



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

PAULO RENATO XAVIER DA SILVA

**APLICAÇÃO DE REDES DE SENSORES SEM FIO BASEADA EM
NUVEM PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA**

**FORTALEZA
2018**

PAULO RENATO XAVIER DA SILVA

APLICAÇÃO DE REDES DE SENSORES SEM FIO
BASEADA EM NUVEM PARA MONITORAMENTO DA
QUALIDADE DA ÁGUA

Dissertação submetida à
Coordenação de Pós-Graduação
em Engenharia de Telecomunicações
do Instituto Federal do Ceará, como
requisito parcial para obtenção do
grau de Mestre em Engenharia de
Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de
Telecomunicação

Orientador: Prof. Dr. José Wally
Mendonça Menezes

Fortaleza
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Instituto Federal do Ceará - IFCE

Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

XAVIER DA SILVA, PAULO RENATO.

APLICAÇÃO DE REDES DE SENSORES SEM FIO BASEADA EM NUVEM PARA
MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA / PAULO RENATO XAVIER DA SILVA. -
2018.

122 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de
Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Internet das Coisas. 3. Monitoramento de qualidade da
água. 4. ZigBee. 5. Plataforma Losant. I. Título.

CDD 621.382



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

PAULO RENATO XAVIER DA SILVA

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações, sendo aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora:

Prof. Dr. JOSÉ WALLY MENDONÇA MENEZES (Orientador)

Prof. Dr. GLENDO DE FREITAS GUIMARÃES (IFCE)

Prof. Dr. DANIEL XAVIER GOUVEIA (IFCE)

Prof. Dr. FRANCISCO JOSÉ ALVES DE AQUINO (IFCE)

Prof. Dr. FRANCISCO NIVALDO AGUIAR FREIRE (UFC)

Prof. Dr. AMINADABE BARBOSA DE SOUSA (CENTRO UNIVERSITÁRIO ESTÁCIO DO CEARÁ)

Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino
Coordenador do PPGET
IFCE - Campus Fortaleza

Aos meus amores Miguel e Iara.

Agradecimentos

Aos meus pais, Ana e Francimar, por terem me ensinado os valores que carrego comigo.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, pela qualidade do ensino público e gratuito.

Ao professor Dr. José Wally Mendonça Menezes, pela orientação, paciência e enriquecimento do meu conhecimento;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações.

Aos colegas do PPGET, pelo companheirismo nas horas de estudo e de descontração.

À professora Joélia Marques e aos técnicos do Laboratório de Petroquímica do IFCE, *campus* Caucaia pela disponibilidade, paciência e conhecimento oferecido para realização dos testes.

Ao professor Marcos Erick pelas valiosas contribuições na qualificação deste trabalho.

Aos professores, Daniel Xavier, Francisco José, Glendo de Freitas, Francisco Nivaldo e Aminadabe Barbosa e suas considerações sobre o trabalho que me ajudaram a ter uma visão mais precisa do fazer ciência.

Ao professor Jorge Fredericson e demais colegas do Laboratório do GDeste que me auxiliaram com conhecimento, e na construção do trabalho.

Ao professor Clauson Rios, um bom amigo que me socorreu com a confecção de gráficos na finalização do trabalho.

Ao professor Fernando Parente pela orientações nos testes com a redes de sensores e pela paciência e disponibilidade de compartilhar o seu conhecimento.

À Iara, minha esposa, por encontrar nela, além do amor, a minha base sólida, minha companheira e bússola em momentos de cansaço e confusão.

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

Resumo

Este trabalho apresenta um sistema de monitoramento de qualidade da água baseado em conceitos de redes de sensores sem fio e *Internet* das coisas. Para tanto, foram utilizados componentes de mercado na tentativa de obter um menor custo possível. A transmissão e redistribuição dos dados obtidos foram feitas através do protocolo *ZigBee* e do serviço *Losant*[®]. O sistema foi projetado para medir pH, OD, *ORP*, condutividade, temperatura e turbidez, tendo sua conformidade aferida com equipamentos de laboratório equivalentes. O protótipo inicial apresentou um custo 39% menor do que a solução proprietária da *Libelium*[®]. O comportamento de comunicação de dados da rede local esteve dentro do esperado para um ambiente urbano. Apesar do consumo de energia médio calculado ter sido de 115 mA, notou-se ser possível reduzi-lo quase oito vezes. A implantação do sistema em campo permitiu a tomada de medições da água de um poço e da distribuidora de água local. Desta maneira, concluímos que o sistema é adequado para o monitoramento de corpos d'água, de forma a auxiliar o modelo atual baseado em laboratório. Os dados gerados agregariam informações sobre os diversos sistema aquáticos, possibilitando inferências sobre a qualidade atual e uma previsão de comportamento.

Palavras-chave: Monitoramento de qualidade da água, RSSF, IoT, Protocolo ZigBee, Plataforma Losant.

Abstract

This work presents a water quality monitoring system based on wireless sensor networks and Internet of things concepts. For this purpose, off-the-shelf components were used in an attempt to obtain the lowest possible cost. The data transmission and redistribution were done through the ZigBee protocol and the Losant[®] service. The system is designed to measure pH, OD, ORP, conductivity, temperature and turbidity, and its accuracy was measured with equivalent laboratory equipment. The initial prototype presented a cost 39% lower than the proprietary solution of Libelium[®]. The behavior of the local network data communication was within the expected for an urban environment. Although the calculated average energy consumption was 115 mA, it was noted that it was possible to reduce it almost eight times. The field implementation of the system allowed the measurement of water from a well and the local water distributor. In this way, we conclude that the system is suitable for the monitoring of water bodies, in order to assist the current model based on the laboratory. The data generated would aggregate information about the various aquatic systems, allowing inferences about the current quality and a prediction of behavior.

Keywords: Water quality monitoring, WSN, IoT, ZigBee Protocol, Losant Platform.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

Lista de Abreviações

1	Introdução	18
1.1	Objetivo	19
1.1.1	Objetivos Específicos	19
1.2	Contribuições e Produção Científica	20
1.3	Organização da dissertação	20
2	Qualidade da água	22
2.1	Parâmetros de Qualidade da Água	22
2.1.1	pH	22
2.1.2	Potencial de Oxirredução	24
2.1.3	Condutividade, sólidos totais dissolvidos e salinidade	25
2.1.4	Oxigênio Dissolvido	26
2.1.5	Turbidez	28
2.1.6	Temperatura	29
2.2	Índice de Qualidade da Água	30
2.3	Legislação	31

2.4	Conclusões	36
3	Fundamentação Teórica	37
3.1	Monitoramento de Qualidade de Água	37
3.2	RSSF e IoT	41
3.3	Tecnologias de Telemetria	43
3.4	Trabalhos Relacionados	46
4	Materiais e Métodos	50
4.1	Módulo de Coleta de Dados	51
4.1.1	Sensor de Oxigênio Dissolvido	51
4.1.2	Sensor de Potencial de Oxirredução	52
4.1.3	Sensor de Potencial Hidrogeniônico	53
4.1.4	Sensor de Condutividade	53
4.1.5	Sonda de Temperatura	54
4.1.6	Sensor de Turbidez	55
4.2	Módulo de Suprimento de Energia	56
4.2.1	Módulo fotovoltaico	56
4.2.2	Bateria	56
4.2.3	Carregador	57
4.2.4	Conversor de tensão <i>DC-DC</i>	58
4.3	Módulo de Transmissão de Dados	59
4.4	Módulo de Redistribuição de Dados	61
4.5	Módulo Principal	62
4.5.1	Plataforma Arduíno	63
4.6	Arquitetura do Sistema Monitoramento de Qualidade da Água	65
4.7	Custo	69

4.8	Conclusões	71
5	Resultados Experimentais	72
5.1	Validação Rede <i>XBee</i>	72
5.2	Validação sondas e sensores	79
5.3	Teste de campo	90
5.4	Consumo de energia nó sensor	99
5.5	Plataforma Losant	103
5.6	Conclusões	105
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	106
6.1	Trabalhos Futuros	107
	Referências Bibliográficas	109
	Apêndice A – Fundamentação Teórica	117

Lista de Figuras

Figura 1	Abordagem Manual baseada em Laboratório.	38
Figura 2	Abordagem Manual <i>in situ</i>	38
Figura 3	Abordagem baseada em RSSF.	39
Figura 4	RSSF.	42
Figura 5	Topologia de uma rede <i>ZigBee</i> em Malha.	44
Figura 6	Número de ocorrências de parâmetros de qualidade nos trabalhos relacionados.	48
Figura 7	Número de ocorrências de tecnologias de comunicação nos trabalhos relacionados.	48
Figura 8	Sistema MQA proposto e seus componentes.	50
Figura 9	Sonda de Oxigênio Dissolvido.	51
Figura 10	Sonda de Potencial de Oxirredução.	52
Figura 11	Sonda de Potencial Hidrogeniônico.	53
Figura 12	Sonda de Condutividade.	54
Figura 13	Sonda de Temperatura.	55
Figura 14	Conexão Sonda de Turbidez SEN0189.	55
Figura 15	Módulo fotovoltaico.	57
Figura 16	Bateria <i>LiPo</i>	57
Figura 17	Carregador TP4056.	58
Figura 18	Conversor de Tensão MT3608.	58
Figura 19	Módulo de suprimento de energia.	59
Figura 20	Módulo <i>XBee</i>	60

Figura 21	Arduino <i>Ethernet Shield</i>	61
Figura 22	Losant <i>Dashboard</i>	62
Figura 23	Arduínos utilizados no projeto: (a) Pro Mini, (b) Mega 2560.	63
Figura 24	Arquitetura SMQA/RSSF.	65
Figura 25	Esquemático Nó sensor.	66
Figura 26	Quadro <i>API</i> com pacote de qualidade de água.	67
Figura 27	Rotina de amostragem no nó sensor.	68
Figura 28	Nó gateway.	69
Figura 29	Ambiente de testes: Estacionamento IFCE, <i>campus</i> Fortaleza distância medida por ferramenta do Google Maps®.	73
Figura 30	Ambiente de testes: Estacionamento IFCE, <i>campus</i> Fortaleza. . .	73
Figura 31	Exemplo de teste de vazão utilizando <i>software</i> XCTU®.	75
Figura 32	Exemplo de teste de alcance utilizando <i>software</i> XCTU®.	76
Figura 33	Resultados perda de pacotes com a distância.	78
Figura 34	Resultados RSSI local e remoto com a distância.	78
Figura 35	Resultados taxa de transmissão com a distância.	79
Figura 36	Oxímetro de referência da Alfakit®, modelo AT-115.	80
Figura 37	Condutivímetro de referência da Tecnopon®, modelo mCA-150. . .	81
Figura 38	Medidor de pH de referência da Tecnopon®, modelo mPA-210. . .	81
Figura 39	Desempenho do sensor de OD (mg/L).	83
Figura 40	Desempenho do sensor de pH.	84
Figura 41	Desempenho do sensor de CE (μ S/cm).	85
Figura 42	Comparativo entre leituras de CE da água da Cagece.	86
Figura 43	Comparativo entre leituras de CE da água do poço	87
Figura 44	Comparativo entre leituras de OD da água da Cagece.	87
Figura 45	Comparativo entre leituras de OD da água do poço.	88

Figura 46 Comparativo entre leituras de <i>ORP</i> da água da Cagece.	89
Figura 47 Comparativo entre leituras de <i>ORP</i> da água do poço.	89
Figura 48 Comparativo entre leituras de pH da água da Cagece.	90
Figura 49 Comparativo entre leituras de pH da água do poço.	90
Figura 50 Célula de amostragem da água do poço.	91
Figura 51 Dados coletados da água do poço.	92
Figura 52 Dados coletados da água do poço.	92
Figura 53 Dados coletados da água do poço.	93
Figura 54 Dados coletados da água do poço.	93
Figura 55 Dados coletados da água do poço.	94
Figura 56 Dados coletados da água do poço.	94
Figura 57 Dados coletados da água do poço.	95
Figura 58 Dados coletados da água da distribuidora.	96
Figura 59 Dados coletados da água da distribuidora.	96
Figura 60 Dados coletados da água da distribuidora.	97
Figura 61 Dados coletados da água da distribuidora.	97
Figura 62 Dados coletados da água da distribuidora.	98
Figura 63 Dados coletados da água da distribuidora.	98
Figura 64 Dados coletados da água da distribuidora.	99
Figura 65 Tela extraída dos testes de monitoramento.	103
Figura 66 Tela extraída dos testes de monitoramento.	104
Figura 67 Tela extraída dos testes de monitoramento.	104

