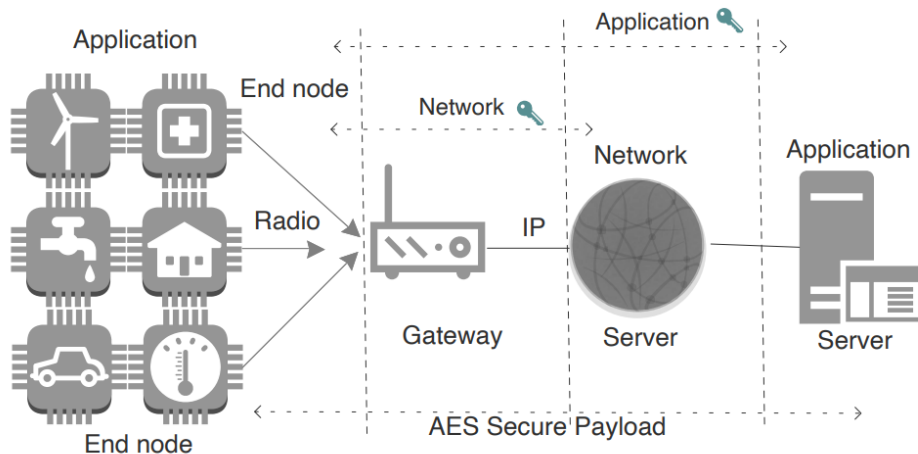


Fonte: (KIM; LEE; KIM, 2019)

2.6.2.1 Arquitetura LoRaWAN

A estrutura de uma rede LoRaWAN segue os moldes de uma arquitetura estrela, como ilustrado anteriormente na Figura 9, em que um *Gateway* atua como elemento centralizador de informação e intermediário entre *End-Nodes* e *Network Server*. O esquema completo de uma rede LoRaWAN considera o fluxo de informação conforme a Figura 15, do *End-Node* à aplicação. O protocolo LoRaWAN trabalha com duas tecnologias de comunicação em sua pilha: entre *End-Node* e *Gateway* a comunicação é feita via LoRa, e entre *Gateway* e *Network Server* a tecnologia de transmissão e protocolos de comunicação para acesso ao servidor de rede ficam a cargo da fabricante do *Gateway*, podendo ser adotado tecnologias como: WiFi, 3G, 5G, Ethernet. e protocolos como HTTP, MQTT, CoAP, entre outros (SINGH et al., 2020).

Figura 15 – Arquitetura de rede LoRaWAN.

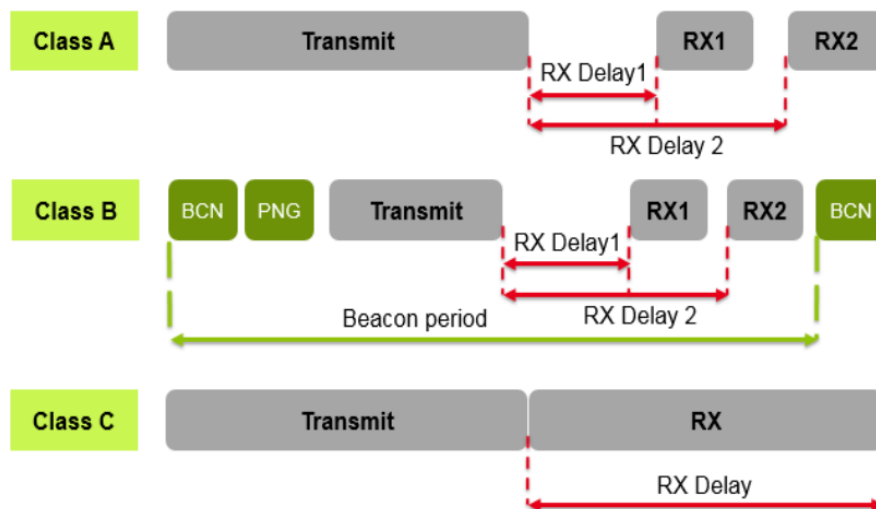


Fonte: (SINGH et al., 2020)

2.6.2.2 Comunicação LoRaWAN

O protocolo LoRaWAN dispõe de três classes para a comunicação entre dispositivos LoRa, as classes A, B e C, que regulam o tráfego de mensagens conforme a relação entre o consumo de energia na operação do rádio LoRa e os requisitos de comunicação (AYOUB et al., 2018). A divisão das classes é estabelecida de acordo com o nível de interação com o servidor de rede, mais especificamente na latência de resposta do *End-Node* ao servidor. Nesse sentido, a diferenciação entre as classes se dá por meio da abertura de janelas de tempo em que o rádio LoRa de um *End-Node* se dispõem a recepção de pacotes de mensagem, conforme indicado pela Figura 16.

Figura 16 – Classes de comunicação LoRaWAN.



Fonte: (BOUGUERA et al., 2018)

- Classe A: É a classe de comunicação mais eficiente energeticamente. Nessa classe, o *End-Node* dá início a comunicação com uma mensagem de *uplink* (pacote de mensagem transmitida do *End-Node* à rede LoRaWAN), e abre duas janelas de tempo com duração próxima a um segundo logo após a mensagem de *uplink* para que uma mensagem de *downlink* (pacote de mensagens transmitida da rede LoRaWAN ao *End-Node*) possa ser recebida pelo *End-Node*. Dessa forma, o dispositivo mantém uma troca de mensagens com o servidor de rede, e evita o contínuo funcionamento do rádio LoRa.
- Classe B: Essa classe de comunicação expande o espaço de tempo para recepção de mensagens de *downlink* com o agendamento de diversas janelas PNG (*Ping Slot*) para recepção de mensagens. O agendamento das janelas de recepção de mensagens é feito por meio do intervalo de tempo entre transmissão de um pacote de mensagens ou entre emissão de sinais de BCN (*beacon*) (sinais periódicos, com a finalidade de sincronizar dispositivos em uma rede ou indicar informações para dispositivos receptores e transmissores de mensagem) mandados pelo *Gateway*. A abertura de PNG's periódicas implica no funcionamento frequente do rádio LoRa e aumento do consumo de energia do dispositivo LoRa em relação a classe A.
- Classe C: A classe C descreve a categoria em que o *End-Node* está sempre pronto a receber um pacote de mensagens vindo do *Gateway*, nessa classe sempre há uma janela de recepção continuamente aberta, e com isso o rádio LoRa se dispõe em pleno funcionamento a todo instante, sendo, portanto, a classe de maior consumo de energia do protocolo LoRaWAN. Essa classe é voltada à aplicações cujos requisitos demandam respostas de baixa latência do *End-Node* à requisições do servidor de rede.

Por padrão todo rádio LoRa oferece suporte a comunicação em classe A, porém, somente alguns rádios e gateway dispõem de estrutura de *hardware* e *software* para comunicação em classes específicas ou em todas as três.

2.6.2.3 Métodos de ativação

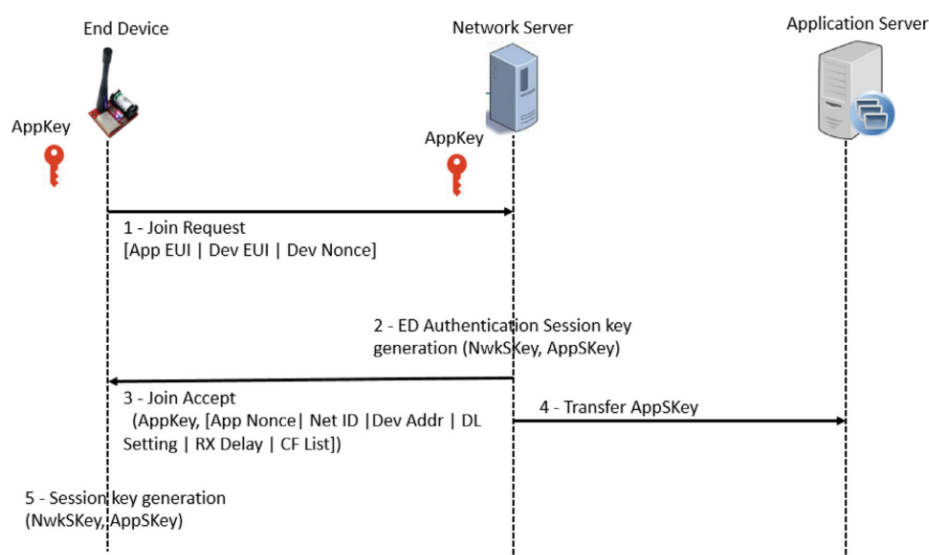
O protocolo LoRaWAN utiliza o padrão de encriptação AES-128 (*Advanced Encryption Standard* de 128 bits) para autenticação e encriptação no tráfego de mensagens na rede. Esse padrão de criptografia compreende duas camadas de segurança, envolvendo a geração de duas chaves de segurança de uso exclusivo dos dispositivos da rede, a *NwkSKey* (*Network Session Key*) e a *AppSKey* (*Application Session Key*). Por meio desse padrão a segurança da rede é estabelecida por meio da *NwkSKey*, usada para autenticar um dispositivo pertencente a rede, enquanto que *AppSKey* faz a autenticação da comunicação entre servidor de aplicação e *End-Node* (DEVALAL; KARTHIKEYAN, 2018). Nesse contexto, para que o dispositivo faça parte de uma rede LoRaWAN, é necessário que ele seja ativado e autenticado, esse processo pode ser feito das seguintes maneiras:

- OTAA (*Over the air activation*);
- ABP (*Activation by personalisation*).

2.6.2.3.1 OTAA

Nesse tipo de ativação, uma mensagem de *Join-request* é criada pelo *End-Node* e enviada para o servidor de rede. Nesta mensagem constam os códigos de identificação: *DevEUI*, *AppEUI* e o *DevNonce*. Nesse estágio da comunicação, uma chave *AppKey* é criada e compartilhada entre *End-Node* e o servidor de rede. A partir dela são geradas as chaves de autenticação *NwkSKey* e *AppSKey*. Dentre os códigos de identificação, o código *AppEUI* representa o identificador da aplicação dentro da rede, e o *DevEUI* constitui um identificador global único do *End-Node*. O *DevNonce* é um número aleatório de 16 bits indicando a quantidade de *Join-requests* realizadas por um dispositivo para o servidor de rede, e tem o papel de evitar ataques de *replay*, repetição de pacotes dentro da rede. Em resposta a mensagem de *Join-request*, o servidor de rede retorna uma mensagem de *Join-accept* para firmar a conexão do dispositivo com a rede. A adição do dispositivo à rede é consolidada com o compartilhamento das chaves *NwkSKey* e *AppSKey* para o dispositivo *End-Node* e o servidor de aplicação, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Ativação por OTAA.



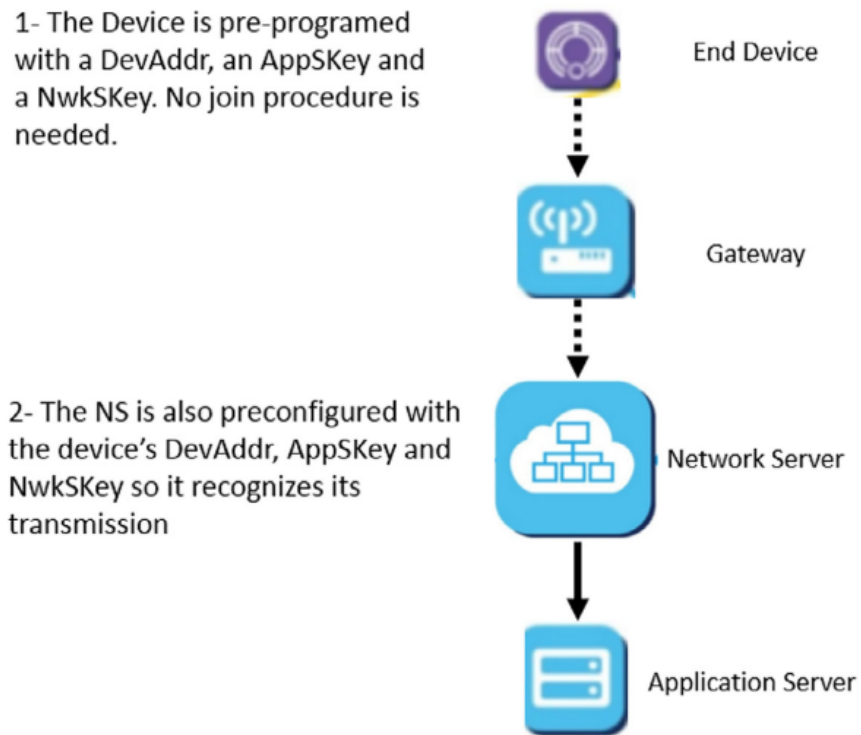
Fonte: (NOURA et al., 2020)

2.6.2.3.2 ABP

No método de ativação por personalização, o *End-Node* já dispõe de chaves de acesso a rede LoRaWAN únicas e pré-configuradas. Diferentemente do método de ativação por OTAA, o método ABP não requer um processo de *Join* para gerar credenciais de decriptografia e operar

em uma rede LoRaWAN. Em vez disso, o dispositivo usa as chaves especiais de NwkSKey e AppSKey para criptografar as mensagens comunicadas na rede, e faz uma conexão direta ao servidor de rede e ao servidor de aplicação, conforme exposto na Figura 18.