Lista de Tabelas

Tabela 1	Valores típicos de pH.	24
Tabela 2	Valores típicos de <i>ORP</i>	25
Tabela 3	Valores típicos de condutividade.	26
Tabela 4	Valores típicos de salinidade.	27
Tabela 5	Valores típicos de Oxigênio Dissolvido.	28
Tabela 6	Valores típicos de turbidez.	29
Tabela 7	Parâmetros de Qualidade da Água do IQA e respectivo peso. . . .	31
Tabela 8	Valores do Ministério da Saúde para água potável.	32
Tabela 9	Alguns parâmetros das classes de enquadramento das águas doces.	34
Tabela 10	Alguns parâmetros das classes de enquadramento das águas salobras.	35
Tabela 11	Alguns parâmetros das classes de enquadramento das águas salobras.	35
Tabela 12	Características dos Arduínos Pro Mini e Mega.	64
Tabela 13	Custo da prototipagem de um nó sensor.	70
Tabela 14	Custo da prototipagem do nó <i>gateway</i>	70
Tabela 15	Média dos resultados dos testes de alcance e vazão.	77
Tabela 16	Cenário real do consumo de energia do nó sensor.	100
Tabela 17	Cenário de correção do consumo de energia do nó sensor.	102
Tabela 18	Trabalhos relacionados.	118

Lista de Símbolos

V	Volts
mV	milivolts
A	Ampere
Ah	Ampere por hora
mA	miliampere
m	metro
cm	centímetros
MHz	megahertz
°C	graus Celsius
μS/cm	microsiemens por centímetro
S	Siemens

Lista de Abreviações

API	Application Programming Interface
CE	Condutividade Elétrica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
GPS	Geographical Positioning System
IDE	Integrated Development Environment
ISM	Industrial, Scientific and Medical
KCL	Cloreto de potássio
LIA	Laboratório de Instrumentação Analítica
LiPo	Lithium Polymer
LQG	Laboratório de Química Geral
MQA	Monitoramento de Qualidade da Água
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
OD	Oxigênio Dissolvido
ORP	Potencial de Oxirredução
PH	Potencial Hidrogeniônico
REST	Relational State Transfer
RSSF	Redes de Sensores sem Fio
RSSI	Received Signal Strength Indicator
STD	Sólidos Totais Dissolvidos

SIMQA	Sistemas Inteligentes de Monitoramento de Qualidade da Água
SMQA	Sistema de Monitoramento de Qualidade da Água
SST	Sólidos Suspensos Totais
SRAM	Static Random Access Memory
UART	Universal Synchronous Receiver/Transmitter

INTRODUÇÃO

A água cobre 71% da superfície da Terra. No entanto, apenas 2,5% desta água é doce, encontrada em rios, lagos e na atmosfera. As fontes de água limpa são benéficas não apenas para o ecossistema aquático e habitats naturais, elas são fonte de renda de muitas famílias. Além disso, a preservação dessas fontes leva também a uma questão de saúde pública. Assim, é preciso o monitoramento dessas fontes para que seja garantida essa qualidade (DONG *et al.*, 2015; ADU-MANU *et al.*, 2017).

No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA), órgão responsável pela rede nacional de qualidade da água, possui 4.641 pontos de coleta¹ em todo o país. O monitoramento é feito, em parte, por meio de sondas multiparamétricas que medem 4 parâmetros básicos (pH, oxigênio dissolvido, condutividade e temperatura). Contudo, somente esses parâmetros não permitem que se avalie adequadamente a evolução da qualidade das águas brasileiras, sendo necessário coletas de amostras e análises laboratoriais para os demais parâmetros (ANA, 2016; PNQA, 2016).

Em todo o território nacional a maioria dos pontos de monitoramento utiliza a abordagem tradicional baseada em laboratório. Essa metodologia exige uma padronização nos procedimentos e frequência de coleta e na análise de informações, o que varia entre as Unidades Federativas. Isto traz um prejuízo na compilação e, em especial, na troca de dados entre os órgãos participantes (ANA, 2016; PNQA, 2016).

Essa abordagem de monitoramento manual baseada em laboratório tem sua principal desvantagem inerente a sua baixa frequência de amostragem. Somado a isso estaria a falta de recursos dos estados brasileiros, o que ocasiona vazios de monitoramento no registro histórico das informações de qualidade da água do Brasil (PNQA, 2016).

O uso de soluções baseadas em Redes de Sensores sem Fio (RSSF) podem

¹Esses pontos são divididos entre os que medem dados pluviais (1.874), e os demais monitoram principalmente dados fluviais (2.767).

contribuir para mitigar esse obstáculo. Os múltiplos dispositivos sensores que compõem as RSSF podem amostrar um corpo d'água em intervalos de até 1 segundo, automaticamente (ATLAS, 2017). Devido a esse fato, é notório que essa abordagem propiciará um aumento rápido do volume de dados de qualidade da água e adicionará detalhamento à abordagem tradicional (DONG *et al.*, 2015; MAINETTI; PATRONO; VILEI, 2011).

Embora as RSSF tenham sido propostas por vários autores (ADU-MANU *et al.*, 2017; DONG *et al.*, 2015; CHEN; HAN, 2018; ZAKARIA; MICHAEL, 2017) como o próximo passo evolutivo dos sistemas monitoramento de qualidade da água, as limitações das tecnologias envolvidas dificultam a sua adoção. Além disso, a maioria dos trabalhos não implementam todas as etapas que compreendem sistema completo de monitoramento de qualidade da água (ADU-MANU *et al.*, 2017).

Tendo esses fatos em vista, é oferecida uma demonstração do estado da arte em tecnologias de monitoramento remoto sem fio mais atuais, a fim de apontar as novas oportunidades baseadas em soluções RSSF para o monitoramento da qualidade da água. Em seguida, é descrito o Sistema de Monitoramento de Qualidade da Água (SMQA) multi-paramétrico baseado em RSSF desenvolvido para subsidiar o conceito da aplicação dessa solução no monitoramento de diversos corpos d'água.

1.1 Objetivo

Implementar uma rede de sensores sem fio que atue de forma complementar ao monitoramento tradicional de qualidade da água através de sensoriamento distribuído, contínuo, em tempo real e com o uso da *Internet* para transmissão dos dados coletados.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Implementar um dispositivo de monitoramento eletrônico e autônomo, que colete e processe os dados de parâmetros de qualidade da água e os encaminhe via rede local para um ponto de coleta;
- Implementar dispositivo *gateway* para receber os dados dos diversos dispositivos coletores e enviar os dados obtidos para uma plataforma *on-line* através da rede mundial, a *Internet*;

- Desenvolver a melhor estratégia de coleta dos dados a fim de permitir uma extensão da autonomia dos dispositivos coletores;
- Validar as leituras dos sensores em alguns pontos de interesse, através de coleta de dados em campos e do comparativo com sensores de referência *on-line*.

1.2 Contribuições e Produção Científica

Esse trabalho contribui para fomentação do uso de tecnologias mais recentes de RSSF e *Internet das Coisas* (*Internet of Thing, IoT*) no monitoramento da qualidade da água. Os dados gerados por uma rede maior de monitoramento de qualidade da água pode gerar informação útil para toda a comunidade civil e servir de base para tomadas de decisões por governos. Essas informações contribuirão para que as fontes de água disponíveis sejam melhor geridas.

Por fim, esse trabalho conduz a um outro passo importante que é a construção de cidades que tenham toda a rede de distribuição de água mais eficiente e eficaz e que garanta a qualidade da água fornecida. O trabalho pode ser aproveitado no monitoramento de águas residuais e contribuir na definição da tecnologia mais adequada para seu tratamento e reaproveitamento. Pode ainda ser utilizado para auxiliar na fiscalização do cumprimento das normas e legislações vigentes de efluentes industriais.

Até o momento de finalização da dissertação temos o aceite de um artigo em um encontro (SILVA *et al.*, 2018).

1.3 Organização da dissertação

Capítulo 2: são apresentados as principais legislações e procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Capítulo 3: são examinados o Estado da Arte em RSSF e sua contribuição no monitoramento de qualidade da água. É descrito, ainda, o que existe na literatura sobre o tema discutido que nos permita destacar as colaborações no desenvolvimento do projeto, bem como o distingue dos demais.

Capítulo 4: são descritos os componentes, a elaboração e os procedimentos de teste

do sistema proposto em detalhe.

Capítulo 5: são expostos a análise e discussão dos resultados e desempenho obtidos nos testes de laboratório e em campo do protótipo.

Capítulo 6: são apresentadas as conclusões dos resultados obtidos com o protótipo desenvolvido, bem como é delineada nossa agenda de pesquisa detalhando nossos trabalhos futuros.

QUALIDADE DA ÁGUA

As características das águas naturais são consequência da sua capacidade de dissolução de uma ampla gama de substâncias. Essas características também são resultantes de processos naturais e dos impactos da atuação do homem. O escoamento superficial e subterrâneo atrelado ao metabolismo dos organismos aquáticos conferem alterações temporal e espacialmente nas características do corpo d'água. Assim, podemos concluir que a qualidade de um corpo d'água advém da variação das suas características físicas, químicas e biológicas decorrente de uma série de processos tanto no corpo hídrico analisado, bem como nos seus arredores (SPERLING, 2014; LIBÂNIO, 2008).

Podem ser citadas como características físicas da água, temperatura, turbidez, condutividade e cor. Como características químicas podem ser citados parâmetros como pH, potencial de oxirredução, oxigênio dissolvido, compostos orgânicos, metais pesados, bactérias coliformes, algas e cianobactérias. Os parâmetros aqui analisados são relevantes não apenas para os estudos de águas superficiais do oceano, lagos e rios, mas também para os águas subterrâneas, processos industriais e sistemas de abastecimento. As próximas seções detalham alguns dos parâmetros físico-químicos mais comuns encontrados na literatura e a legislação que rege a qualidade da água no Brasil.

2.1 Parâmetros de Qualidade da Água

2.1.1 pH

O termo pH significa literalmente "potencial do hidrogênio". O pH é definido como o negativo do logaritmo da atividade do íon hidrogênio (ou concentração em moles/litro):

$$pH = -\log[H^+]. \quad (2.1)$$

A água (H_2O) se dissocia em íons hidrogênio (H^+) e íons hidróxido (OH^-) em solução aquosa. A 25°C há $1,0 \times 10^{-7}$ moles/L de íons hidrogênio e $1,0 \times 10^{-7}$ moles/L de íons hidróxido em água pura. Assim, a água é neutra ($\text{pH} = 7$) porque há quantidades iguais de cada íon. A adição de uma substância com hidrogênio ou íons de hidróxido mudará o equilíbrio e fará com que a água se torne ácida ou básica (FONDRIEST, 2018; FUZINATTO, 2009).

As águas naturais geralmente têm valores de pH na faixa de 6 a 9. A maioria das águas naturais é um pouco básica ($\text{pH} = 8$, aproximadamente) devido à presença de carbonatos (CO_3^{2-}) e bicarbonatos (HCO_3^-). A água extremamente doce pode até ser levemente ácida ($\text{pH} = 6$, aproximadamente), dependendo da concentração de dióxido de carbono dissolvido (CO_2). Isso porque o dióxido de carbono se combina com a água para formar uma pequena quantidade de ácido carbônico (H_2CO_3) e esse processo reduz o pH (FONDRIEST, 2018; SPERLING, 2014).

Vale mencionar que a quantidade exagerada de produtos da queima de combustíveis fósseis liberados na atmosfera, como os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os dióxidos de enxofre (SO_2), se combinam com a água na atmosfera para formar ácido nítrico (HNO_3) e sulfúrico (H_2SO_4). Estes compostos caem no chão como chuva ácida e se acumulam nas águas superficiais. O escoamento de resíduos da mineração e a decomposição de materiais vegetais também podem causar águas superficiais ácidas (FONDRIEST, 2018).

O pH afeta o metabolismo de várias espécies aquáticas. A Resolução 357 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) estabelece que efeitos nocivos à vida aquática se tornam perceptíveis quando o pH da água cai abaixo de 6 ou sobe acima de 9. Valores muito baixos de pH tornam pequenas quantidades de amônia tóxicas para peixes. Valores muito altos podem aumentar a concentração de metais pesados, por serem mais solúveis em ambientes básicos (CONAMA, 2005). Os valores comuns para o pH encontrados na natureza são resumidos na Tabela 1.

Tabela 1: Valores típicos de pH.

Fluido	Unidades de pH
Chuva Ácida	< 5
Água Destilada	5,6
Maioria das águas neutras	8
Seguro para peixes de água doce	6 - 9
Piscina adequadamente clorada	7,2 - 7,6

Fonte: In-Situ (2018)

2.1.2 Potencial de Oxirredução

Potencial de Oxirredução (*ORP*) é uma medida da capacidade de um sistema aquoso liberar ou obter elétrons em reações químicas. As reações de oxidação (perda de elétrons) e as de redução ou redox (ganho de elétrons) controlam o comportamento de muitos constituintes químicos na água potável, águas residuais e ambientes aquáticos (TUNDISI; TUNDISI, 2016).

A reatividade e solubilidade de elementos críticos em sistemas vivos é fortemente dependente das condições redox. Os valores de *ORP* são muito semelhantes aos valores de pH para determinar a qualidade da água. Embora os valores de pH caracterizem o estado relativo de um sistema para receber ou doar íons de hidrogênio (atuando como uma base ou um ácido), os valores de *ORP* são afetados por todos os agentes oxidantes e redutores, não apenas ácidos e bases (VASCONCELLOS, 2015).

A expectativa de vida das bactérias na água está relacionada ao *ORP*. De fato, estudos mostraram que a vida útil das bactérias na água é mais dependente do valor de *ORP* do que da concentração de cloro. Em contraste, as águas naturais precisam de um valor de *ORP* muito menor para sustentar a vida (IN-SITU, 2018).

Em sistemas de abastecimento, valores negativos de *ORP* podem causar corrosão excessiva em encanamentos, levando a necessidade de reparos. O *ORP* pode ser monitorado durante o processo de desinfecção da água potável ou da água de uma piscina. Além disso, pode ser utilizado para rastrear a poluição metálica de águas

subterrâneas ou superficiais, ou para determinar o teor de cloro do efluente de águas residuais (VASCONCELLOS, 2015).

Apesar da sua importância, o *ORP* é uma medida não específica. O potencial medido é reflexo de uma combinação dos efeitos de todas as espécies dissolvidas no meio. Devido a esse fator, a medição de *ORP* em água ambiental relativamente limpa (solo, superfície, estuário e marinha) tem utilidade limitada, a menos que se saiba que uma espécie predominante de redox ativa esteja presente (TUNDISI; TUNDISI, 2016). Os valores mais comuns encontrados para o *ORP* são destacados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores típicos de *ORP*.

Fluido	ORP mv
Aquário de água salgada	~ 350
Nocivo para a vida aquática	> 400
Piscina adequadamente clorada	> 700

Fonte: In-Situ (2018)

2.1.3 Condutividade, sólidos totais dissolvidos e salinidade

A condutividade elétrica mede a capacidade de um material de conduzir uma corrente elétrica. Lagos, rios, oceanos e aquíferos subterrâneos são tipicamente bons condutores porque contêm sais e minerais dissolvidos. Estes sais e minerais dissociam-se na presença de água para formar partículas carregadas negativamente (ânions) e positivamente (cátions) chamadas íons. Quanto mais íons estiverem presentes, maior será a condutividade da água. A água destilada, por exemplo, é um mau condutor porque quase todos os ânions e cátions são removidos durante o processo de destilação (SPERLING, 2014).

Condutividade é a condutância medida em uma distância especificada (1 cm). A condutância elétrica depende do comprimento do condutor, assim como a resistência. A condutância é medida em mho ou Siemens (S) (FONDRIEST, 2018).

A partir da condutividade é possível derivar os valores de salinidade e sólidos totais dissolvidos (STD). A salinidade é a concentração total de todos os sais dissolvidos em água. Os sólidos totais dissolvidos consistem na concentração de todos os cátions, ânions e sais resultantes da combinação de materiais que se encontram em

suspensão na água, sendo, portanto, a fração dos solutos suspensos que passam por filtros com poros de 2,0mm (SPERLING, 2014).

Um aumento ou diminuição repentina da condutividade em um corpo d'água pode indicar poluição. A título de exemplo, o escoamento agrícola ou vazamento de esgoto iria aumentar a condutividade devido aos íons adicionais de cloreto, fosfato e nitrato. Por outro lado, um derramamento de óleo ou adição de outros compostos orgânicos diminuiria a condutividade, já que esses elementos não se decompõem em íons. Em ambos os casos, os sólidos dissolvidos adicionais terão um impacto negativo na qualidade da água (FONDRIEST, 2018).

A presença de sólidos em elevadas concentrações nos ambientes aquáticos, pode: sedimentar o leito do curso d'água, provocando a supressão de organismos produtores de alimentos; danificar leitos de desova dos peixes e abrigar resíduos orgânicos e bactérias que promovem a decomposição anaeróbica (FONDRIEST, 2018). Valores típicos para condutividade e salinidade encontrados na natureza são resumidos, respectivamente, na Tabela 3 e na Tabela 4.

Tabela 3: Valores típicos de condutividade.

Fluido	Condutividade
Água destilada ultrapura	0,05 $\mu\text{S/cm}$
Água destilada	1,0 $\mu\text{S/cm}$
Água potável	50 a 300 $\mu\text{S/cm}$
Águas superficiais	100 a 10.000 $\mu\text{S/cm}$
Água do mar	40.000 a 55.000 $\mu\text{S/cm}$
Grande Lago Salgado (Utah, EUA)	158.000 $\mu\text{S/cm}$

Fonte: In-Situ (2018)

2.1.4 Oxigênio Dissolvido

A medição da quantidade de Oxigênio Dissolvido (OD) tanto na água natural como no efluente é uma função de vários parâmetros. O OD é altamente dependente da temperatura e da pressão atmosférica. Um aumento na temperatura provoca uma diminuição na quantidade de oxigênio que pode se dissolver na água. De outra forma, pressões atmosféricas mais altas resultam em maiores valores de OD. A salinidade também é um fator propenso a redefinir a quantidade de oxigênio. A solubilidade do

Tabela 4: Valores típicos de salinidade.

Fluido	Salinidade (ppt)
Água doce	< 0,5
Manguezal/Estuário	0,5 - 17
Mar Negro	16
Faixa do oceano	32 - 37
Média do oceano	35

Fonte: Fondriest (2018)

oxigênio é maior em água doce do que em água salgada. Vale mencionar que existem também processos químicos e bioquímicos que afetam o OD (LIBÂNIO, 2008).

A maior parte do OD na água vem da atmosfera e da fotossíntese de algas e plantas aquáticas. Os níveis de OD em lagos e outras águas superficiais seguem um padrão cíclico ao longo do dia, subindo e descendo conforme a intensidade da luz muda do amanhecer ao anoitecer (LIBÂNIO, 2008).

A maior parte da vida aquática requer um valor médio de OD maior que 5,0 miligramas por litro de água (mg/L) para sobreviver. Embora a quantidade de oxigênio dissolvido em um corpo de água flutue devido a processos naturais, grandes desvios dos níveis normais são geralmente efeito da atividade humana. Mudanças nos níveis de OD são comumente o resultado de um acúmulo de resíduos orgânicos. Estes podem entrar nas águas superficiais através das instalações de tratamento, escoamento de lotes de rações agrícolas ou de descargas domésticas e/ou industriais (FUZINATTO, 2009; FONDRIEST, 2018).

Resíduos orgânicos frequentemente contêm nitratos e fosfatos que são nutrientes para algas e plantas aquáticas, estimulando a superprodução quando presentes em níveis excessivos. O crescimento acelerado das floradas aumenta o número de plantas fotossintetizadoras, o que intensifica temporariamente a quantidade de oxigênio dissolvido. No entanto, a vegetação aquática submersa acaba sofrendo uma redução na incidência de luz solar recebida. Esta diminuição da luz do sol leva a uma redução na fotossíntese e eventual morte. Processos bacterianos assumem e consomem ainda mais oxigênio dissolvido. Peixes e outras espécies aquáticas morrem devido à falta de oxigênio dissolvido. Este processo é conhecido como eutrofização (FONDRIEST, 2018). Os valores típicos de OD são destacados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores típicos de Oxigênio Dissolvido.

Condições	Valores de OD
100% OD, 0 °C, 1 atm, 0 ppm Cloro	14,6 mg/L
100% DO, 20 °C, 1 atm, 0 ppm Cloro	9,09 mg/L
100% DO, 0 °C, 0,75 atm, 0 ppm Cloro	6,77 mg/L
100% DO, 20 °C, 1 atm, 20 ppm Cloro	7,35 mg/L
Nível seguro para a maior parte da vida aquática	> 5,0 mg/L

Fonte: In-Situ (2018)

2.1.5 Turbidez

A turbidez é uma medida indireta da clareza ou transparência da água. Portanto, é um indicador importante da condição do corpo d'água. Criada por matéria suspensa e organismos microscópicos, a turbidez faz com que a luz seja espalhada e absorvida em vez de transmitida diretamente pela água. Turbidez é também referida como o oposto de clareza (LIBÂNIO, 2008; IN-SITU, 2018).

Esta alteração na passagem da luz pode ser causada por plânctons, bactérias, argilas e silte em suspensão, bem como por fontes poluidoras que lançam material sobre as águas, como a erosão e despejos domésticos. A turbidez em corpos d'água apresenta os maiores valores em estações mais chuvosas, devido ao aporte de material particulado levado pelo escoamento superficial (LIBÂNIO, 2008).

Considerações estéticas também desempenham um papel na motivação da quantificação a turbidez. A maioria das pessoas prefere olhar, beber ou nadar em água clara do que na água que parece turva e regularmente associam a aparência à saúde do corpo de água (LOPES; JR; PEREIRA, 2008).

Os métodos históricos, como o método Jackson Candle e o disco Secchi, para medir a turbidez usam estimativas subjetivas que dependem em grande parte dos olhos do avaliador. Esses métodos possuem dificuldade na reprodutibilidade e no controle dos padrões formulados a partir de sedimentos naturais (LIBÂNIO, 2008).

Os turbidímetros modernos medem a perda de intensidade de um feixe de luz ao passar por uma solução contendo partículas suspensas e dissolvidas que são grandes o suficiente para dispersar a luz. O método baseia-se numa comparação da intensidade da luz dispersa pela amostra com a intensidade da luz difundida por uma

suspensão de referência padrão. O nefelômetro é um tipo particular de turbidímetro que mede a intensidade da luz espalhada em ângulos retos (90°) em relação à luz incidente (FONDRIEST, 2018).

Um segundo tipo de turbidímetro utiliza a atenuação de luz ou transmitância. Esta tecnologia é usada em máquinas inteligentes de lavar roupa ou louça. Esses sensores de turbidez medem a quantidade de luz que atinge o fotodetector. Isto determinará por quanto tempo será lavada em cada ciclo, conservando energia quando pouca ou nenhuma turbidez estiver presente. A diminuição da intensidade da luz pode ser através da absorção (cor) ou espalhamento (partículas) (FONDRIEST, 2018).

A Tabela 6 apresenta um resumo dos valores mais comuns para turbidez.

Tabela 6: Valores típicos de turbidez.

Fluido	Valores de turbidez
Água potável	0,3 a 0,5 NTU
Água tratada	0 a 1 NTU
Água doce, > 55 cm de visibilidade	< 10 NTU
Água doce, 7 cm de visibilidade	240 NTU
Estresse relacionado à falta de oxigênio	> 10 NTU
Nível inseguro para a maior parte da vida aquática	> 100 NTU

Fonte: In-Situ (2018)

2.1.6 Temperatura

A temperatura pode ser definida como uma medida da intensidade de calor. A sua origem natural é principalmente através da transferência de calor por radiação, condução ou convecção. A origem antrópica advém dos despejos industriais, que eleva as temperaturas, aumentando a taxa das reações físicas, químicas e biológicas e diminuindo a solubilidade dos gases (SPERLING, 2014; ANA, 2016).