Figura 18 – Ativação por ABP.



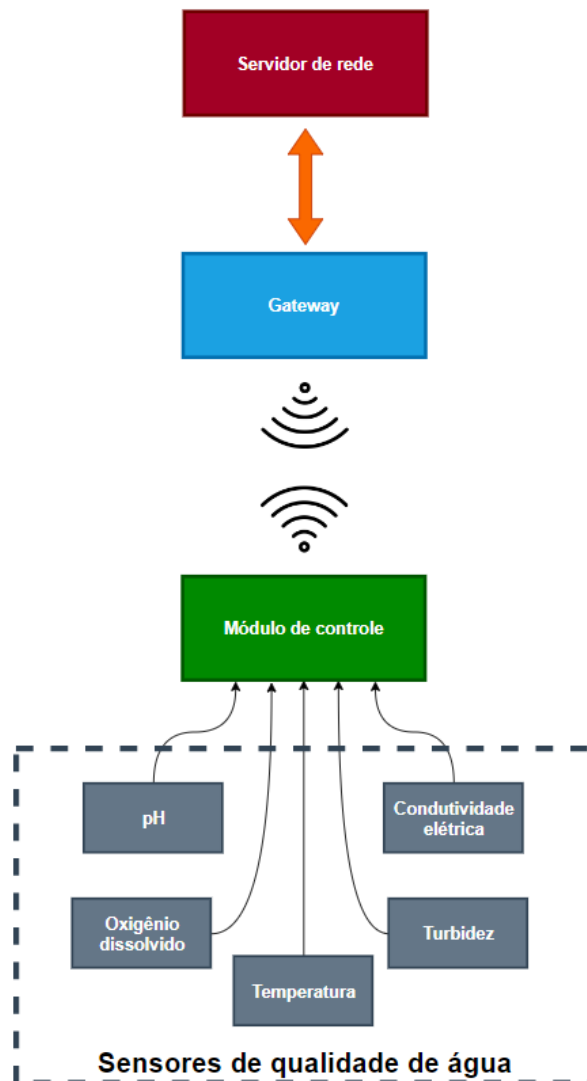
Fonte: (NOURA et al., 2020)

3 METODOLOGIA

O trabalho apresentado consiste na implementação de um sistema de monitoramento de parâmetros de qualidade de água fluviais, por meio do desenvolvimento de uma WQMS no contexto IoT. A plataforma de monitoramento idealizada, visa apresentar um método alternativo para coleta de indicadores de qualidade de água em rios. Assim sendo, é proposto um sistema capaz de amostrar dados de temperatura da água, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, pH e turbidez, e compartilhá-los dentro de uma rede LoRaWAN de forma periódica e consistente.

O sistema proposto consiste em recursos de sensoriamento, processamento de dados coletados a partir da camada de hardware do sistema, comunicação com o servidor de rede e exibição de dados, conforme exposto na Figura 19.

Figura 19 – Arquitetura proposta para o sistema de coleta de parâmetros de qualidade de água e compartilhamento de dado por meio da *stack* LoRaWAN.



Fonte: Autoria própria

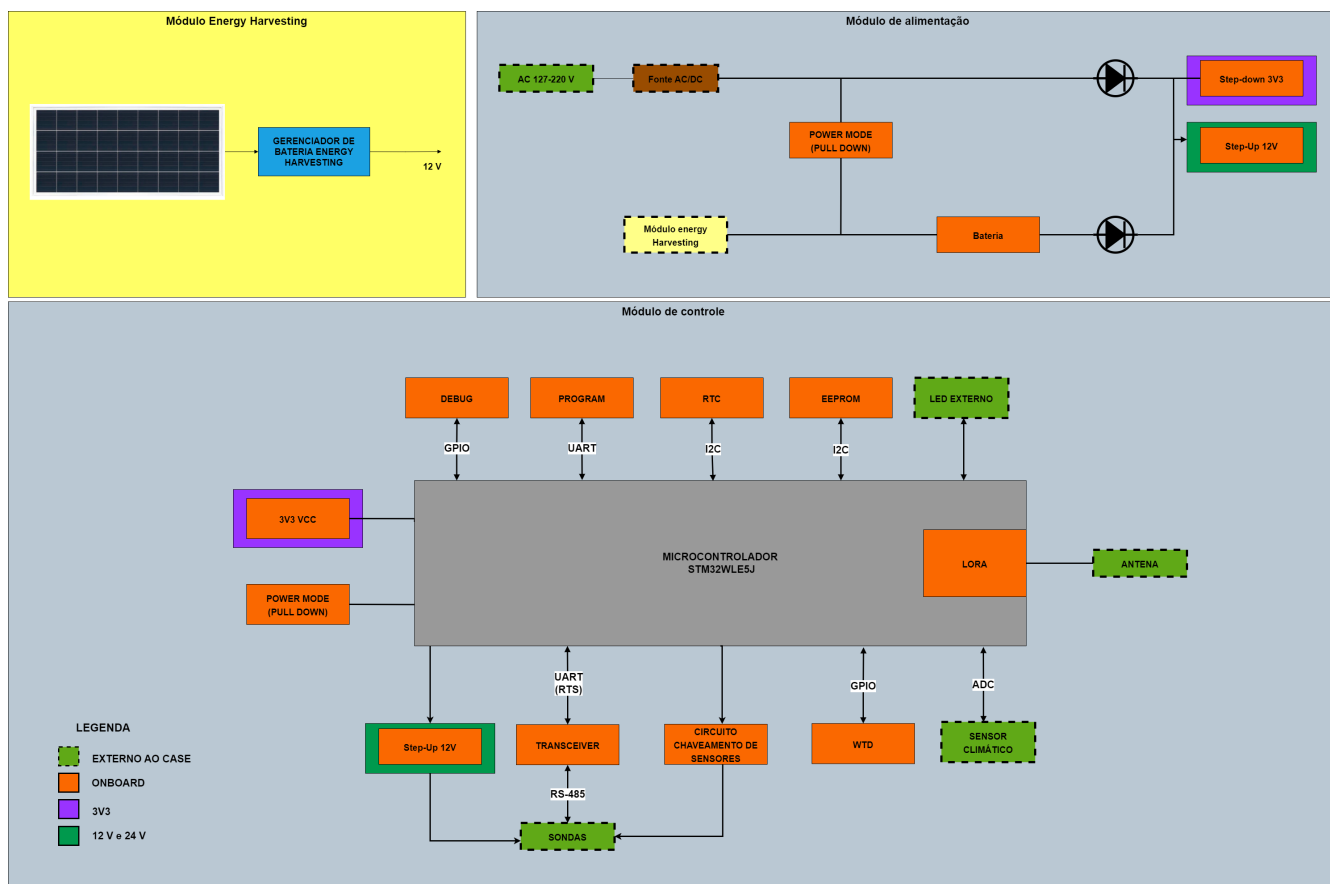
Baseado nos requisitos de envio de informações periódicas e o compartilhamento de

dados em longas distâncias, a arquitetura do sistema foi construída observando pontos comuns em sistemas semelhantes, como a escalabilidade em quantidade de *End Nodes*, caso haja a necessidade de mais dispositivos de medição, a transportabilidade e autonomia do sistema de monitoramento em localidades remotas, o que implica em baixo consumo de energia e gestão dos recursos computacionais da placa, como na falta de conexão com servidor, por exemplo.

A seleção do conjunto de sensores constituintes do sistema será feita conforme os critérios de precisão e sensibilidade da norma ABNT 15847 de 2010 acerca dos ensaios com instrumentos de medição de qualidade de água em laboratório. Com base nos sensores selecionados para o projeto, será feito o dimensionamento do circuito de alimentação do sistema e acionamento das sondas de medição.

3.0.1 Arquitetura de *Hardware*

O *hardware* proposto para a plataforma de coleta de dados, dentro do escopo de baixo consumo energético e de IoT, exige uma estrutura que permita autonomia do dispositivo em localidades remotas, sendo assim, o circuito será dividido em dois núcleos fundamentais, o módulo de alimentação e o módulo de controle. Na Figura 20, são apresentados os componentes do *hardware* proposto para o circuito do sistema de monitoramento.

Figura 20 – Arquitetura proposta de *hardware*.

Fonte: Autoria própria

O módulo de controle contará com um microcontrolador da família STM32WL, desenvolvido pela STMicroelectronics. Os microcontroladores STM32 da família WL (*Wireless*) são direcionados para aplicações de *Low Power* com diferentes tecnologias de comunicação RF, dentre elas a modulação LoRa (STMICROELECTRONICS, 2023). Além disso, algumas variantes dessa família podem contar com dois núcleos de processamento em seu interior, os processadores Arm Cortex-M4 e Arm Cortex-M0+. Conforme ilustrado na Figura 20, o módulo de controle concentra a maior parte dos recursos utilitários do *hardware* do sistema de monitoramento, divididos em setores de interface de programação e depuração, barramentos de comunicação e circuitos auxiliares. Dentre esses setores, se destacam o barramento de comunicação I2C *Inter-Integrated Circuit* interligado aos CI's (Circuitos Integrados) de memória não volátil EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) e relógio RTC (*Real-Time Clock*), que servirão para dar suporte ao processo de envio e armazenamento de mensagens de medição e referência temporal para o sistema, além de um WTD (*Watchdog Timer*) para proteção contra possíveis travamentos.

O módulo de alimentação foi projetado para oferecer alimentação híbrida, por meio da energia vinda da rede elétrica próxima ao sistema de monitoramento, o que pode oferecer mais estabilidade ao sistema. A outra modalidade de alimentação consiste em um circuito de *energy*

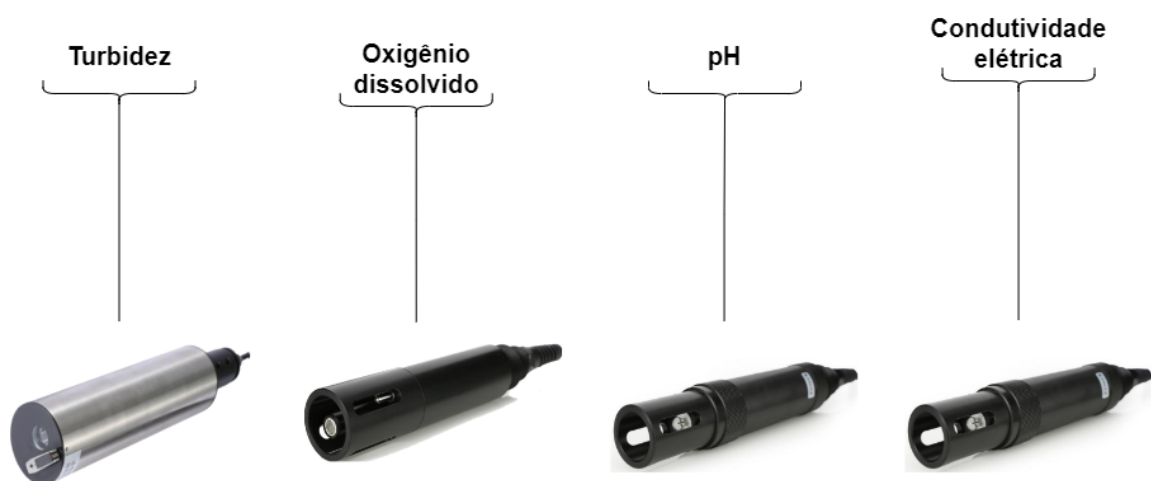
harvesting por energia fotovoltaica, que poderá suprir a necessidade de energia em localidades remotas ou de difícil acesso.