Todos os corpos d'água apresentam variações de temperatura ao longo do dia e das estações do ano, devido à incidência de luz solar ou outras causas. Mas os organismos aquáticos são afetados por temperaturas fora de seus limites de tolerância térmica, o que provoca impactos sobre seu crescimento, reprodução e longevidade. Águas frias tendem a reter mais oxigênio dissolvido do que águas quentes. Essa

diminuição do oxigênio disponível para absorção pelos organismos em águas quentes pode ser uma das causas de estresse em peixes. (FONDRIEST, 2018).

2.2 Índice de Qualidade da Água

O Índice de Qualidade das Águas (IQA) foi estabelecido em 1970, nos Estados Unidos, pela *National Sanitation Foundation*. A sua utilização no Brasil se deu a partir de 1975, pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). Desde então, os demais Estados brasileiros utilizam o IQA como o índice básico de qualidade da água (PNQA, 2016).

O IQA foi desenvolvido tendo em vista o abastecimento público e análise da água bruta tratada. Os métricas empregadas no cálculo do IQA são em geral indicativos de contaminação causada pelo lançamento de esgotos domésticos (PNQA, 2016).

O índice consiste, basicamente, em uma média ponderada, na qual o resultado de múltiplos testes é representado em um único valor. Este índice tornou-se uma importante ferramenta para a avaliação da qualidade das águas em diversos pontos de rios e lagos ao longo do tempo, permitindo, ainda, a comparação com os corpos d'água de outras regiões e países (LOPES; JR; PEREIRA, 2008):

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (2.2)$$

Neste caso, têm-se que *IQA* (Índice de Qualidade das Águas) é um valor entre 0 e 100 que representa a qualidade do corpo d'água analisado. q_i é a qualidade do *i*-ésimo parâmetro, também é um valor entre 0 e 100, obtido do respectivo gráfico de qualidade, em função de sua concentração ou medida (resultado da análise). w_i é o peso correspondente ao *i*-ésimo parâmetro fixado em função da sua relevância para a normalização global da qualidade; ou seja, um número entre 0 e 1, de modo que

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (2.3)$$

O IQA é composto por nove parâmetros, com seus respectivos pesos (w), que foram fixados em função da sua importância para a normalização global da qualidade da água (Tabela 7).

Tabela 7: Parâmetros de Qualidade da Água do IQA e respectivo peso.

Parâmetro de qualidade da água	Peso (w)
Oxigênio dissolvido	0,17
Coliformes termotolerantes	0,15
Potencial hidrogeniônico - pH	0,12
Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO _{5,20}	0,10
Temperatura da água	0,10
Nitrogênio total	0,10
Fósforo total	0,10
Turbidez	0,08
Resíduo total	0,08

Fonte: PNQA (2016).

A grande vantagem da utilização do IQA é a sumarização, em um único valor, das nove variáveis utilizadas em seu cálculo, favorecendo a interpretação, compreensão e divulgação dos resultados. Mas esta vantagem, tem um aspecto negativo, pois há uma perda da interpretação individual das variáveis. Outra desvantagem é que este índice não analisa vários parâmetros importantes para o abastecimento público, tais como substâncias tóxicas (ex: metais pesados, pesticidas, compostos orgânicos), protozoários patogênicos e substâncias que interferem nas propriedades organolépticas da água (LOPES; JR; PEREIRA, 2008; PNQA, 2016).

Além disso, os efeitos originários de outras fontes de poluentes, não são representados, tendo em vista que este índice foi desenvolvido para avaliar o impacto dos esgotos domésticos nas águas de abastecimento público (LOPES; JR; PEREIRA, 2008).

2.3 Legislação

A Organização mundial da Saúde (OMS) determinou diferentes metas de qualidade da água que especificam as quantidades seguras de certos produtos químicos que podem ser encontrados na água. As iniciativas de estabelecer padrões de qualidade da água a serem seguidos no Brasil, de uma maneira geral, são copiadas de outras legislações ou dos valores da OMS (RIBEIRO, 2012; CCME, 2002; EPA, 2009; OMS, 2011).

No Brasil, até 2017, A Portaria n.º 2.914/2011, do Ministério da Saúde do Brasil, "dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade". Nela constam 53 artigos, do Capítulo I ao VIII e mais 15 anexos (BRASIL, 2011). A Tabela 8 possui um resumo dos valores aceitáveis para água potável de acordo com a portaria.

Tabela 8: Valores do Ministério da Saúde para água potável.

Parâmetro	Definição	Valores Típicos Brasil
pH	Concentração efetiva de íons de hidrogênio	6,5 - 9,5 (preferível ≤ 8)
Turbidez	Quantidade de matéria sólida suspensa em água que obstrui a transmissão de luz	< 1 uT
Vírus Entéricos	São importantes causas de enfermidades transmitidas pela água.	-
Coliformes Totais	Bactérias gram-negativas associadas à decomposição de matéria orgânica em geral.	Ausência em 100 mL
Cor	Indicativo da presença de substâncias diversas dissolvidas na água.	15 uH
Sólidos Totais Dissolvidos (STD)	Quantidade de sais inorgânicos e pequena matéria orgânica	250 - 1.000 mg/L
Cloro Residual Livre (CRL)	Cloro presente na água nas formas do ácido hipocloroso ou do íon hipoclorito	5 mg/L
Escherichia Coli		Ausência em 100 mL

Fonte: BRASIL (2017)

A portaria ainda trata das atribuições de cada um dos órgãos da União, dos Estados e Municípios, assim como das definições de competências laboratoriais.

Apresenta-se também os padrões de análises microbiológicas, físicas, químicas e de radioatividade, testes laboratoriais, planos de amostragem e tratamento da água para consumo humano (BRASIL, 2011).

Em 2017, o Ministério da Saúde revogou a portaria 2.914 e criou o Código do SUS que abrange o conteúdo normativo da antiga Portaria. A Portaria de Consolidação (PRC) n.º 05/2017, como também é chamada, tem o intuito de facilitar a compreensão dos órgãos de controle, empreendedores e gestores de saúde de maneira geral que envolvem o Sistema Único de Saúde (SUS) do Brasil. Não houve alteração na norma estabelecida na portaria n.º 2914/11 do Ministério da Saúde e está incorporada pela PRC n.º 05/2017, no Anexo XX (BRASIL, 2017).

Outra norma que regulamenta a qualidade da água em território nacional é a Resolução n.º 357 de 2005 do CONAMA. Esta resolução "dispõe sobre a classificação dos corpos de água e as diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e os padrões de lançamento de efluentes". Esta portaria divide os corpos aquíferos em 3 classes, água doce, salina e salobra, e em cada uma delas foram estabelecidos limites e/ou condições de acordo com sua potabilidade e emprego, como consta nas Tabelas 9, 10 e 11 (CONAMA, 2005).

A Resolução n.º 430/2011, do CONAMA, complementa e altera a Resolução n.º 357/2005. O principal objetivo daquela resolução é estabelecer as condições e padrões de lançamento de efluentes assim como alterações nas disposições finais e transitórias (CONAMA, 2011).

Ainda segundo CONAMA (2005), os níveis de qualidade dos corpos d'água devem ser enquadrados com base no seu uso preponderante mais restritivo. Assim deve atender às expectativas atuais e futuras da comunidade, e não somente de acordo com os níveis de qualidade de seu estado atual.

Tabela 9: Alguns parâmetros das classes de enquadramento das águas doces.

Parâmetro	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Salinidade		$\leq 0,50 \%$		
Clorofila a	≤ 10	≤ 30	≤ 60	-
Densidade de Cianobactérias	≤ 20.000	≤ 50.000	≤ 100.000 , dessedentação de animais ≤ 50.000	-
pH	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
OD	≥ 6	≥ 5	≥ 4	≥ 2
DBO	≤ 3	≤ 5	≤ 10	-
Coliforme termotolerante	≤ 200 em 80% de 6 amostra/ano	≤ 1000 em 80% de 6 amostra/ano	≤ 2.500 contato secundário ≤ 1.000 animais confinados ≤ 4.000 demais usos	-
Sólidos totais	≤ 500	≤ 500	≤ 500	-
Cor	-	≤ 75	≤ 75	-
Turbidez	≤ 40	≤ 100	≤ 100	-
Nitrato	≤ 10	≤ 10	≤ 10	-
Nitrito	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	-

Fonte: CONAMA (2005)

Tabela 10: Alguns parâmetros das classes de enquadramento das águas salobras.

Parâmetro	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Salinidade		>0,50% a <30%	
Clorofila a	-	-	-
Densidade de Cianobactérias	-	-	-
pH	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5	5 a 9
OD	≥ 5	≥ 4	≥ 3
DBO	-	-	-
Coliforme termotolerante	≤ 200 irrigação ≤ 1.000 em 80% de 6 amostra/ano	≤ 2.500 em 80% de 6 amostra/ano	≤ 4.000 em 80% de 6 amostra/ano
Sólidos totais	-	-	-
Cor	-	-	-
Turbidez	-	-	-
Nitrato	$\leq 0,40\text{mg/L}$	$\leq 0,70\text{mg/L}$	-
Nitrito	$\leq 0,07\text{mg/L}$	$\leq 0,20\text{mg/L}$	-

Fonte: CONAMA (2005)

Tabela 11: Alguns parâmetros das classes de enquadramento das águas salobras.

Parâmetro	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Salinidade		$\geq 30\%$	
Clorofila a	-	-	-
Densidade de Cianobactérias	-	-	-
pH	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5
OD	≥ 6	≥ 5	≥ 4
DBO	-	-	-
Coliforme termotolerante	≤ 1.000 em 80% de 6 amostra/ano	≤ 2.500 em 80% de 6 amostra/ano	≤ 4.000 em 80% de 6 amostra/ano
Sólidos totais	-	-	-
Cor	-	-	-
Turbidez	-	-	-
Nitrato	$\leq 0,40\text{mg/L}$	$\leq 0,70\text{mg/L}$	-
Nitrito	$\leq 0,07\text{mg/L}$	$\leq 0,20\text{mg/L}$	-

Fonte: CONAMA (2005)

2.4 Conclusões

É fundamental o conhecimento de quais parâmetros são necessários para definir a qualidade de um determinado corpo d'água. O monitoramento desses parâmetros em laboratório e/ou no local de amostragem ajuda na compreensão dos processos naturais no meio ambiente e para determinar os impactos antrópicos em um ecossistema. Esses esforços de medição são fundamentais também em projetos de restauração de ambientes aquáticos ou para garantir que os padrões ambientais sejam cumpridos.

O capítulo seguinte discutirá a evolução do monitoramento de qualidade da água, assim como as tecnologias utilizadas para monitoramento remoto sem fio. Ainda serão levantadas as contribuições e restrições do uso de RSSF no monitoramento contínuo e em tempo real e os trabalhos relacionados.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O monitoramento da qualidade da água (MQA) é o processo de periodicamente amostrar e analisar as condições e características da água. Esse monitoramento é realizado nos mais diversos corpos d'água como, rios, córregos, lagos, lagoas, nascentes, reservatórios, águas subterrâneas ou profundas, águas de cavernas, planícies de inundação, poços e zonas úmidas a fim de garantir a sua utilização por animais e para atividades humanas (ADU-MANU *et al.*, 2017). De acordo com CONAMA (2005) e BRASIL (2017) é estabelecido um limite das concentrações de elementos químicos dependendo da atividade para qual esse corpo d'água se destina. O monitoramento é utilizado para manter/garantir níveis seguros das águas, como água potável, tratamento de água de esgoto residencial ou industrial, administração de aquacultura, plantações e utilizadas em processos industriais.

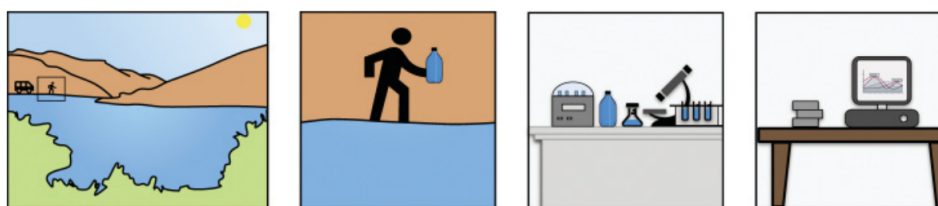
3.1 Monitoramento de Qualidade de Água

Nas últimas décadas, os sistemas de monitoramento de qualidade da água incorporaram outras abordagens além da manual baseada em laboratório: monitoramento manual *in-situ* e monitoramento remoto baseado em RSSF e *Internet das Coisas (IoT, Internet of Things)* (ADU-MANU *et al.*, 2017). O uso dessas e outras abordagens de monitoramento são oportunas devido ao crescente desafio mundial de garantir a qualidade e disponibilidade da água em diversas áreas, não só água potável (DONG *et al.*, 2015).

A abordagem manual de monitoramento baseado em laboratório (Figura 1) é capaz de realizar a análise de todos os aspectos físicos, químicos e biológicos da água especificados nas legislações. Mas essa abordagem possui limitações. Primeiro, são necessários equipamentos especializados e pessoal treinado para avaliar as amostras de água coletadas. Segundo, a abordagem manual de coleta, transporte e análise laboratorial das amostras do corpo d'água a ser estudado, dificulta o monitoramento

em tempo real. Terceiro, o custo dessa abordagem é muito alto em termos de tempo, esforço e investimento de recursos na concepção e implementação desses sistemas. Podemos adicionar o custo de construir as estações (fixas ou móveis) para a coleta de dados, o custo de aquisição do hardware sensor de laboratório e o custo da manutenção desse sistema. Por último, a frequência de amostragem temporal desta abordagem é geralmente baixa, não é suficiente para uma análise extensiva de dados (ADU-MANU *et al.*, 2017).

Figura 1: Abordagem Manual baseada em Laboratório.



Fonte: Adaptada de Adu-Manu *et al.* (2017)

A segunda abordagem, monitoramento manual *in situ*, adiciona novas tecnologias com o intuito de resolver algumas dessas limitações. Novos sensores que utilizam fibra ótica, tecnologia laser, biossensores, sensores ópticos e sistemas mecânicos microeletrônicos (*MEMS*) detectam diversos parâmetros de qualidade da água. Nesta abordagem, o pessoal treinado usa os sensores nos pontos de amostragem para medir um ou mais parâmetros do corpo d'água, como mostrado na Figura 2. A leitura é feita em tempo real a partir do dispositivo de mão conectado ao sensor. O monitoramento contínuo do corpo d'água pode ser alcançado deixando o sensor no local para coletar e armazenar os dados dentro do dispositivo sensor, no entanto, os dados não são enviados automaticamente aos usuários para processamento e visualização (ADU-MANU *et al.*, 2017).

Figura 2: Abordagem Manual *in situ*.

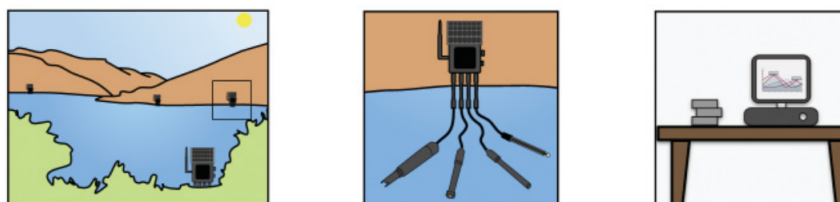


Fonte: Adaptada de Adu-Manu *et al.* (2017)

A terceira abordagem surge com o desenvolvimento das tecnologias de comunicação usadas nas RSSF que permitiu um avanço significativo no

monitoramento de qualidade da água. Primeiro, o sensor *in situ* pôde ser fixado no local para coletar dados de forma contínua, consistente e distribuída (Figura 3). Em segundo, os dados de qualidade da água podem ser processados e visualizados remotamente por usuários finais em tempo real. Além disso, é possível o controle remoto e a configuração do dispositivo sensor (ADU-MANU *et al.*, 2017). Como isso, esses sistema podem disponibilizar um método direto para determinar o status da qualidade da água em tempo real, identificar rapidamente uma tendência potencial de não conformidade da qualidade da água nos estágios iniciais com um aviso antecipado (DONG *et al.*, 2015).

Figura 3: Abordagem baseada em RSSF.



Fonte: Adaptada de Adu-Manu *et al.* (2017)

O *framework* de um sistema MQA baseado em RSSF, geralmente consiste em cinco etapas: aquisição, transmissão, processamento, armazenamento e redistribuição de dados (ADU-MANU *et al.*, 2017). Os parâmetros de qualidade da água são coletados por dispositivos providos de sensores, que transmitem os dados para uma estação base para processamento e armazenamento e exibição.

O sistema de transmissão de dados dos sistemas remotos de monitoramento da qualidade da água utiliza, comumente, redes celular (*GSM/GPRS*) (ZHU *et al.*, 2010; O'FLYNN *et al.*, 2010; DINH *et al.*, 2007; KOTAMÄKI *et al.*, 2009) ou enlaces de dados via satélite (GALLAH *et al.*, 2017). Tecnologias mais recentes também foram utilizadas para configurar redes de sensores sem fio, por exemplo, *ZigBee* é uma das tecnologias mais utilizadas (RASIN; ABDULLAH, 2009; O'FLYRM *et al.*, 2007) e, em menor escala, redes *Wi-Fi* (RAPOUSIS; KATSARAKIS; PAPADOPOULI, 2015).

O armazenamento pode ser através de um *cluster* de servidores local ou usar Computação em Nuvem. A redistribuição de dados é o procedimento pelo qual os dados chegam aos usuários finais, por exemplo, *e-mail*, mensagem de texto, página da *Web* aplicativo móvel. Plataformas com o *ThinkSpeak*¹, *Losant*², *Beebotte*³

¹<<https://thingspeak.com/>>

²<<https://www.losant.com/>>

³<<https://beebotte.com/>>

oferecem serviços de comunicação, armazenamento, exibição e tratamento de dados para soluções IoT baseada em redes de sensores sem fio.

Embora as RSSF tenham sido propostas por vários autores como uma infraestrutura apropriada para sistemas MQA, estas ainda são afetados pelas limitações das tecnologias envolvidas, dificultando uma adoção mais ampla de RSSF no monitoramento ambiental. De acordo com a nossa pesquisa bibliográfica, mecanismos de segurança ainda são um ponto a ser explorado nesta área. Além disso, o aprimoramento de técnicas de coleta de energia que possam sustentar a rede de sensores por períodos de tempo mais longos e aproveitar diferentes fontes de energia renováveis. Por fim, devido ao uso de sensores submersos por longos períodos, a incrustação biológica e o *drift* dos sensores podem comprometer a precisão das leituras obtidas (DONG *et al.*, 2015; ADU-MANU *et al.*, 2017).

Existem outras abordagens de monitoramento de qualidade da água, além dessas três gerações mencionadas acima. Na literatura encontramos, principalmente, o uso de dispositivos autônomos baseados na combinação de robótica e tecnologias RSSF desenvolvidos para esse tipo de monitoramento (DUNBABIN; MARQUES, 2012). Desses, podemos citar a categoria dos Veículos Submarinos Autônomos (*Autonomous Underwater Vehicle- AUVs*) (EICHHORN *et al.*, 2013; ZHAN; CHEN; WANG, 2009) e também a dos Veículos de Superfície Autônomos (*Autonomous Surface Vehicles - ASVs*) (DUNBABIN; GRINHAM, 2010; JADALIHA; CHOI, 2013; MELO, 2017)

Robôs biomiméticos, como peixes robô (SHIN *et al.*, 2007; LIU; WU; YU, 2016), também foram desenvolvidos como um derivado de *AUVs* que apresentam melhor mobilidade sob a água. Os robôs são capazes de fornecer uma melhor cobertura espacial dos dados de qualidade da água com a ajuda de um *GPS* embutido ou sistema de posicionamento sonar do que a utilização de os sensores em pontos fixos. Mas a coleta de energia e a transmissão de dados sem fio ainda são problemáticas, especialmente para a implantação a longo prazo de *AUVs*. A RSSF provavelmente evoluirá para a rede de sensores móveis (LEONARD *et al.*, 2010), devido ao avanço da robótica e de tecnologias relevantes.

O atual esquema de monitoramento de qualidade da água no Brasil é regimentado pela ANA e teve seu início em 2000. Vários locais de amostragem estão sendo monitorados pela abordagem manual de monitoramento baseada em laboratório e alguns pontos utilizam telemetria. Os parâmetros monitorados nestes pontos incluem pH, oxigênio dissolvido, condutividade e temperatura, os demais parâmetros

continuam sendo analisados manualmente em laboratório (ANA, 2016; PNQA, 2016).

Contudo, as informações de qualidade da água no Brasil é marcado por vazios de monitoramento. Isso porque nem todos os estados possuem recursos para monitorar suas águas (PNQA, 2016). Com o uso de sistemas de monitoramento de qualidade da água integrados por RSSF e IoT, é possível ampliar o conhecimento da qualidade das águas para eliminar esses vazios geográficos e temporais no monitoramento. Outra contribuição é facilitar a avaliação, divulgação e disponibilização das informações de qualidade da água à sociedade. Não só os dados brutos, mas também as análises relativas a estes. E um ambiente híbrido, quanto ao uso das abordagens de monitoramento, possibilitaria uma melhor alocação dos recursos (DONG *et al.*, 2015; ADU-MANU *et al.*, 2017).

3.2 RSSF e IoT

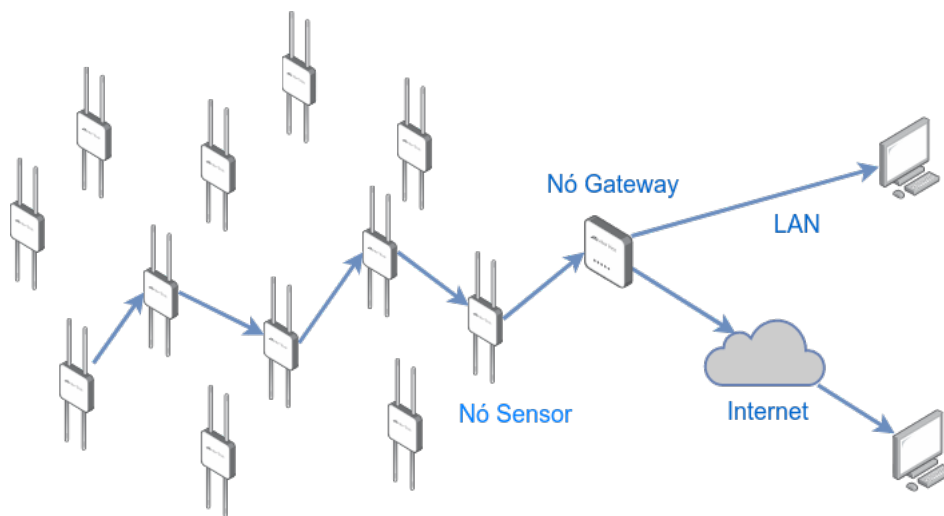
Os termos Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) e Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) gradualmente se tornaram popular nos últimos anos após o desenvolvimento de tecnologias como, telemetria de baixo consumo, Computação em Nuvem, *big data* e inteligência artificial (GUBBI *et al.*, 2013; CHEN; HAN, 2016). Essas tecnologias são vistas como o futuro dos Sistemas Inteligentes de Monitoramento de Qualidade da Água (SIMQA) (DONG *et al.*, 2015).

As RSSF possuem um variado número de aplicações e benefícios. Estão sendo empregadas em vários programas civis, que incluem assistência médica e de saúde, indústria, meio ambiente, vida selvagem, agricultura, logística, casas inteligentes, entre outros. Para citar alguns benefícios temos, segurança e proteção, economia de recursos naturais, preservação de energia em eletrodomésticos e adição de funções em produtos eletrônicos. Mas é dada especial atenção ao monitoramento ambiental (AYAZ *et al.*, 2017).

Na Figura 4 é apresentada uma coleção de sensores distribuídos, onde os dados coletados de cada sensor passam pela rede de nó a nó. Nós sensores são dispositivos de baixo custo, para que possam ser implantados em alto volume. Eles também operam com baixa potência para que possam funcionar com bateria ou mesmo usar a coleta de energia. Um nó *gateway* atua como coordenador da RSSF e como interface entre a rede local e a rede IP através da implementação de protocolos voltados para estes dois ambientes. O nó *gateway* também pode executar

processamento local, fornecer armazenamento local e ter uma interface de usuário.