3.0.1.1 Sondas e sensores

A camada de sensoriamento do sistema de coleta é composto por sondas de medição de parâmetros de qualidade de água e sensores climáticos atrelados ao módulo de controle do sistema. A arquitetura proposta para o sistema foi idealizada de forma a possibilitar a medição dos seguintes parâmetros de qualidade de água: pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, turbidez, umidade relativa da água, temperatura da água e do ar.

Um dos principais propósitos do sistema de monitoramento de parâmetros de qualidade de água é apresentar uma forma alternativa para coleta de dados sobre a qualidade de água de bacias hídricas. Nesse sentido, é necessário a utilização de dispositivos de medição com acurácia semelhante á das ferramentas usadas em análise de qualidade de água em campo. Portanto, foi utilizado o conjunto de sondas da fabricante *BOQU Instruments* (INSTRUMENT, 2022), uma empresa atuante no ramo de produção de sondas, medidores e analisadores de qualidade de água à nível laboratorial. Com isso, selecionamos sondas com encapsulamento que permitisse a imersão completa da sonda em meio líquido, como exposto na Figura 21. As especificações quanto acurácia das sondas podem ser conferidas a partir da Tabela 3.

Figura 21 – Sondas de medição de parâmetros de qualidade de água BOQU.



Fonte: Autoria própria

Cada uma das sondas de qualidade de água presentes na camada de sensoriamento possui métodos de medição próprias, conforme a necessidade de medição de cada parâmetro de qualidade de água, que abrangem sensores ópticos, membranas de reagentes químicas ou leituras de ADC's dedicados. Quanto ao método de comunicação entre módulo de controle e sonda de medição, cada sonda disponibiliza uma interface de comunicação através do padrão de comunicação RS-485 por meio do protocolo Modbus RTU.

Tabela 3 – Resolução das sondas de qualidade de água. Fonte: (INSTRUMENT, 2022).

Parâmetro	Modelo	Resolução
pH	BH-485-pH	± 0.01
Turbidez	ZDYG-2088-01	± 0.01 NTU
Condutividade elétrica	BH-485-EC	± 0.1 us/cm
Temperatura	BH-485-EC	± 0.5 C
Oxigênio dissolvido	DOG-209FYD	$\pm 3\%$

Dentre os componentes da camada de sensoriamento, o único sensor não submerso é sensor de medição climática, que contribui com informação de temperatura do ar e umidade relativa da região. Para a implementação no presente trabalho, foi escolhido o sensor EE060, apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Sensor de temperatura e umidade relativa EE060.

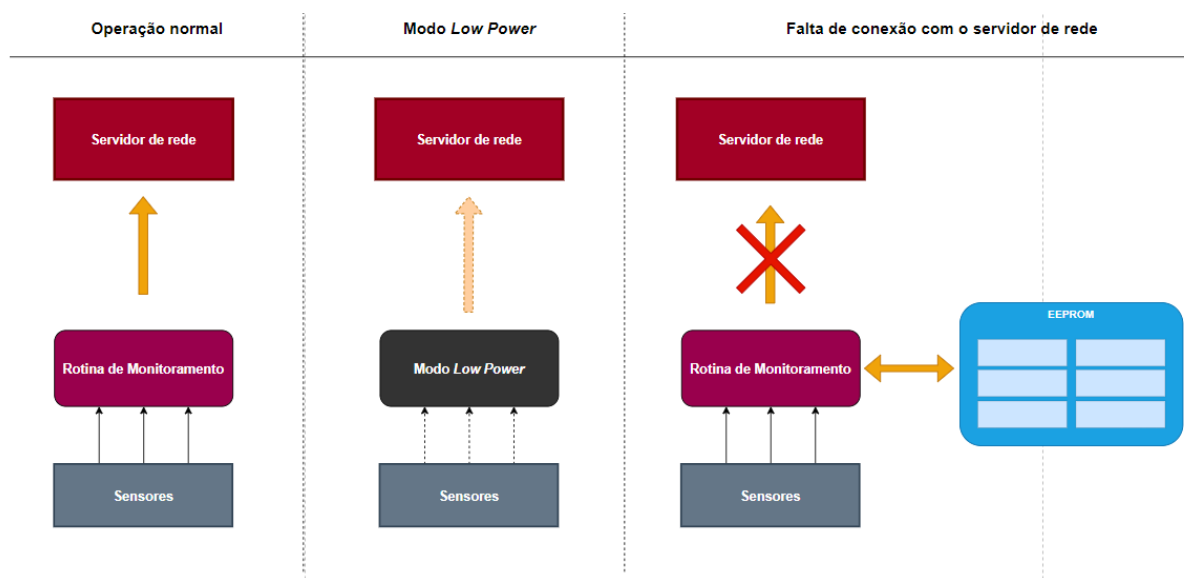


Fonte: Autoria própria

3.0.2 Arquitetura de *Firmware*

A arquitetura de *firmware* implementada no sistema foi responsável pelos seguintes pontos: estrutura de comunicação do *End-node* com o servidor de rede e de aplicação por meio do protocolo LoRaWAN, gestão dos recursos de *hardware*, otimização do consumo de energia e gestão dos dados coletados. Conforme mostrado na Figura 23, o funcionamento do *firmware* atuará alternando entre modo *Low Power*, rotina de amostragem de dados e rotinas de gestão e armazenamento das medições coletadas.

Figura 23 – Cenários de funcionamento do *firmware* idealizado.

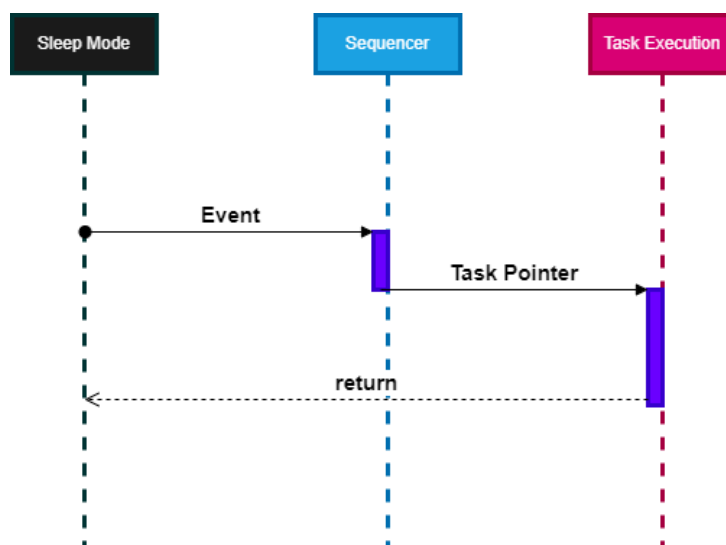


Fonte: Autoria própria

3.0.2.1 Fluxo de execução de tarefas

O modelo operacional do firmware é voltado para aplicações de baixo consumo de energia, onde é associado tanto aos modos de operação *Low Power* nativos do microcontrolador quanto ao *hardware* desenvolvido para gerenciamento dos periféricos.

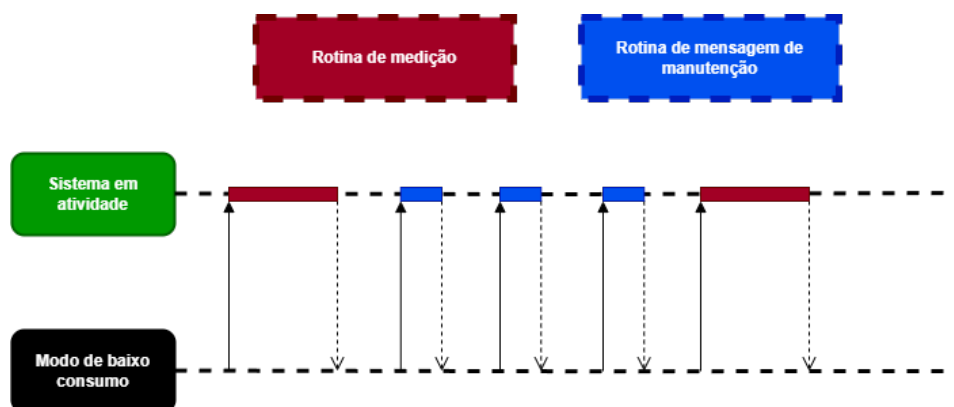
O pilar central da arquitetura estruturada para o *firmware* é baseado no *software* utilitário da fabricante do microcontrolador STM32WL para trabalhos em regime *Low Power* juntamente com a *stack* LoRaWAN. Este mecanismo de *software* de nome *sequencer* cria uma estrutura baseada em eventos de interrupção de tempo para a execução de processos ou *Tasks*. dentro desta estrutura, cada *Tasks* é cadastrada com um nível de prioridade de execução e um evento associado. Com a finalização da execução de uma tarefa, o microcontrolador entra em modo de *Low Power* e aguarda um novo evento para a execução da próxima tarefa, como exemplificado na Figura 24.

Figura 24 – Fluxo de execução das tarefas pelo *sequencer*.

Fonte: Autoria própria

Para o propósito deste trabalho, ao menos duas *tasks* são necessárias, a primeira delas é a rotina de medição, responsável pela amostragem de parâmetros de qualidade de água e envio de pacotes de mensagens ao servidor de rede via LoRaWAN, e uma *task* para envio de mensagens de manutenção, que consistem no envio de uma mensagem LoRaWAN usada somente para a abertura de uma janela de recepção de pacotes de mensagens de *downlink* do servidor de rede, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 – linha de vida da operação do sistema de monitoramento de qualidade de água.



Fonte: Autoria própria

3.0.2.2 Características de operação

Um dos requisitos considerados essenciais na elaboração deste projeto é a possibilidade de instalação em diversos rios com características diferentes ou necessidades de monitoramento específicas. Portanto, foi incorporado às funcionalidades do sistema de telemetria a possibilidade de configuração de parâmetros de operação do dispositivo de medição conforme a exigência

bioquímica do corpo hídrico em análise. Dentre os parâmetros configuráveis estão: taxas de amostragem, faixas de indicação de estabilidade de cada parâmetro individual de qualidade de água e frequência de envio de mensagem de manutenção. As configurações citadas podem ser enviadas para o sistema de monitoramento por meio de pacotes de mensagens de *downlink* enviadas para o servidor de rede.

Tendo em vista a necessidade de gerenciar o consumo de energia da unidade de monitoramento e atender os requisitos de amostragem de parâmetros de que qualidade de água, foram propostos três modos de operação para o sistema de telemetria. São eles:

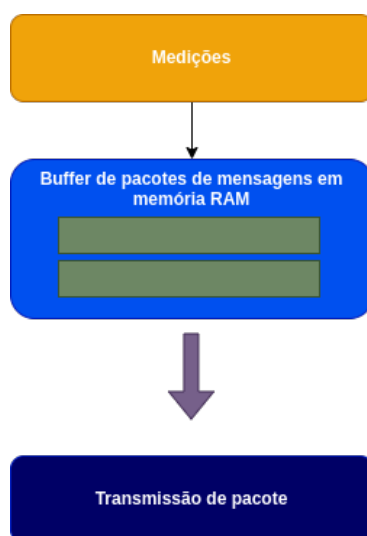
- **Modo de operação 1:** Os tempos relacionados a frequência de execução da rotina de medição de qualidade de água e rotina de envio de mensagem de manutenção seguem a configuração padrão de amostra de dados a cada 6 horas e abertura de janela para mensagens de *downlink* a cada 10 minutos, e podem ser definidas de acordo com a frequência de amostragem tida como necessária para o estudo da qualidade da água de um rio específico. Este modo fica disponível quando o sistema de monitoramento se mantém conectada à rede de energia elétrica local, o que permite a ativação do rádio LoRa com maior periodicidade, dado que em transmissões de mensagem LoRa são registrados os maiores picos de consumo do sistema. Além disso, para que neste modo não haja o uso indiscriminado do espectro de frequência durante o envio de mensagens via LoRa, o intervalo mínimo possível de ser configurado foi definido como dois minutos.
- **Modo de operação 2:** O segundo modo de operação proposto permite que os as frequências de execução das rotinas de medição e envio de mensagem de manutenção possam ser configuradas por meio de mensagens de *downlink*, porém, com período mínimo de envio de mensagens maior que o primeiro modo, pois este segundo modo de operação é destinado a ocasiões em que o sistema é instalado em locais remotos e sem o auxílio de eletricidade proveniente da rede elétrica. Sendo assim alimentada apenas pela bateria vinculada ao sistema de monitoramento, e circuito de *energy harvesting*.
- **Modo de operação 3:** O modo de detecção de anomalia se trata de uma rotina com a mesma estrutura da rotina de medição, porém com o diferencial de atuar somente quando um ou múltiplos valores lidos encontram-se fora da faixa de indicação da regularidade de um parâmetro de qualidade de água no local onde o sistema de monitoramento está instalado. Quando um valor anômalo é registrado, um alerta é enviado para o servidor informando a alteração observada e a frequência de amostragem de todos os sensores é aumentada para captar possíveis outras alterações e munir o analista dos dados de maior informação sobre a situação do rio. Da mesma forma que nos demais modos de operação, os tempos relacionados a frequência de amostragem e envio de mensagem de manutenção podem ser configurados, juntamente com a faixa de valores consideradas regulares para um corpo hídrico.

3.0.2.3 Sistema de armazenamento

Um ponto importante a ser levado em consideração na elaboração de um sistema síncrono de coleta de dados que atua em regime remoto, é a perda de dados por falta de comunicação com a unidade de medição remota. Nesse sentido, optou-se por uma abordagem simplificada de sistema de armazenamento das amostras coletadas pelo sistema.

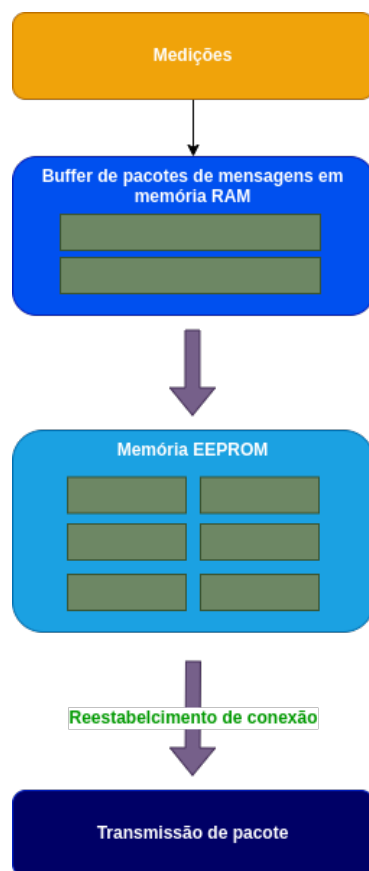
Conforme ilustrado nas Figuras 26 e 27, o sistema de armazenamento consiste em dois estágios de retenção de dados. Em um primeiro momento, o pacote de mensagens populado com leitura de sensores e demais informações operacionais de sistema são mantido em memória RAM (*Random Access Memory*) e em seguida é realizada a tentativa de envio de mensagem ao servidor de rede. Caso não seja possível estabelecer uma comunicação com o servidor de rede, o conteúdo dos pacotes de mensagem são armazenados em um *buffer* ainda em memória RAM. Dada a possibilidade de que todas as tentativas de reconexão com o servidor de rede previstas no processo de persistência de comunicação expirem, os pacotes armazenados no *buffer* dados passam a ser registrados dentro da memória EEPROM presente no módulo de controle do sistema de monitoramento. Este procedimento de armazenamento inicialmente em memória RAM e posteriormente em memória EEPROM, tem por finalidade economizar ciclos de escrita da memória EEPROM e estender sua vida útil. Ao reestabelecer conexão com o servidor de rede, e verificar que há pacotes de mensagens pendentes de envio na memória EEPROM, é feita a sinalização ao servidor de rede que serão transmitidas as mensagens armazenadas em memória não volátil.

Figura 26 – Ciclo de envio de mensagens com o sistema de medição conectado ao servidor de rede.



Fonte: Autoria própria

Figura 27 – Ciclo de envio de mensagens com o sistema de medição desconectado do servidor de rede.



Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desenvolvimento do sistema de telemetria apresentado neste trabalho, tem como propósito apresentar uma ferramenta para compor a camada de sensoriamento de uma WQMS, e contribuir com levantamento de informação acerca da qualidade da água de rios amazônicos. Nesse sentido, foi construído um sistema embarcado conforme as arquiteturas de *hardware* e *firmware* apresentadas no capítulo de metodologia para que o sistema proposto fosse validado em campo. Tendo isso em vista, este capítulo apresentará as principais análises e achados obtidos com a implementação deste sistema, que compreende a validade das medições realizadas com métodos tradicionais de monitoramento e variação temporal e espacial dos parâmetros de qualidade de água.

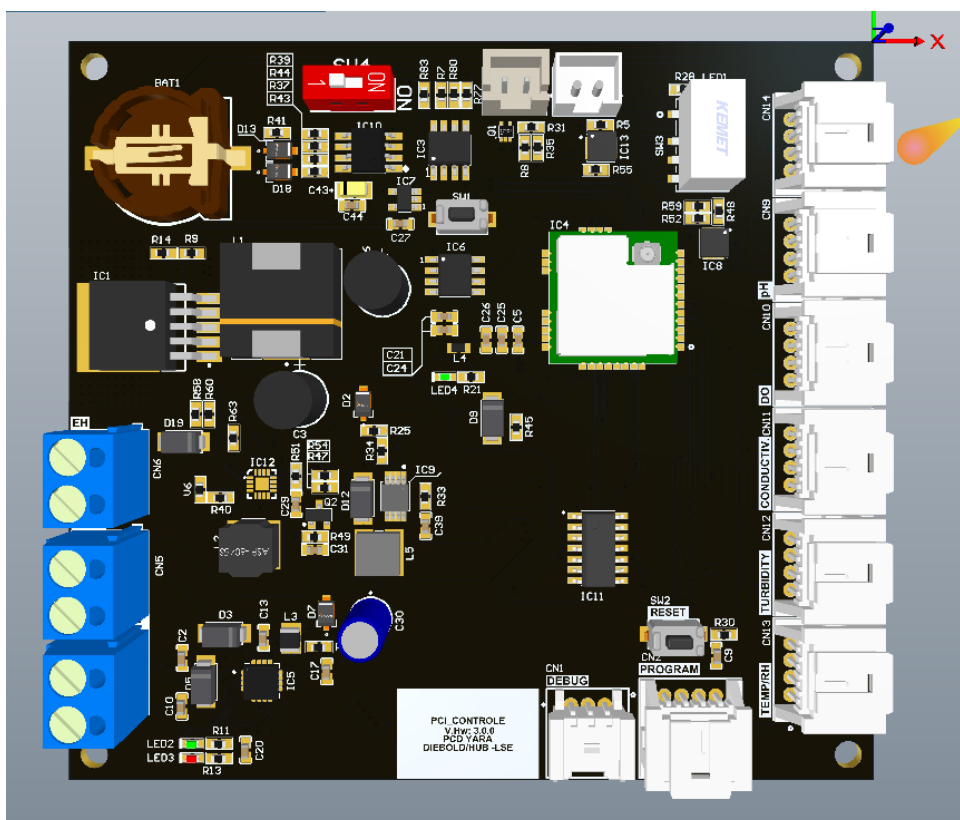
4.1 PLATAFORMA DE *HARDWARE*

O processo de desenvolvimento do *Hardware* para o sistema de telemetria seguiu as seguintes etapas: divisão das seções funcionais essenciais, conforme a descrição apresentada na Figura 20, elaboração do diagrama esquemático de cada seção e a elaboração do *layout* da placa.

A primeira etapa consistiu na definição das seções do circuito levando em consideração as funcionalidades do dispositivo. Foram identificadas as principais seções, como alimentação, interface de comunicação com periférico, para depuração e sensoriamento. Com base nisso, elaboramos o diagrama esquemático do circuito. Utilizamos o software de *design* eletrônico *Altium Designer* (DESIGNER, 2023) para a construção dos diagramas esquemáticos detalhados de cada seção do circuito. Nessa etapa, foram determinados os componentes eletrônicos, conexões e parâmetros de configuração relevantes.

Como etapa final da elaboração do *Hardware*, foi feito o projeto de *layout*. Nessa fase, fizemos o posicionamento dos componentes eletrônicos e traçamos rotas de conexão, o que resultou na placa de circuito impresso presente na Figura 28.

Figura 28 – Placa de circuito impresso do sistema de telemetria.



Fonte: Autoria própria

4.1.1 Módulo de *Energy Harvesting*

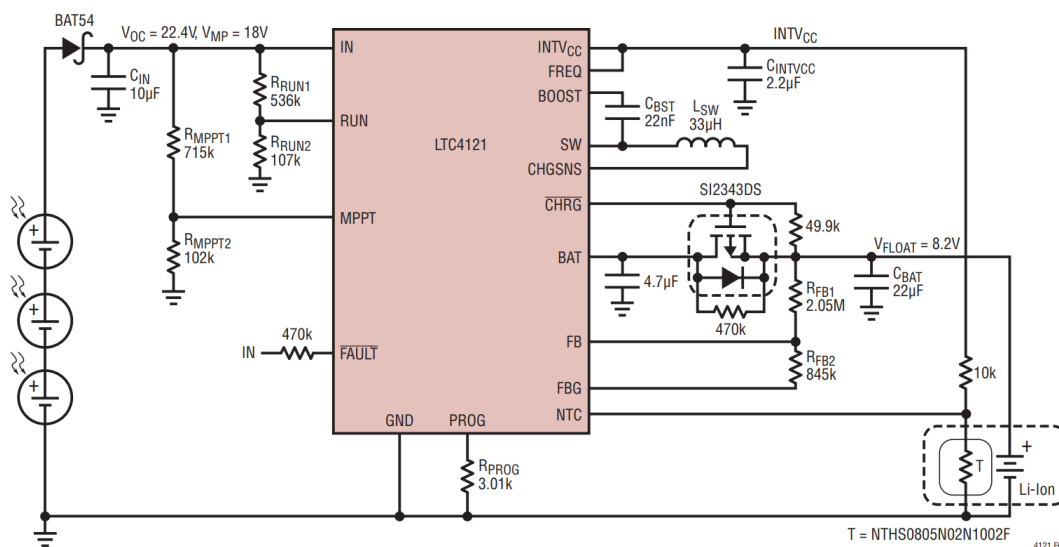
No desenvolvimento do sistema de *energy harvesting* baseado em energia fotovoltaica, o primeiro passo foi realizar o levantamento das necessidades do projeto tais como faixa de tensão da placa fotovoltaica e eficiência do sistema.

O sistema idealizado utilizaria uma placa solar que atua na faixa de tensão de 18 V à 21.6 V, para oferecer 11. V para uma bateria de Lítio-Ion como saída do circuito de *energy harvesting*.

Nesse contexto, escolhemos o CI LTC4121 para compor o circuito de condicionamento de tensão do sistema de *energy harvesting*. O LTC4121 é um carregador de bateria síncrono à 400 mA e faixa de tensão de entrada entre 4.4 V à 40 V, comumente usado em aplicações alimentadas por energia solar.

O diagrama esquemático do circuito de condicionamento foi construído com base na aplicação típica do CI mostrada na Figura 29.

Figura 29 – Aplicação típica do CI LTC4121 para carregamento de baterias de Li-Ion.

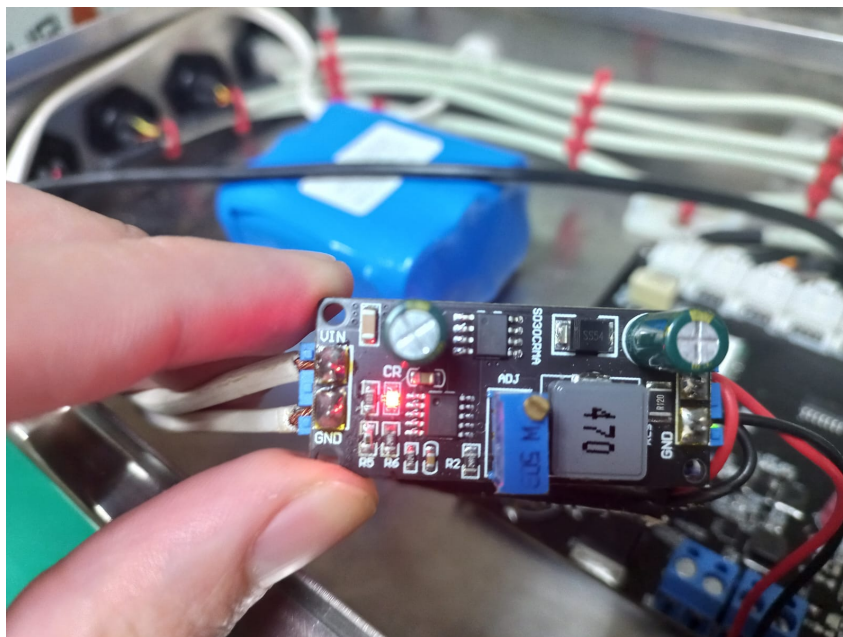


Fonte: *Analog Devices* (DEVICES, 2023).