Figura 4: RSSF.



Fonte: Autor

A *IoT* é um paradigma mais recente que vem mudando a forma como os engenheiros devem lidar com as RSSF. Estas deixam de ser implementações *ad-hoc* específicas, e passam a ser redes onde os nós sensores se conectam à *Internet* por si ou através de um *gateway* para troca de dados de forma colaborativa (CHI *et al.*, 2014; CAPELLA *et al.*, 2016; THAKARE; BORKAR, 2017; ZAKARIA; MICHAEL, 2017).

Um ambiente *IoT* visa estender e integrar dispositivos e objetos através de tecnologias de comunicação heterogêneas, principalmente sem fio. A visão de uma infraestrutura global de objetos físicos em rede nos permite a criação de ambientes inteligentes onde podemos reconhecer, identificar e receber informações destes objetos (KORTUEM *et al.*, 2010; YAQOOB *et al.*, 2017). Embora existam muitas maneiras de descrever uma *IoT*, esta pode ser definida como uma rede mundial descentralizada de objetos providos sensores interconectados unicamente endereçáveis, com base em protocolos de comunicação padrão a fim de compartilhar informações entre dispositivos. Estes operam abaixo de uma camada de *software* que analisa os dados recebidos e gerencia as ações dos dispositivos (MAINETTI; PATRONO; VILEI, 2011).

Assim como as RSSF, *IoT* é útil em muitos cenários civis, como saúde e bem-estar, automação residencial e industrial, eficiência energética aprimorada, medição inteligente e infraestruturas de redes inteligentes, monitoramento e previsão ambiental, gerenciamento de ativos e logística, automação veicular e transporte

inteligente, agricultura de precisão, compras inteligentes, entre outros (GUBBI *et al.*, 2013; YAQOOB *et al.*, 2017; AL-FUQAHA *et al.*, 2015). Embora sejam diversas as aplicações, ainda há desafios a serem vencidos para que haja suporte para o número de objetos esperado - cerca de 50 bilhões até 2020 (YAQOOB *et al.*, 2017).

3.3 Tecnologias de Telemetria

A conectividade sem fio é uma das principais características que possibilita a implantação de redes de sensores em ambientes diversos sem necessitar de supervisão. Há uma variedade de protocolos comunicação desenvolvidos para atuar em ambientes RSSF. Estes são, geralmente, diferentes combinações características, tais como consumo de energia, taxas de dados e alcance.

A Identificação por Radiofrequência (*Radio-Frequency IDentification* - *RFID*) utiliza campos eletromagnéticos para identificar e rastrear automaticamente as etiquetas que contêm informações armazenadas eletronicamente anexadas aos objetos (AHUJA; POTTI, 2010). O *RFID* agora é popularmente usado para rastrear objetos, pessoas e animais, o que, em certa medida, inspirou o conceito de *IoT* (ERGULER, 2015).

O *ZigBee* é um protocolo de comunicação sem fio de curto alcance (10 a 20 m), taxa baixa (20 a 250 kbps), baixo custo e baixo consumo de energia, baseado no padrão *IEEE* 802.15.4. Os dispositivos *ZigBee* podem facilmente formar topologias estrela, ponto a ponto e malha (*mesh*), podendo utilizar criptografia *AES* de 128 bits na comunicação. Uma rede em malha pode transmitir dados por longas distâncias, passando dados através de dispositivos intermediários para alcançar pontos específicos da rede (KINNEY *et al.*, 2003; KOOIJMAN, 2015). As áreas de aplicação do *ZigBee* incluem casas inteligentes, automação predial, sensores embarcados, controle industrial, entre outros.

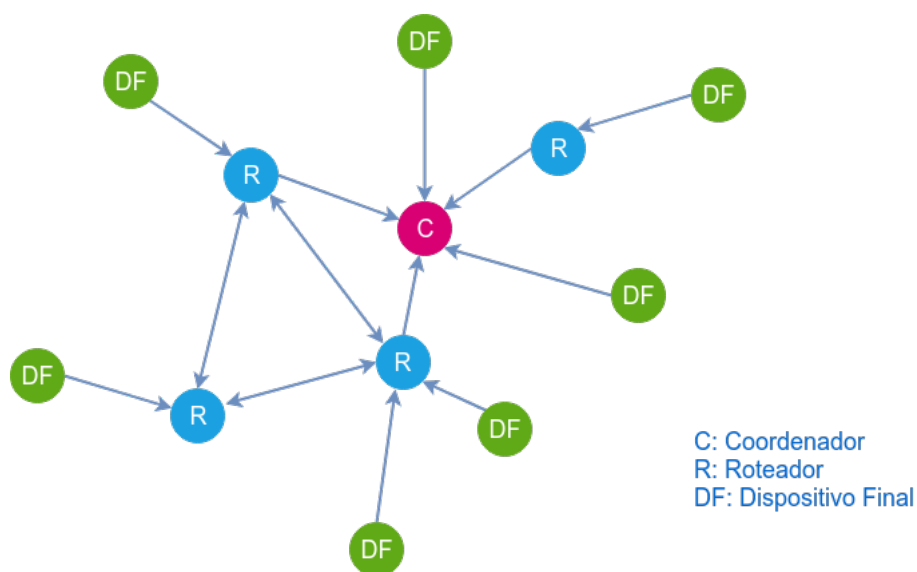
Na Figura 5 é mostrado uma típica topologia *ZigBee*. O protocolo *ZigBee* define 3 tipos de dispositivos, coordenador, roteador e dispositivo final (KINNEY *et al.*, 2003; KOOIJMAN, 2015):

- Coordenador: Inicia uma rede, define de canais e chaves de criptografia e permite que outros dispositivos se juntem a ela. Ele pode funcionar como um roteador (*gateway*) para a rede. Deve ter exatamente um coordenador por rede;
- Roteador: Encaminha os pacotes em nome de outros membros da rede, criando

uma rede em malha (*mesh*). No entanto, para manter essa funcionalidade de roteamento, os roteadores não podem entrar no modo de suspensão e geralmente devem estar ligados à rede elétrica;

- Dispositivo final: é mais limitado, depende de um roteador (ou do coordenador) para rotear suas mensagens para o seu destino. Ao contrário dos roteadores, os dispositivos finais podem adormecer para economizar energia e receber os pacotes destinados a ele que ficaram no *buffer* de outros dispositivos.

Figura 5: Topologia de uma rede *ZigBee* em Malha.



Fonte: Autor

O *Z-Wave* é um protocolo *half-duplex* sem fio de baixa vazão para redes de controle de baixo custo. O *Z-Wave* define dois tipos de dispositivos: controladores e escravos. Os controladores fazem uma varredura ou enviam comandos para os escravos, que retornam uma resposta ou executam comandos solicitados. A topologia utilizada é do tipo malha inteligente sendo necessário um dispositivo *gateway* para comunicação com a Internet (GOMEZ; PARADELLS, 2010).

A *INSTEON* é uma solução baseada em pares para automação residencial desenvolvida pela *SmartLabs* e promovida pela *INSTEON Alliance*. Este fornece uma solução simples e econômica para os dispositivos serem conectados em rede ou em frequência de rádio, ou ambos. Nenhum controlador mestre ou *software* de roteamento complexo é necessário, pois cada dispositivo é projetado como um *peer* para transmitir, receber ou repetir mensagens (INSTEON, 2013).

Wavenis é uma pilha de protocolos sem fio baseada em RF desenvolvida pela *Coronis Systems* para aplicações de controle e monitoramento em vários ambientes, incluindo automação residencial e predial. Ele estende o protocolo *Bluetooth* padrão da indústria para fornecer conexões sem fio seguras e confiáveis com longo alcance e baixo consumo de energia (ANTONOPOULOS *et al.*, 2008).

Há uma tendência de preferência aos protocolos baseados em IP, como *Bluetooth*, *Wi-Fi*, já que estes são amplamente usados em celulares e *notebooks* hoje em dia. O *Wi-Fi* apresenta alta largura de banda, que pode chegar a até 7 Gbps com base no padrão *IEEE 802.11ac* com alcance médio, em torno de 30 a 100 m, mas também vem com ineficácia de alta potência (KELLY, 2014).

O protocolo *6LowPAN* (*IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*, Rede de Área Pessoal Sem Fio de Baixa Potência sobre IPv6) é uma importante solução baseada em IP, pois usa *IPv6* que tem como principal objetivo disponibilizar um número muito maior do que o já esgotado *IPv4*. O padrão tem a liberdade de banda de frequência e camada física e também pode ser usado em múltiplas plataformas de comunicação, incluindo *Ethernet*, *Wi-Fi*, *802.15.4* e *ISM* sub-1GHz (CULLER; CHAKRABARTI, 2009).

Os protocolos mais recentes que estão ganhando cada vez mais espaço são *LoRaWAN* e *NB-IoT*. *LoRaWAN* é uma rede de área ampla de baixa potência (LPWAN) que define o protocolo de comunicação e a arquitetura do sistema para uma rede de LPWAN com base na camada física da *LoRa* patenteada pela *Semtech*. O *LoRaWAN* apresenta uma combinação de longo alcance, baixo consumo de energia e transmissão segura de dados. A faixa de *LoRa* pode atingir até 15 km na área rural e as taxas de dados variam de 0,3 kbps a 50 kbps (WIXTED *et al.*, 2016; ALLIANCE, 2018).

O *NarrowBand IoT* (NB-IoT) é um padrão de tecnologia LPWAN desenvolvido pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) para permitir que futuros dispositivos de *IoT* usem bandas de telecomunicações celulares. O *NB-IoT* oferece ampla cobertura, baixo consumo de energia (duração de bateria de 10 anos) e conexões massivas. A rede celular atual não é a melhor solução para *IoT* para o custo dos dispositivos, bateria de curta duração é inadequada para transmissão de dados pequenos ocasionais. O *NB-IoT* foi projetado e congelado no *Release 13* para superar esses problemas da rede celular atual (HUAWEI, 2018; WANG *et al.*, 2017).

Como novos protocolos ainda estão sendo desenvolvidos para futuras aplicações

de *IoT*, neste trabalho não foi possível abranger todas as tecnologias relevantes, mas apenas um resumo das mais populares.

3.4 Trabalhos Relacionados

A ideia de usar RSSF para o MQA começou no início de 2000 (ADU-MANU *et al.*, 2017), e desde esse momento cresceu o número de implementações do MQA baseadas em RSSF e *IoT*. A maioria dos sistemas propostos são uma implantação parcial do *framework* de MQA. A seguir, são destacadas seis implementações mais relevantes que utilizaram as abordagens baseada em RSSF e com o uso de veículos autônomos descritas anteriormente, os demais trabalhos relacionados contam no Apêndice A.

Em Sun *et al.* (2016) foi implantado um *Data Logger STROM 3* e uma RSSF baseada na tecnologia *NI* para monitorar a qualidade da água na lagoa perto de *John Gray Center* na *Lamar University, Beaumont, Texas*. O *Data Logger* monitorava a temperatura, enquanto a cada nó da RSSF era responsável por outro parâmetro (OD ou pH) a cada hora. Para alimentar o sistema foi utilizado uma bateria de 18 Ah e painel solar de 20 W com um sistema de controle no *Data Logger*. Já os nós da RSSF utilizam duas baterias AA. Não foi especificado a autonomia do sistema. Os dados foram armazenados na plataforma *Storm Central* para visualização e solicitação dos dados coletados.

Em Curiel, Baltazar & Ramírez (2016) foi criado o protótipo de um nó sensor inteligente para monitoramento de pH e temperatura. A RSSF é baseada em *XBee ZigBee* onde os nós sensores estavam conectados a um coordenador *XBee* localizado em um estação base. O *MCU* utilizado foi um *Arduíno Uno* e foi alimentado por uma bateria de 9V. A visualização dos dados foi feito com o auxílio de uma aplicação feita na linguagem *Python*. O desenvolvimento aparenta estar em um estágio inicial sem qualquer menção a testes práticos.

Em Chung & Yoo (2015), módulo de qualidade da água desenvolvido inclui OD, pH, condutividade, turbidez, profundidade da água e temperatura. Os dados de qualidade da água obtidos a cada 1 m e, ao final de 5 minutos, é calculada a média de cada parâmetro. As médias são transferidas para a estação base através do protocolo 802.15.4. O esquema de cálculo de dados projetado reduz o tráfego de dados entre os nós sensores e o estação base e aumenta a eficiência energética nos nós e,

consequentemente, a confiabilidade da transmissão de dados na RSSF. As variações nos dados de qualidade da água podem ser monitoradas eficientemente em tempo real em córregos, rios e áreas costeiras usando o sistema proposto.