Após a conclusão do *design* do diagrama esquemático, *layout* e montagem da placa de circuito impresso foram realizados os testes funcionais do bloco do circuito. Nesta etapa do desenvolvimento verificamos que o circuito concebido não estava carregando completamente a bateria utilizada no projeto. Durante a revisão do circuito de *energy harvesting* foi verificado que o CI LTC4121 tem capacidade de carregar até duas células de Lítio-Ion. No entanto, a bateria escolhida para compor o projeto possuía três células de Lítio-Ion, o que justifica a incapacidade do circuito de carregar completamente a bateria.

Como solução para contornar o problema encontrado, optou-se por utilizar o módulo controlador de carga exposto na Figura 30 para atuar como carregador da bateria.

Figura 30 – Controlador de carga usado no projeto.



Fonte: Autoria própria

A incorporação do módulo de controlador de carga no projeto se revelou uma decisão assertiva para o carregamento da bateria. O controlador de carga permitiu o carregamento adequado da bateria sem riscos de sobrecarga, além de possuir uma fácil integração ao sistema já existente.

A bateria de Lítio-Ion usada no projeto é composta por três células de 3,7 V à 2200 mAh com faixa de tensão útil para o projeto de 8.12 V à 11.1 V. Dentro desse contexto, realizamos testes de estresse para estimar a capacidade da bateria utilizada. O resultado exposto na Figura 31 apresenta um dos cenários de teste de estresse da bateria com o sistema por completo. Foram usados os seguintes parâmetros para teste:

- Envio de mensagem de medição a cada 2 h e envio de mensagem de manutenção a cada 10 minutos;
- Alimentação somente da bateria de 11.1 V;
- Teste até a descarga total da bateria..

Figura 31 – Curva de descarga da bateria.



Fonte: Autoria própria

4.1.2 Construção do dispositivo de telemetria

Durante a etapa de construção do dispositivo, o *hardware* foi construído conforme o diagrama esquemático e *layout* elaborados previamente. Após a construção do *hardware* e a adição dos sensores, foram realizados os testes iniciais para verificar o correto funcionamento do dispositivo. Testes de conectividade, verificação das medições dos sensores e avaliação da resposta do sistema. As Figuras 32 e 33 apresentam a disposição final de placa de circuito impresso e sondas de medição.

Figura 32 – Placa de circuito impresso construída.



Fonte: Autoria própria

Figura 33 – Disposição das sondas de medição de parâmetros de qualidade de água.



Fonte: Autoria própria

4.2 ADVERSIDADES ENFRENTADAS NO PROCESSO DE CONSTRUÇÃO

No processo de montagem do dispositivo foram enfrentados alguns contratemplos que demandaram ações para a continuidade da avaliação do funcionamento do sistema.

O principal problema enfrentado ocorreu com a sonda de medição de oxigênio dissolvido. Durante a montagem, constatou-se que o sensor apresentou danos físicos, possivelmente decorrentes de manuseio inadequado. Devido a esta situação não foi possível fazer medições do parâmetro em questão durante a implementação do sistema.

Em razão da ausência da sonda de oxigênio dissolvido, a funcionalidade de detecção de anomalia de medição foi afetada, acarretando o funcionamento constante em regime de anomalia.

Como resultado, as medições de parâmetros de qualidade de água registradas não incluirão o indicador de oxigênio dissolvido, além de não apresentar uma análise do sistema de detecção de anomalias.

4.3 ANÁLISE DE SÉRIE HISTÓRICA

Durante o período de desenvolvimento do sistema de telemetria, uma série histórica de medições foi realizada nas águas do Rio Solimões de Parintins. Esta série histórica foi construída no período de fevereiro a novembro de 2022 com a utilização de equipamentos de medição padrões para coleta de dados físico-químicos de água. Esta seção se propõe a avaliar e comparar os resultados obtidos pelo dispositivo desenvolvido com os dados previamente levantados. Essa análise permitirá uma avaliação precisa da eficácia e confiabilidade do dispositivo, além de fornecer informações valiosas para validação de sua utilidade na coleta contínua de dados de qualidade de água.

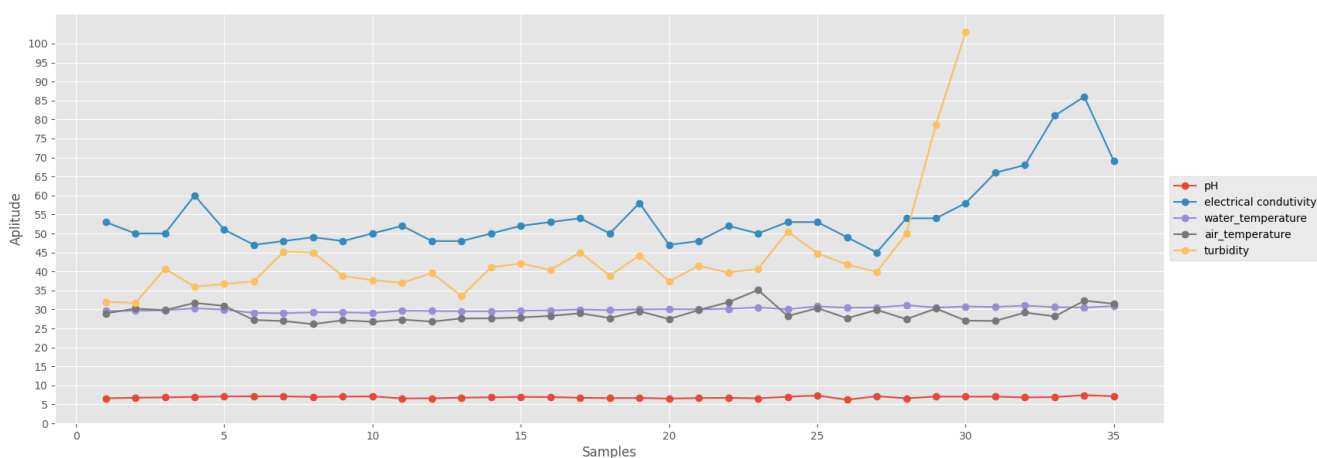
A série histórica dos parâmetros de qualidade de água levantada foi uma iniciativa do laboratório LabRios do Centro de Estudos Superiores de Parintins (CESP/UEA) para avaliação da variação dos parâmetros de qualidade de água durante o período de um ano. As coletas de água para a construção da série histórica eram feitas uma vez por dia em média, porém, vale ressaltar que esta taxa de amostragem não foi mantida durante todo o período de estudo dada a logística necessária para a realização da coleta. Portanto, durante o levantamento da série histórica são perceptíveis algumas lacunas de medição, mas que não prejudicam a informação coletada sobre o corpo hídrico.

O dispositivo de coleta foi posto em funcionamento em agosto de 2022 no braço do rio Solimões em Parintins, e permaneceu em operação até novembro de 2022. Nesse sentido, a Tabela 4 apresenta alguns dados estatísticos de cada parâmetro de qualidade de água registrados na série histórica referentes a este intervalo de tempo. Além disso, a partir dos dados da série histórica, foi possível plotar o gráfico exposto na Figura 34, que representa a variação sazonal dos parâmetros durante os quatro meses de estudo.

Tabela 4 – Dados estatísticos dos parâmetros de qualidade de água da série histórica.

Parâmetro	Média	Mediana	Variância	Desvio Padrão
pH	6,878	6,920	0,063	0,251
Condutividade elétrica	54,4	52,000	85,600	9,252
Temperatura da água	30,029	30,010	0,341	0,584
Temperatura do ar	28,885	28,26	3,987	1,997
Turbidez	43,697	40,55	194,059	13,931

Figura 34 – Variação sazonal dos parâmetros de qualidade de água de agosto à Novembro de 2022.

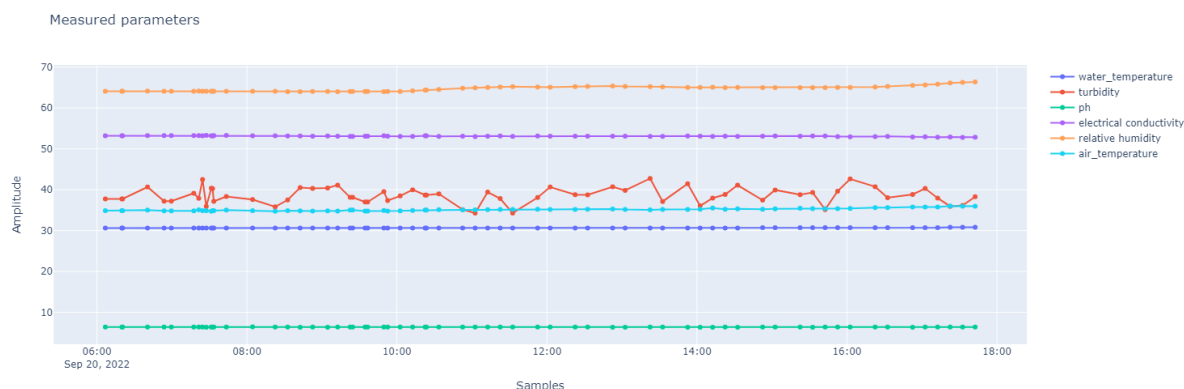


Fonte: Autoria própria

4.3.1 Análise dos parâmetros de qualidade de água coletados

Nesta seção, será apresentada uma análise estatística dos seguintes parâmetros coletados pH, turbidez, condutividade elétrica, temperatura da água, umidade relativa e temperatura do ar. Os dados de parâmetros de qualidade de água foram levantados durante o período de quatro meses com o dispositivo de medição à uma frequência de 10 amostras por dia. Dado o curto período de quatro meses para verificação do funcionamento do dispositivo desenvolvido não foi possível observar grandes variações sazonais nos parâmetros de qualidade de água avaliados. Dessa forma, os resultados obtidos consistiram em um reflexo da condição do Rio Solimões próximo ao período de final de ano. Dentro deste cenário, a Figura 35 representa um reflexo da variação média diária dos parâmetros medidos.

Figura 35 – Média diária de medições de parâmetros de qualidade de água.

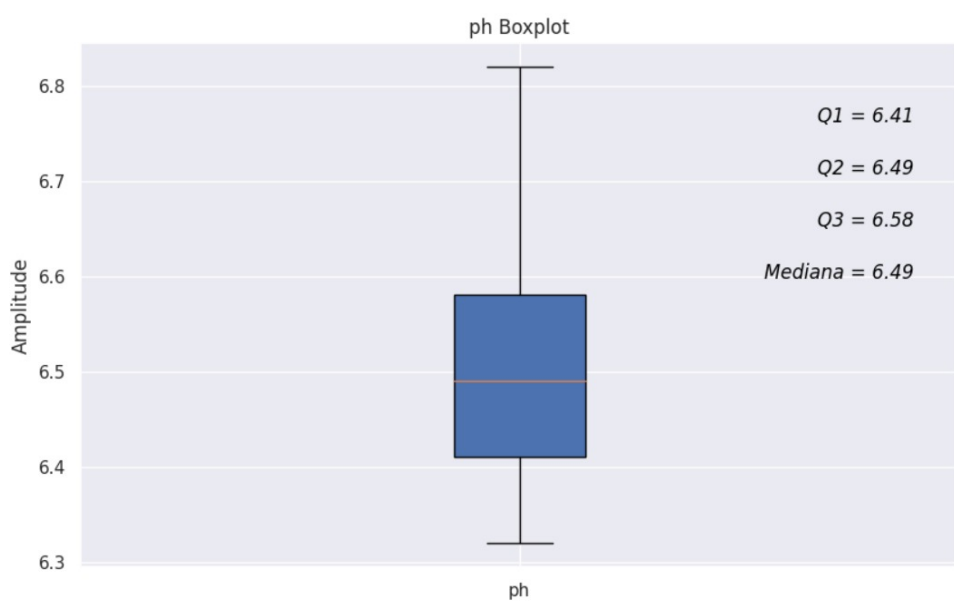


Fonte: Autoria própria

Conforme ilustrado na Figura 35, em um período de 12 horas é visto pouca alteração em cada indicador de qualidade de água, com exceção do indicador de turbidez, que mesmo apresentando uma flutuação maior que os demais parâmetros de qualidade de água, ainda se enquadra dentro da normalidade. Portanto, com a finalidade de examinar mais a fundo a assertividade das medições realizadas, dinâmica e comportamento de cada parâmetro de qualidade de água ao longo do tempo, foi feita a análise em *boxplot* dos dados levantados durante os quatro meses de avaliação.

4.3.1.1 pH

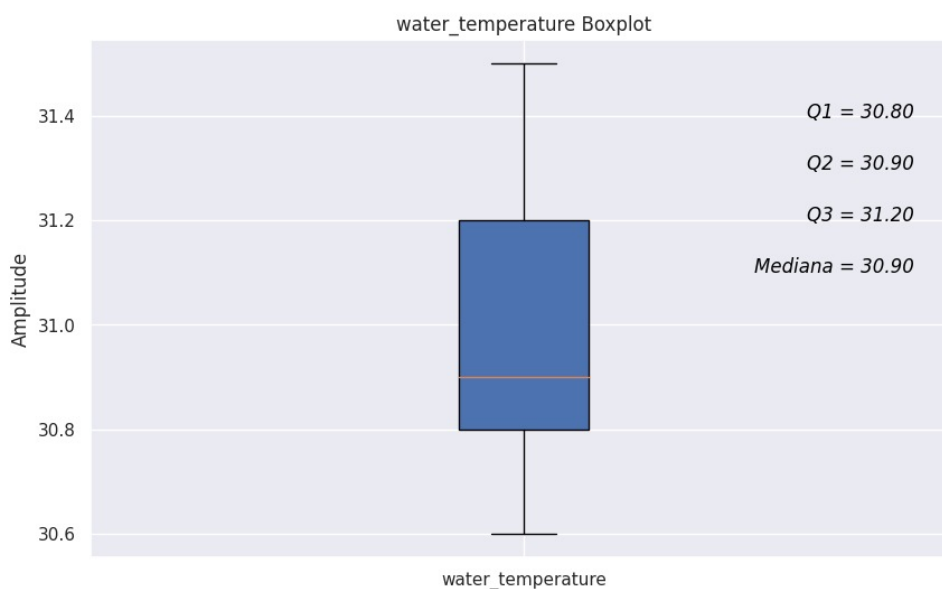
O pH é um importante indicador da acidez ou alcalinidade. O gráfico de *boxplot* na Figura 36 revela a distribuição dos dados ao longo dos quatro meses de medição. Observa-se uma faixa de valores de pH entre 6,4 e 6,6, o que denota a característica levemente ácida das águas do Rio Solimões.

Figura 36 – Gráfico de *boxplot* de pH.

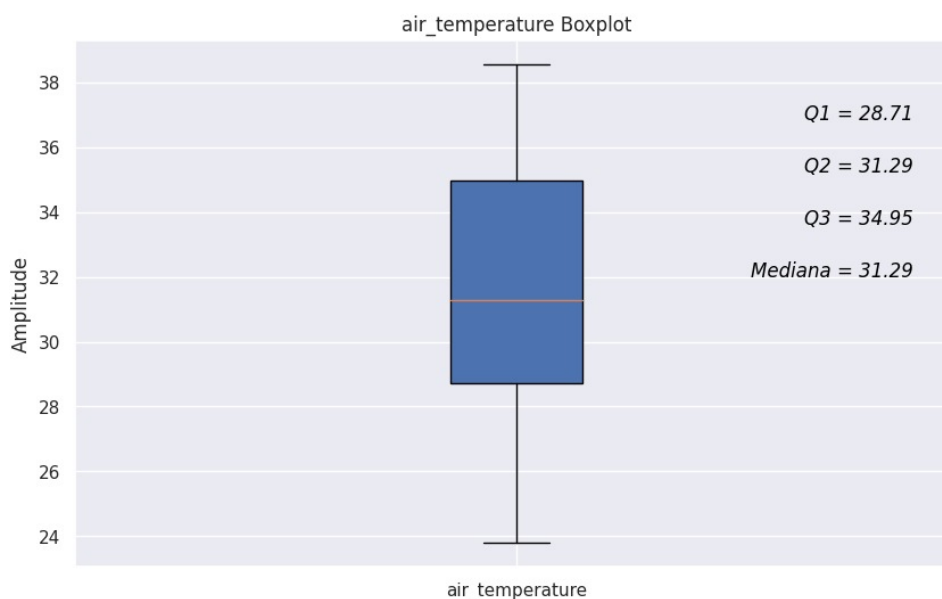
Fonte: Autoria própria

4.3.1.2 Temperatura da água e do ar

A temperatura da água é um fator ambiental crítico que afeta a vida aquática e as reações químicas na água, e se tratando da análise das condições superficiais da água de corpos hídricos, a temperatura do ar tem grande importância em representar a condição climática local. As Figuras 37 e 38 de ambos os indicadores mostram uma estabilidade da temperatura próximo em 30 °C em ambas as medições, porém é observado uma maior faixa de flutuação de pelo menos 5 °C em relação a temperatura da água.

Figura 37 – Gráfico de *boxplot* de temperatura da água.

Fonte: Autoria própria

Figura 38 – Gráfico de *boxplot* de temperatura do ar.

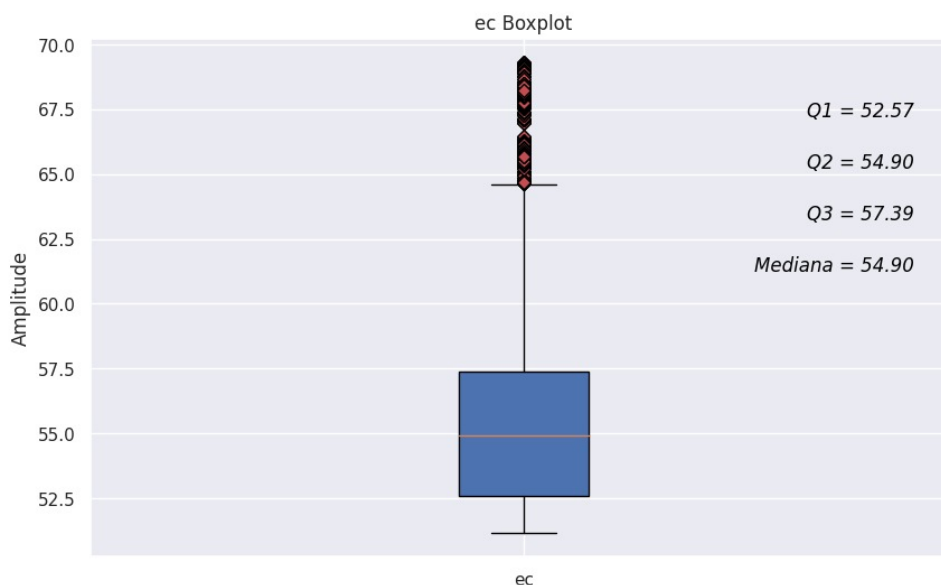
Fonte: Autoria própria

4.3.1.3 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é uma medida da capacidade da água de conduzir eletricidade, relacionada à presença de íons dissolvidos. O gráfico de *boxplot* apresentado na Figura 39 revela a distribuição de dados de condutividade elétrica dentro da faixa de 52,57 s/m à 57,39 s/m, no entanto também é notado a presença expressiva de *outliers* a partir de 65 s/m. A presença de *outliers* acima dos valores médios de condutividade elétrica pode ser resultado de diversos fatores,

tais como substâncias dissolvidas na água, como sais minerais, produtos químicos ou poluentes, que podem repentinamente aumentar a condutividade elétrica e resultar em valores fora do padrão ou mesmo desgaste do equipamento de medição durante o período de funcionamento. Considerando que o sistema de medição permaneceu hospedado em região portuária, é possível que a variação nos valores de condutividade elétrica tenham sido provocadas por resíduos de embarcação ou sedimentos dispersos na água.

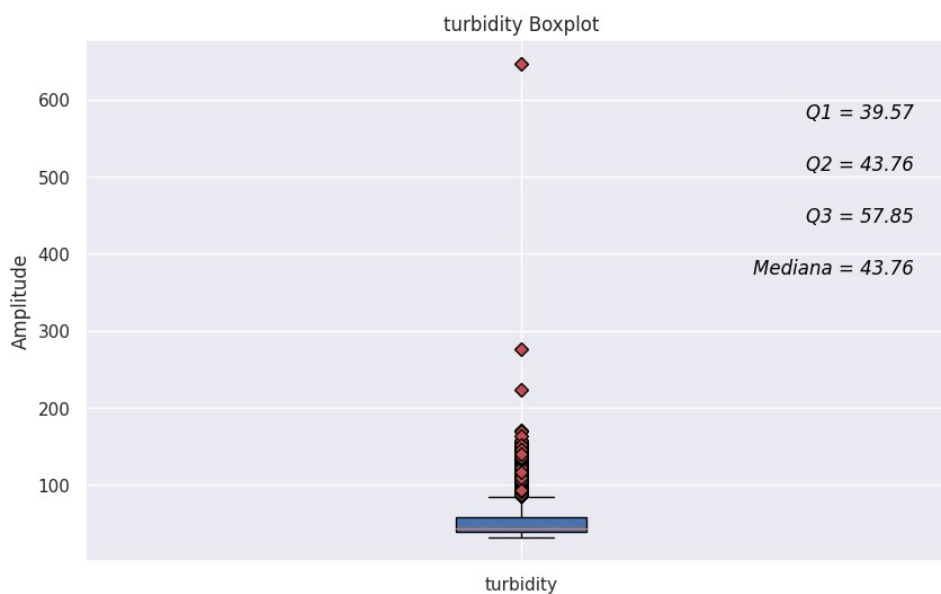
Figura 39 – Gráfico de *boxplot* da condutividade elétrica da água.



Fonte: Autoria própria

4.3.1.4 Turbidez

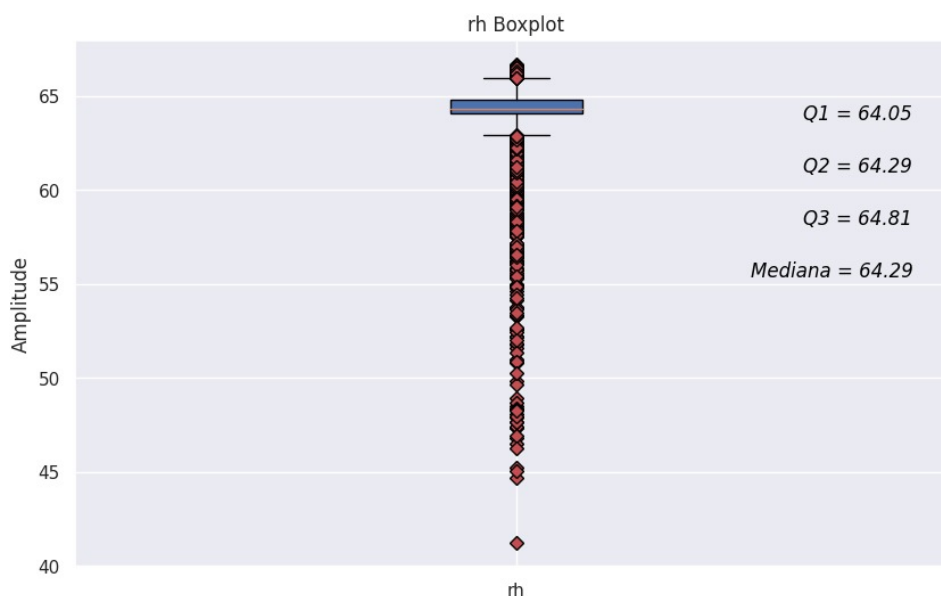
A turbidez é uma medida da quantidade de partículas sólidas em suspensão na água. Conforme o gráfico de *boxplot* exposto na Figura 40, a turbidez registrada no período de medição ficou na faixa de 39 NTU à 57 NTU, mas também com uma parcela de *outliers* acima dos valores mais estáveis. Durante o período de operação do dispositivo de medição de qualidade de água, foi comum o acúmulo de resíduos sólidos e algas nas lentes do sensor de turbidez, o que poderia ser uma justificativa para os valores mais elevados de turbidez.

Figura 40 – Gráfico de *boxplot* da turbidez.

Fonte: Autoria própria

4.3.1.5 Umidade relativa

A umidade relativa é uma medida da quantidade de vapor de água presente no ar em relação à capacidade máxima de retenção do ar. A medição de umidade relativa é feita em porcentagem e por meio da Figura 41 é possível observar que a umidade relativa se manteve em média na faixa de 64%, mas com diversos *outliers* em porcentagem mais baixas, o que pode indicar variações climáticas no local de estudo, como aumento de ventilação e elevação da temperatura do ar.