A *Libelium* (LIBELIUM, 2016) desenvolveu uma plataforma para monitoramento remoto de qualidade de água. Essa plataforma compreende nós sensores (*waspmotes*) e um nó *gateway* (*meshlium*). Tem a capacidade de operar com várias tecnologias de comunicação local (*XBee*, *Wi-Fi*, *Bluetooth*) e remota (*Ethernet*, *4G*, *GPS*, *Sigfox*, *LoRaWAN*). Os dados coletados podem ser salvos localmente no *meshlium*, em um armazenamento remoto, ou em plataformas *IoT*. Possui uma extensa quantidade de parâmetros que pode ser medidos, a citar pH, OD, ORP, condutividade (salinidade), turbidez, temperatura e íons dissolvidos como fluoreto, cálcio, nitrato, cloreto, iodeto, cuprico, brometo, prata, fluoroborato, amoníaco, lítio, magnésio, nitrito, perclorato, potássio e sódio. A alimentação de energia pode ser utilizado a combinação de painel solar e bateria.

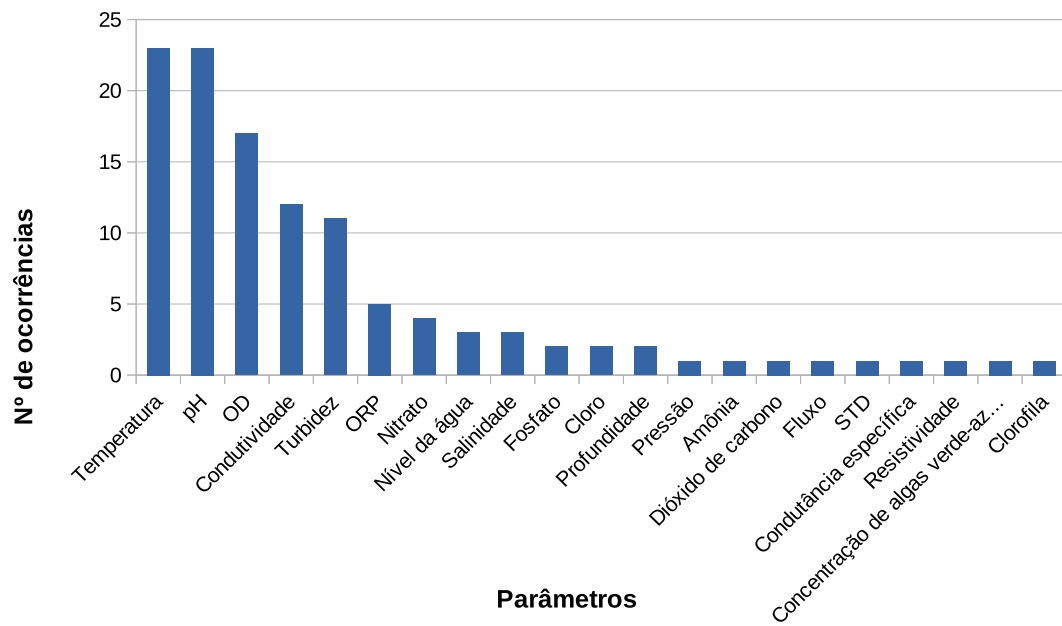
Em âmbito nacional existem trabalhos como o de Melo (2017) que desenvolveu um minibarco robótico para monitoramento de pH, OD, ORP e temperatura em lagoas. O barco autônomo possui *software* embarcado para controle e configuração de missões e pontos a serem amostrados através de GPS. O sistema foi alimentado por uma bateria 7 A/h. O envio dos dados e comunicação com a estação base ocorre por meio de um enlace *Wi-Fi*. O barco operou de forma esperada com pequenos desvios das rotas traçadas.

Ito (2016) desenvolveu um RSSF para monitoramento da concentração de cloro da rede de distribuição de água. A rede local criada usando a tecnologia *ZigBee* para obtenção dos dados em tempo real. Os dados foram armazenados e analisado na central de monitoramento local. Foram feitos testes de leitura com intervalos de 10, 15 e 20 min. O sistema proposto apresentou resultados próximo ao do modelo numérico de modelagem da qualidade da água da universidade num período de três anos.

Com base nos trabalhos utilizados, resumidos na Tabela 18, foi percebido alguns detalhes que foram usados como guia de construção do protótipo proposto. A Figura 6 auxiliou na escolha dos sensores a serem utilizados. Os parâmetros de temperatura, pH, OD, condutividade, turbidez e *ORP* foram os mais utilizados nos trabalhos mais recentes. A Figura 7 deixa clara a popularidade do protocolo *ZigBee* para criação de RSSF no MQA. Cenário que deve sofrer alteração devido ao avanço de tecnologias voltadas para *IoT*. Nos trabalhos relacionados podemos perceber uma frequência

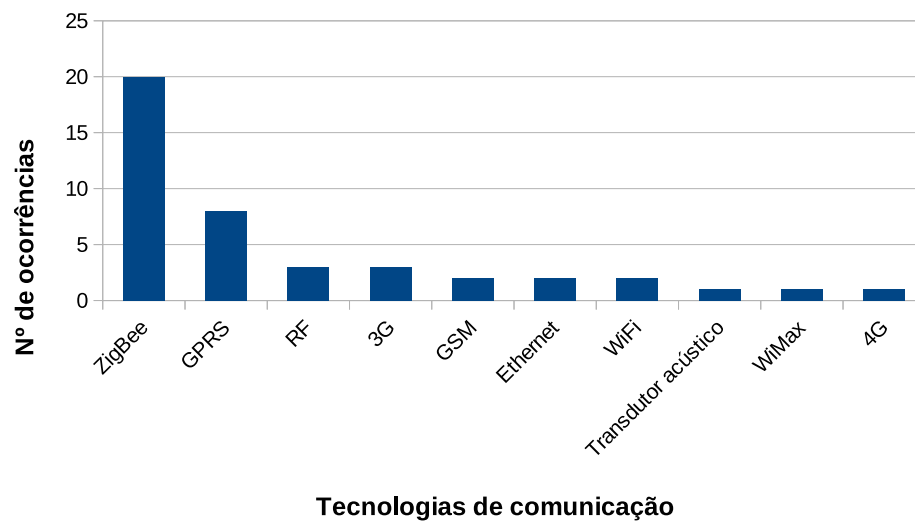
amostral na casa dos 15 a 20 min.

Figura 6: Número de ocorrências de parâmetros de qualidade nos trabalhos relacionados.



Fonte: Autor

Figura 7: Número de ocorrências de tecnologias de comunicação nos trabalhos relacionados.



Fonte: Autor

3.5 Conclusões

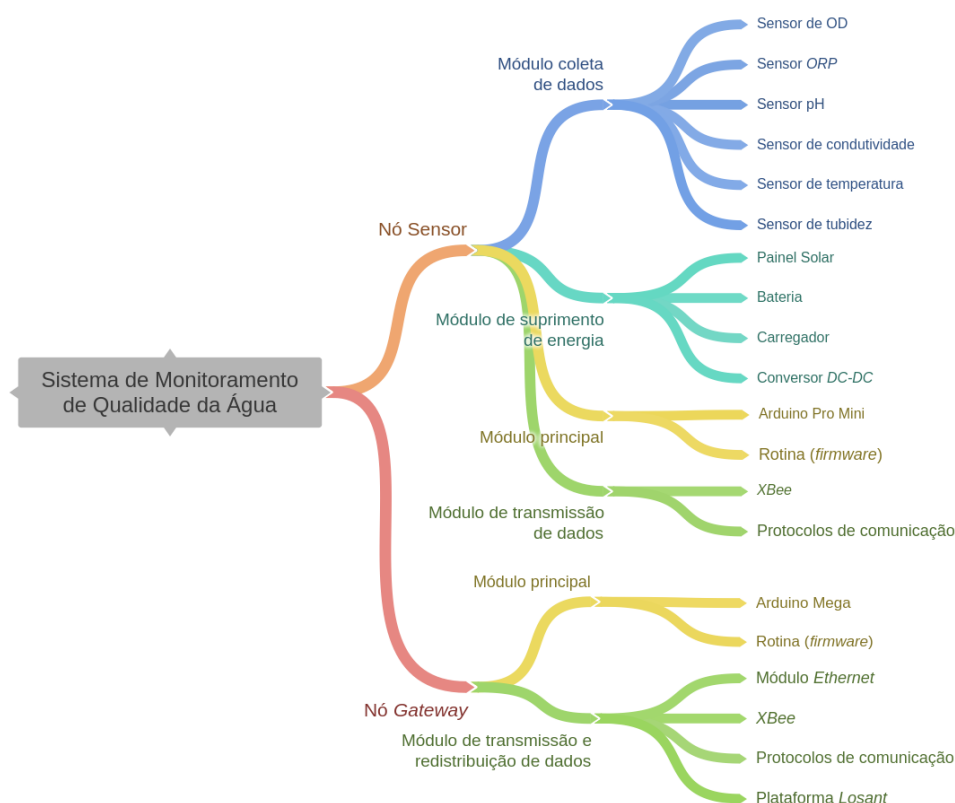
Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica das abordagens relacionadas ao monitoramento de qualidade da água. Apesar de as abordagens baseadas em RSSF serem vistas como uma evolução do sistema manual, ainda não conseguem substituí-lo por completo. Abordagens utilizando veículos autônomos é Posteriormente foi discutido sobre a importância das RSSF, *IoT* e as tecnologias de comunicação mais relevantes. Finalizamos com uma análise das implementações mais recentes de SMQA e sua influência no sistema proposto.

No próximo capítulo será discutido em maiores detalhes todo o material utilizados na construção do protótipo proposto. Serão apresentados os protocolos, bibliotecas e as rotinas utilizados na composição de um sistema MQA que o *framework* aqui apresentado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo de metodologia será apresentada a concepção do sistema de monitoramento de qualidade da água proposto e quais os componentes utilizados, como mostra a Figura 8. Primeiro, o sistema de monitoramento foi dividido em módulos: principal, de coleta de dados, de fornecimento de energia e de transmissão de dados. Em seguida, é explicada a relação entre os módulos dentro estrutura do sistema de monitoramento. A construção e validação do protótipo proposto é fundamentada na estrutura de monitoramento de qualidade de água baseada em RSSF de Adu-Manu *et al.* (2017).

Figura 8: Sistema MQA proposto e seus componentes.



Fonte: Próprio autor/GDESTE/PPGET.

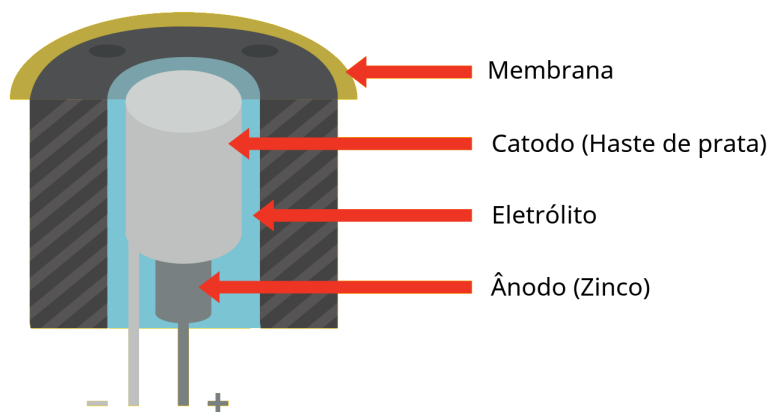
4.1 Módulo de Coleta de Dados

Para o trabalho foram adquiridos sondas e circuitos sensores no intuito de serem obtidos resultados mais precisos dos parâmetros escolhidos para serem monitorados. As sondas supracitadas são responsáveis por traduzir grandezas analógicas da água para dados digitais substituindo as etapas manuais de amostragem, transporte e análise. Dentre os parâmetros mais comuns utilizados na literatura arbitramos pelos seguintes: oxigênio dissolvido, potencial de oxirredução, pH, condutividade, temperatura e turbidez. A seguir, será abordado cada um dos sensores utilizados.