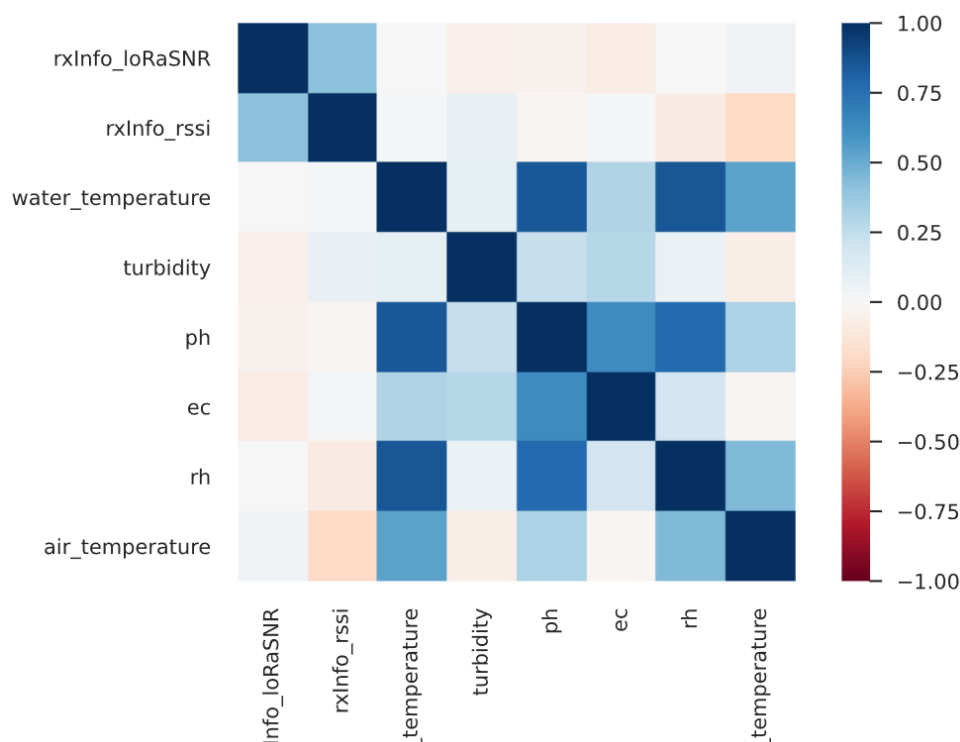
Figura 41 – Gráfico de *boxplot* da umidade relativa.

Fonte: Autoria própria

4.3.1.6 Análise de coeficiente de correlação *Pearson*.

Com o objetivo de compreender as relações lineares entre dados coletados pelo dispositivo durante os quatro meses de operação, foi realizada uma análise de correlação dos parâmetros de qualidade através do coeficiente de correlação de *Pearson*. A análise de correlação de *Pearson* é uma medida de associação linear entre variáveis quantitativas (PARANHOS et al., 2014). Essa análise permite identificar a direção da correlação entre as variáveis analisadas, sejam relações positivas, em que as variáveis variam no mesmo sentido, ou negativas, em que as variáveis em sentido inverso. O coeficiente de correlação de *Pearson* varia entre -1 e +1, os quais denotam correlação forte, enquanto que valores próximos a zero indicam correlação fraca ou ausência de correlação.

Com a aplicação da análise de correlação de *Pearson* aos dados de parâmetros de qualidade de água coletados, foi construído o gráfico da Figura 42 que ilustra as relações entre as variáveis de qualidade de água e qualidade de comunicação. Essa análise permitiu uma compreensão mais abrangente dos padrões e das interdependências existentes entre as características físico-químicas das águas do Rio Solimões.

Figura 42 – Mapa de calor da correlação de *Pearson* para os parâmetros medidos.

Fonte: Autoria própria

Tabela 5 – Índices de correlação de *Pearson*.

	SNR	RSSI	Temp. Água	Turbidez	pH	CE	UR	Temp. ar
SNR	1.000	0.406	-0.000	-0.048	-0.044	-0.076	-0.004	0.033
RSSI	0.406	1.000	0.020	0.075	-0.019	0.010	-0.082	-0.198
Temp. Água	-0.000	0.020	1.000	0.086	0.850	0.300	0.857	0.539
Turbidez	-0.048	0.075	0.086	1.000	0.227	0.283	0.064	-0.069
pH	-0.044	-0.019	0.850	0.227	1.000	0.629	0.775	0.320
CE	-0.076	0.010	0.300	0.283	0.629	1.000	0.192	-0.018
UR	-0.004	-0.082	0.857	0.064	0.775	0.192	1.000	0.444
Temp. Ar	0.033	-0.198	0.539	-0.069	0.320	-0.018	0.444	1.000

Por meio do gráfico da Figura 42 e Tabela 5 fica evidente algumas correlações entre os parâmetros de qualidade de água registrados, que embora não caracterizem relações diretas entre cada indicador de qualidade de água, evidenciam alguns aspectos físico-químicos relevantes compartilhados entre parâmetros medidos.

Uma das correlações mais perceptíveis é a do pH com a temperatura da água, com uma correlação positiva com valor de +0,85, conforme visto na Tabela 5. Normalmente a correlação entre temperatura da água e pH é negativa, dado que o aumento de temperatura tende a reduzir o pH, tornando a água mais ácida. Isso ocorre porque o aumento da temperatura pode acelerar reações químicas que liberam dióxido de carbono (CO_2) que formam o ácido carbônico (H_2CO_3), o qual contribui para a diminuição do pH da água. Logo, a correlação positiva vista na Figura 42

pode indicar a contribuição de outros fatores na relação entre ambos os parâmetros, uma vez que a mesma não se trata de uma relação direta.

Outra correlação evidente é a do pH com a condutividade elétrica com um valor de +0,629. A condutividade elétrica é uma medida da capacidade da água conduzir eletricidade de acordo com os íons dissolvidos. Em geral, não é esperado uma associação direta entre a concentração de íons na água e seu pH. No entanto, é importante mencionar que existem situações em que a correlação positiva entre ambos os parâmetros pode ser justificada. Por exemplo, em águas com um teor mais expressivo de sais dissolvidos, como em águas salinas, que influenciam o pH. Porém, as águas do Rio Solimões apresentam características diferentes, são mais ricas em sólidos em suspensão, o que dificulta a condutividade elétrica em diversas ocasiões. Como as grandezas de pH e condutividade elétrica não são diretamente relacionadas, é visto a necessidade de uma análise mais aprofundada sobre os demais fatores influentes sobre os parâmetros, para uma correta interpretação do resultado visto na Figura 42 e Tabela 5.

Uma outra informação a se destacar da Figura 42 e Tabela 5 é a correlação entre temperatura da água e umidade relativa com um valor de +0.857. A temperatura da água pode afetar a taxa de evaporação e conseqüentemente a umidade relativa do ar ao redor. Águas com temperatura mais elevadas podem aumentar a evaporação, o que pode levar a uma umidade relativa mais alta na proximidade da superfície da água. A partir da correlação positiva forte entre os parâmetros é possível confirmar este comportamento.

Com relação ao parâmetro de turbidez, não foi possível extrair resultados mais significativos por conta de adversidades enfrentadas durante o processo de coleta de parâmetros de qualidade de água, tais como acúmulo de sedimento e florescimento de algas nas pontas de prova dos sensores. Dentre as sondas de medição, a mais afetada foi a sonda de turbidez por conta de seu sensoriamento óptico, em razão destas adversidades enfrentadas, foram necessárias operações de manutenção frequentes para limpeza das lentes do sensor, o que resultou em alguns períodos com o sensor fora de operação ou com valor medido influenciado pela obstrução da lente de medição.

Ao comparar os dados coletados através do dispositivo de monitoramento de parâmetros de qualidade de água com os resultados da série histórica presentes na Tabela 4, observa-se uma concordância entre os valores médios dos indicadores avaliados. Esses resultados indicam que o dispositivo de medição alcançou bem concordantes com aqueles obtidos por meio da abordagem convencional de análise de água. Contudo, destaca-se que houve uma divergência significativa entre as medições de temperatura do ar através do dispositivo de medição que apresentou um valor médio por volta de 31 °C enquanto que através da série histórica, o valor de temperatura do ar registrado foi de aproximadamente 29 °C. A diferença neste parâmetro pode ser atribuída a localização do sensor durante a coleta. Enquanto o sensor do dispositivo manteve-se fixo a uma altura de aproximadamente 3 metros acima do nível da água, os sensores utilizados pelos profissionais nas coletas presenciais da série histórica tinham a liberdade de

posicionar os sensores conforme as necessidades da medição, o que poderia gerar a divergência observadas entre as medições.

Quanto aos parâmetros SNR (relação sinal-ruído) e RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) presentes na Figura 42 são observadas relações positivas moderadas entre ambos os indicadores, o que sugere uma melhora na relação sinal ruído associada ao aumento do RSSI e vice-versa. No entanto, é importante ressaltar que a correlação não implica em proporcionalidade ou causalidade. Trata-se de uma relação fruto de um resultado estatístico que ilustra as condições de uma comunicação digital, e não uma relação direta entre ambos os parâmetros de qualidade de sinal.

4.3.2 Análise da qualidade da comunicação em LoRaWAN

Durante o período de funcionamento do dispositivo de medição foi possível registrar alguns indicadores das condições da comunicação LoRa entre o dispositivo de medição e *gateway*. São eles: relação sinal-ruído SNR e RSSI.

A SNR é uma medida que compara a potência do sinal desejado à potência do ruído presente no ambiente. Em sistemas de comunicação, uma relação sinal-ruído proeminente indica uma melhor qualidade do sinal, com menor interferência de ruídos. Durante a coleta de dados do funcionamento do dispositivo de medição, foi possível fazer um levantamento da variação deste indicador, que pode ser conferida na Figura 43. Os dados levantados apresentam uma média de SNR de 11,59, o que sugere uma boa relação sinal-ruído e uma potência significativamente maior em relação ao ruído presente no ambiente. O que se mostra como um indicativo de uma qualidade robusta e confiável.

Figura 43 – Histograma de SNR.

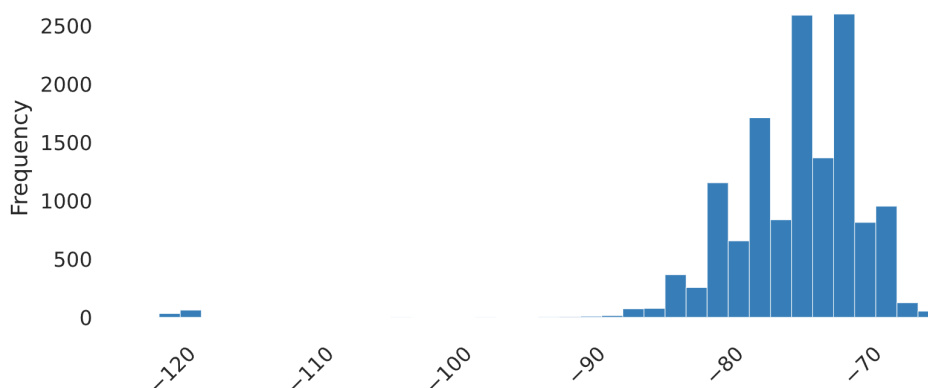


Fonte: Autoria própria

O indicador de intensidade do sinal recebido RSSI, mede a potência do sinal recebido em um determinado ponto. O RSSI é expresso em dBm e fornece uma indicação sobre o nível de potência do sinal recebido pelo receptor. Em relação ao RSSI computado, obteve-se uma média de -75 dBm, o que indica que uma boa relação sinal-ruído e em acordo com os resultados obtidos

de SNR, caracteriza um sinal com potência significativamente maior em relação ao ruído presente no ambiente. Durante o processo de desenvolvimento do dispositivo de hardware foi considerada visada direta entre o dispositivo de coleta e o *gateway*. A visada refere-se à condição de que não há obstáculos significativos, como prédios ou barreiras físicas que bloqueando a comunicação entre o *End-Node* e *gateway* LoRaWAN. Para a avaliação da qualidade de comunicação em ambiente de visada direta, variamos a distância entre o dispositivo e *gateway* LoRaWAN. Essa análise permitiu a análise de algumas métricas relevantes, tais como, taxa de perda de pacotes e intensidade de sinal recebido. Os resultado. Foi observado perda de pacotes em faixas de RSSI menores que -110 dBm em distâncias superiores à 500 m, e portanto, foi estabelecido o critério um para garantir qualidade de comunicação de uma distribuição do cenário de coleta parâmetro de qualidade de água, por meio de uma tolerância -95 dBm para o RSSI. Dentro do cenário de implementação do sistema de coleta, a distância entre o dispositivo e *gateway* LoRaWAN se deu por volta de 100 m, e conforme exposto na Figura 44 o indicador de RSSI teve um espalhamento maior na faixa entre -70 dBm e -90 dBm, confirmando uma comunicação estável.

Figura 44 – Histograma de RSSI.



Fonte: Autoria própria

É importante ressaltar que não foi ativado ADR (*Adaptive Data Rate*) para a adaptação de *Spreading Factor* do sinal transmitido. O ADR é um mecanismo presente no protocolo LoRaWAN que permite que o *End-Node* e a rede LoRaWAN ajustem o *Spreading Factor* com base nas condições da comunicação. Ao ativar o ADR, a rede LoRaWAN monitora os parâmetros de comunicação, como RSSI, SNR entre outros. Baseado nestes indicadores, a rede define dinamicamente o *Spreading Factor* mais adequado para otimizar a eficiência da comunicação e garantir uma melhor taxa de entrega de pacotes e economia de energia para o dispositivo.

No caso em questão, como o ADR não foi ativado e o valor do *Spreading Factor* foi configurado para 7, a variação observada nos indicadores RSSI e SNR pode ser atribuída a influências externas.

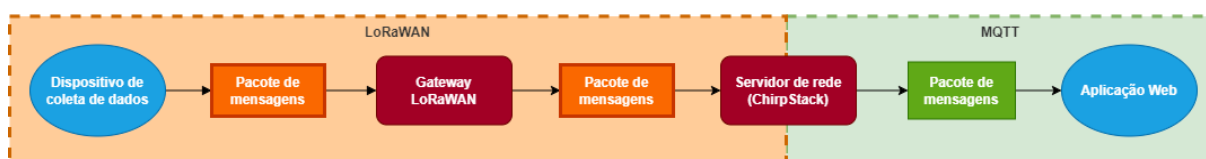
4.3.3 Visualização de dados

Os dados coletados pelo dispositivo de telemetria são encapsulados em um pacote de mensagens LoRa composto pelas medições das sondas de qualidade de água, marcação temporal registrada pelo relógio RTC presente no *hardware* do dispositivo e modo de operação do sistema, seja o modo normal ou de detecção de anomalia.

O pacote de mensagem é então transmitido para um *gateway* LoRaWAN, que por sua vez, encaminha os pacotes de mensagens para o servidor de rede *ChirpStack* (CHIRPSTACK, 2023). O *ChirpStack* é uma plataforma de código aberto com a proposta de servir como um servidor de rede para dispositivos IoT baseados no protocolo LoRaWAN.

A interface de comunicação entre o *ChirpStack* e o servidor de aplicação é feita por meio do protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). MQTT é um protocolo baseado no padrão de comunicação *Publisher/Subscriber*, com publicadores e receptores de informação intermediadas por um servidor reservado para a comunicação, o *Broker* MQTT. Este protocolo é usado tipicamente em aplicações IoT por sua natureza simples e leve em comparação com demais protocolos de transferência de dados por meio da *internet*. Nesse contexto, o *Backend*, a parcela da aplicação *web* encarregada pelo processamento e armazenamento de dados, é responsável por recepcionar os pacotes MQTT compartilhados pelo *ChirpStack*, e dessa forma, fornecer uma API (*Application Programming Interface*) para que a camada da aplicação *web* responsável pela apresentação de dados e interação com o usuário, o *Frontend*, possa exibir corretamente o que foi transmitido pelo dispositivo de coleta de parâmetros de qualidade de água. Dessa forma, o trajeto percorrido pelo pacote de dados se dá conforme a Figura 45.

Figura 45 – Trajeto percorrido pelo pacote de mensagens do dispositivo de coleta até a aplicação *web*.



Fonte: Autoria própria

A aplicação *web* foi pensada para expor tanto os dados relativos ao último pacote de mensagens recebidos pelo servidor de aplicação quanto um breve histórico da evolução de um parâmetro escolhido dentro de um certo tempo, conforme apresentado na Figura 46. Além disso, o site possibilita que o usuário possa baixar um arquivo CSV contendo todas as medições de parâmetros de qualidade de água realizados durante um período de tempo selecionado pelo usuário.

Figura 46 – Plataforma de visualização dos parâmetros de qualidade de água coletados.



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

A implementação do sistema de telemetria apresentou uma alternativa automatizada para coleta e compartilhamento de parâmetros de qualidade de águas fluviais com a finalidade de enriquecer o processo de análise química e biológica da água de uma região, além de reduzir ou eliminar a necessidade de intervenção humana na coleta de amostras de água.

Através da integração de uma rede de comunicação LoRaWAN e um grupo de sensores de qualidade de água, foi possível obter medições precisas e contínuas dos parâmetros de pH, turbidez, condutividade elétrica, temperatura da água, temperatura do ar e umidade relativa. Essa abordagem visa propor uma solução inovadora para o método de análise de água tradicional.

Ao longo do período de operação do sistema de monitoramento de qualidade água, foram obtidos dados significativos, o que possibilitou a comparação com os dados coletados manualmente durante a série histórica do laboratório LabRios, e dessa forma agregou validade para os dados coletados pelo dispositivo de monitoramento e trouxe relevância para o desenvolvimento do projeto. Embora o tempo de funcionamento do dispositivo tenha sido limitado e tenham sido observadas poucas variações, as medições contínuas e automáticas forneceram informações importantes para análise.

A partir dos resultados obtidos foi possível observar importantes correlações entre os parâmetros de qualidade de água, que possuem uma grande relevância para análise química e biológica da qualidade da água com o fornecimento de uma visão abrangente da saúde geral do corpo hídrico ou detectando possíveis influências na mudança das características da água local. Essas correlações puderam ser levantadas e investigadas devido a continuidade de medições realizadas e quantidade de amostras coletadas, o que contribui para a identificação de padrões e comportamentos que seriam mais difíceis de serem observados com amostragens manuais esporádicas. Nesse contexto, é possível comprovar a viabilidade do sistema desenvolvido para utilização em pesquisas laboratoriais.

É importante ressaltar que, apesar dos resultados positivos obtidos, o sistema de telemetria apresenta espaço para aprimoramentos futuros. A inclusão de novos sensores, para medição de indicadores como ORP (*Oxidation-Reduction Potential*), salinidade ou sólidos totais dissolvidos que são comumente medidos em análise de água. A expansão da rede de sensores poderia contribuir para análise com uma visão mais abrangente da qualidade de água.

REFERÊNCIAS

- ALLIANCE, L. *About LoRa Alliance®*. 2023. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/about-lora-alliance/>>.
- ANA, A. N. de Águas. *Qualidade da água*. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/qualidade-da-agua>>.
- AYOUB, W. et al. Internet of mobile things: Overview of lorawan, dash7, and nb-iot in lpwans standards and supported mobility. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 21, n. 2, p. 1561–1581, 2018.
- BEEBY, S. P. et al. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *Journal of Micromechanics and microengineering*, IOP Publishing, v. 17, n. 7, p. 1257, 2007.
- BEHMEL, S. et al. Water quality monitoring strategies—a review and future perspectives. *Science of the Total Environment*, Elsevier, v. 571, p. 1312–1329, 2016.
- BOUGUERA, T. et al. Energy consumption model for sensor nodes based on lora and lorawan. *Sensors*, MDPI, v. 18, n. 7, p. 2104, 2018.
- CARDEN, F.; JEDLICKA, R. P.; HENRY, R. *Telemetry systems engineering*. [S.l.]: Artech House, 2002.
- CASTELLS-RUFAS, D.; GALIN-PONS, A.; CARRABINA, J. The regulation of unlicensed sub-ghz bands: Are stronger restrictions required for lpwan-based iot success? *arXiv preprint arXiv:1812.00031*, 2018.
- CENTENARO, M. et al. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the iot and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016.
- CHIRPSTACK. *ChirpStack, open-source LoRaWAN® Network Server*. 2023. Disponível em: [urlhttps://www.chirpstack.io/](https://www.chirpstack.io/). Acesso em: 04 Agosto 2023.
- DERISIO, J. C. *Introdução ao controle de poluição ambiental*. [S.l.]: Oficina de textos, 2016.
- DESIGNER, A. *Owerview*. 2023. Disponível em: [urlhttps://www.altium.com/altium-designer](https://www.altium.com/altium-designer). Acesso em: 13 Julho 2023.
- DEVALAL, S.; KARTHIKEYAN, A. Lora technology-an overview. In: IEEE. *2018 second international conference on electronics, communication and aerospace technology (ICECA)*. [S.l.], 2018. p. 284–290.
- DEVICES, A. *LTC4121 Overview*. 2023. Disponível em: [urlhttps://www.analog.com/en/products/ltc4121.html#product-overview](https://www.analog.com/en/products/ltc4121.html#product-overview). Acesso em: 21 Julho 2023.
- FAROOQ, M. U. et al. A review on internet of things (iot). *International journal of computer applications*, Foundation of Computer Science, v. 113, n. 1, p. 1–7, 2015.
- FOROUZAN, B. A. *Comunicação de dados e redes de computadores*. [S.l.]: AMGH Editora, 2009.
- GOKHALE, P.; BHAT, O.; BHAT, S. Introduction to iot. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, v. 5, n. 1, p. 41–44, 2018.

- HARB, A. Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 36, n. 10, p. 2641–2654, 2011.
- INSTRUMENT, B. *This is BOQU Instrument*. 2022. Disponível em: [urlhttps://www.boquinstrument.com/about-us](https://www.boquinstrument.com/about-us). Acesso em: 28 Outubro 2022.
- KAZMIERSKI, T. J.; BEEBY, S. Energy harvesting systems. *Principles, Modeling and Applications; Springer Science+ Business Media LLC: New York, NY, USA*, Springer, 2011.
- KIM, D.-H.; LEE, E.-K.; KIM, J. Experiencing lora network establishment on a smart energy campus testbed. *Sustainability*, MDPI, v. 11, n. 7, p. 1917, 2019.
- LIYA, M.; ARJUN, D. A survey of lpwan technology in agricultural field. In: IEEE. *2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC)*. [S.l.], 2020. p. 313–317.
- MADAKAM, S. et al. Internet of things (iot): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, Scientific Research Publishing, v. 3, n. 05, p. 164, 2015.
- NOREEN, U.; BOUNCEUR, A.; CLAVIER, L. A study of lora low power and wide area network technology. In: IEEE. *2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*. [S.l.], 2017. p. 1–6.
- NOURA, H. et al. Lorawan security survey: Issues, threats and possible mitigation techniques. *Internet of Things*, Elsevier, v. 12, p. 100303, 2020.
- PARANHOS, R. et al. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de pearson: o retorno. *Leviathan (São Paulo)*, n. 8, p. 66–95, 2014.
- RANGE, W. S. M. et al. *Telemetry applications handbook*. 2006.
- RAYCHOWDHURY, A.; PRAMANIK, A. Survey on lora technology: solution for internet of things. *Intelligent Systems, Technologies and Applications: Proceedings of Fifth ISTA 2019, India*, Springer, p. 259–271, 2020.
- RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. *ieee communications surveys & tutorials*, IEEE, v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017.
- RODRÍGUEZ, J. La cuestión ambiental desde una visión sistémica. *Revista ideas ambientales*, v. 2, p. 1–35, 2009.
- SANTOS, M. V. d. et al. Análise da qualidade da água do igarapé do banheiro no município de humaitá-am. Brasil, 2019.
- SANTOS, N. S. G. d.; CUNHA, M. W. R. d. Análise de redes lorawan: desempenho indoor, outdoor, híbrido, aplicações e simulações utilizando ns3. 2019.
- SCHNEIDER, J. A. Simulação e avaliação da qualidade da água em rios: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio forqueta, rs. 2017.
- SEMTECH. *Company, Semtech Corporation*. 2023. Disponível em: <https://www.semtech.com/company>.
- SINGH, R. K. et al. Energy consumption analysis of lpwan technologies and lifetime estimation for iot application. *Sensors*, MDPI, v. 20, n. 17, p. 4794, 2020.

STMICROELECTRONICS, L. *STM32WL Series*. 2023. Disponível em: <<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32wl-series.html>>.

TANENBAUM, A. S. *Computer networks*. [S.l.]: Pearson Education India, 2003.

TREVISAN, A. B. et al. Estudos e modelagem da qualidade da água do rio papaquara. 2012.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. *A Água*. São Carlos: Rima Editora, 2020.

VERMA, H. *Telemetry Basics*. Greater Noida, India: School of Engineering and Technology, Sharda University, 2017.