4.1.1 Sensor de Oxigênio Dissolvido

A sonda galvânica de oxigênio dissolvido utilizada consiste em uma membrana de politetrafluoretileno, um ânodo banhado em um eletrólito e um catodo. A membrana exerce controle na taxa em que a reação do oxigênio com a solução de eletrólito. Uma pequena voltagem é produzida nessa reação. Assim, se não houverem moléculas de oxigênio presentes, a sonda não nenhuma tensão na saída. À medida que o oxigênio aumenta, a voltagem nas saída da sonda também aumenta (ATLAS, 2017). A Figura 9 demonstra as partes da sonda de oxigênio dissolvido.

Figura 9: Sonda de Oxigênio Dissolvido.



Fonte: Adaptada de Atlas (2017)

O sensor de oxigênio dissolvido da Atlas Scientific® opera em uma faixa de leitura de 0,01 a 100 mg/L, com precisão de leitura +/- 0,05 mg/L. Sua responsividade é de uma leitura por segundo e é compatível com quaisquer sondas galvânicas. As leituras podem ser compensadas através da temperatura, salinidade e pressão a depender

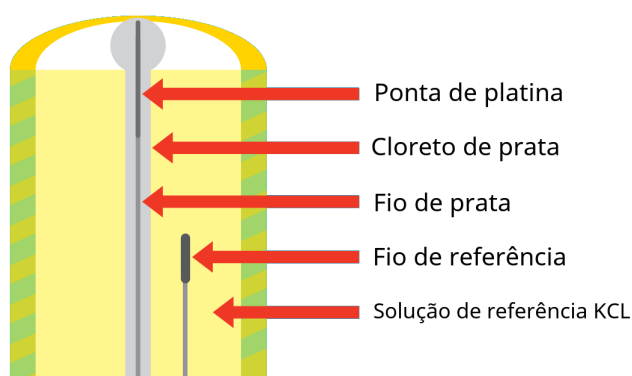
do ambiente onde a sonda está imersa. Possui suporte a um ou dois pontos de calibração. A comunicação é feita através dos protocolos *UART* e *I2C*. Os dados obtidos são enviados em formato *ASCII*. Opera com tensões de 3,3 V a 5 V com consumo máximo de 13,5 mA a 5 V (ATLAS, 2017).

4.1.2 Sensor de Potencial de Oxirredução

Oxidação é a perda de elétrons e redução é o ganho de elétrons. Nesse sentido, podemos inferir que a sonda mede a atividade de elétrons em um líquido. As leituras de *ORP* representa quão forte é o ganho ou a perda de elétrons em um líquido. As leituras são representadas em milivolts e podem ser positivas ou negativas. Apesar disso, essas leituras não indicam a quantidade de elétrons disponíveis para transferir (ATLAS, 2017).

A Figura 10 demonstra as partes da sonda de *ORP*. Na sonda há uma ponta de platina conectada a um fio de prata, cercada por cloreto de prata. Esse fio de prata é então conectado a uma solução de referência de cloreto de potássio (KCL). A platina é um metal não-reativo, assim ele pode ser usado para observar a atividade eletrônica do líquido sem participar de qualquer reação que esteja ocorrendo (ATLAS, 2017).

Figura 10: Sonda de Potencial de Oxirredução.



Fonte: Adaptada de Atlas (2017)

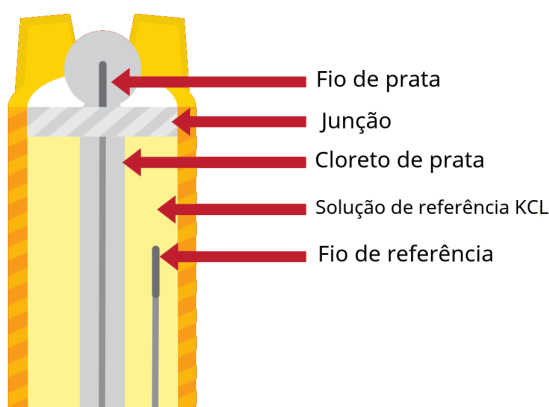
O sensor de potencial de *ORP* da Atlas Scientific® opera em uma faixa de leitura de -1019,9 mV até 1019,9 mV, com precisão de leitura +/- 1 mV. Sua responsividade é de uma leitura por segundo e é compatível com sondas de quaisquer fabricantes. Possui somente um ponto de calibração. A comunicação é realizada através dos protocolos *UART* e *I2C*. Os dados obtidos são enviados em formato *ASCII*. Opera

com tensões de 3,3 V a 5 V com consumo máximo de 18,3 mA a 5 V (ATLAS, 2017).

4.1.3 Sensor de Potencial Hidrogeniônico

A sonda pH (Figura 11) mede a atividade de íons hidrogênio em um líquido. Na ponta da sonda está localizada uma membrana de vidro. Os íons de H^+ vão se acumulando na membrana, formando uma diferença iônica entre a solução da amostra e a solução de referência de cloreto de potássio (KCL). Uma corrente muito pequena gerada pela diferença de concentração dos íons de hidrogênio (externos e internos a sonda). Esta corrente é proporcional a concentração de íons de hidrogênio no líquido medido (ATLAS, 2017).

Figura 11: Sonda de Potencial Hidrogeniônico.



Fonte: Adaptada de Atlas (2017)

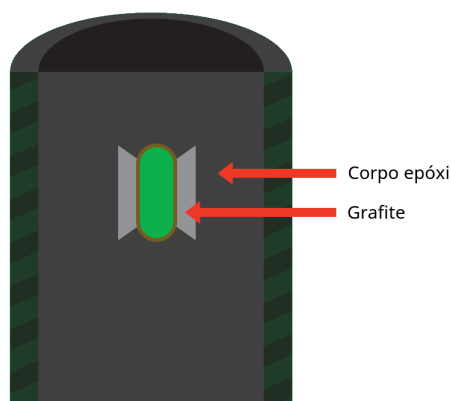
O sensor de pH da Atlas Scientific® opera em uma faixa de leitura de 0,001 - 14,000, com precisão de leitura $\pm 0,002$. Sua responsividade é de uma leitura por segundo e suporta sondas de quaisquer fabricantes. As leituras podem ser compensadas através da temperatura. Possui suporte a um, dois ou três pontos de calibração. A comunicação é feita através dos protocolos *UART* e *I2C*. Os dados obtidos são enviados em formato *ASCII*. Opera com tensões de 3,3 V a 5 V com consumo máximo de 18,3 mA a 5 V (ATLAS, 2017).

4.1.4 Sensor de Condutividade

Esta sonda (Figura 12) é responsável por medir a condutividade elétrica em uma solução. Dentro da sonda de condutividade, dois eletrodos estão posicionados

opostos um do outro e é aplicada uma tensão aos eletrodos. Isso faz com que os cátions se movam para o eletrodo carregado negativamente, enquanto os ânions se movem para o eletrodo positivo. Quanto mais eletrólitos o líquido contém, maior a condutividade elétrica.

Figura 12: Sonda de Condutividade.



Fonte: Adaptada de Atlas (2017)

O sensor de condutividade da Atlas Scientific® opera em uma faixa de leitura de 0,07 até 500.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com precisão de leitura $\pm 2\%$. Sua responsividade é de uma leitura por segundo e suporta sondas K0,1, K1 e K10 de quaisquer fabricantes. As leituras podem ser compensadas através da temperatura. Possui suporte a dois ou três pontos de calibração. Comunicação através dos protocolos *UART* e *I2C*. A leitura pode retornar o total de sólidos dissolvidos, salinidade e gravidade específica em águas marítimas, além da condutividade elétrica. Os dados obtidos são enviados em formato *ASCII*. Opera com tensões de 3,3 V a 5 V com consumo máximo de 50 mA a 5 V (ATLAS, 2017).

4.1.5 Sonda de Temperatura

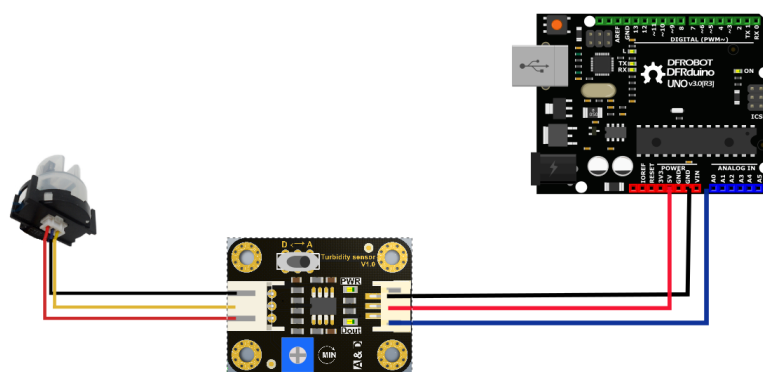
O monitoramento da temperatura da água é fundamental para a calibração dos sensores de pH, OD e condutividade, mas também para a compensação da variação da temperatura durante o dia. Assim, o sensor escolhido para o projeto teve que ser a prova d'água. O sensor de temperatura DS18B20 (Figura 13), além dessa característica, possui uma precisão aceitável ($\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$). O DS18B20 utiliza o protocolo *OneWire* que possibilita o uso de até 126 dispositivos transmitindo os dados por um único fio.

Figura 13: Sonda de Temperatura.

Fonte: Quick-teck (2014)

4.1.6 Sensor de Turbidez

O sensor de turbidez (Figura 14) usa luz para detectar partículas suspensas na água, medindo a taxa de transmissão e de espalhamento da luz, que muda com a quantidade de sólidos suspensos totais (SST) na água. Conforme o SST aumenta, o nível de turbidez do líquido aumenta. No nosso trabalho utilizamos um modelo de sensor de turbidez baseado em atenuação. Ele é comumente utilizado por máquinas de lavar para detectar o nível de sujeira durante uma operação.

Figura 14: Conexão Sonda de Turbidez SEN0189.

Fonte: DFRobot (2018)

O sensor de turbidez SEN0189 opera em um faixa de temperatura de 5°C a 90°C. Sua responsividade é de, aproximadamente, duas leituras por segundo. O sensor opera em dois modos: analógico e digital. No modo digital, opera com sinal de nível

alto/baixo que tem o seu limiar ajustado através de um potenciômetro. No modo analógico, opera com tensão de 5 V e consumo máximo de 40 mA. A calibração deve ser conduzida com líquidos de diferentes NTUs para obtenção da curva da relação tensão x NTU (DFROBOT, 2018).

4.2 Módulo de Suprimento de Energia

Ao tratarmos do suprimento de energia, em nosso trabalho, utilizamos um painel solar, um circuito carregador, bateria *LiPo* e um conversor *DC-DC step up* para garantir que todo o projeto fosse alimentado com 5 V. O sistema todo poderia operar na faixa de 3,3 V, mas os requisitos de operação do sensor de turbidez não nos permitiu. Esse módulo é importante para o projeto, pois um fornecimento de energia de qualidade durante o tempo de vida da rede nos permite, além de autonomia e mobilidade, obtenção de leituras precisas dos sensores e que não haja ruptura na rede por desligamento de um dos nós (??).

4.2.1 Módulo fotovoltaico

O uso de um módulo fotovoltaico para colheita de energia era a única opção disponível e a mais viável (Figura 15) . Foi escolhido um módulo policristalino que possui tensão e corrente de saída de 5,5 V e 270 mA, respectivamente. O tempo total de carregamento da bateria é, aproximadamente, de 9 horas. Devido à taxa de amostragem adotada e às técnicas de economia de energia aplicadas nos sensores, *XBee* e no módulo principal, a bateria não descarregará completamente durante o período em que não haja incidência de raios solares no local de implantação do nó sensor.

4.2.2 Bateria

Para atender as necessidades de armazenamento de energia do projeto foi utilizada uma bateria *LiPo* de 3,7 V e 2.200 mAh. As baterias *LiPo* são leves, são tolerantes a taxas elevadas de descarga e têm uma densidade de potência maior do que outros tipos de baterias. A maioria das baterias de *LiPo* vem com um circuito de proteção que mantém a bateria operando com segurança (ADAFRUIT, 2018). A bateria é mostrada na Figura 16 utilizada no projeto.

Figura 15: Módulo fotovoltaico.

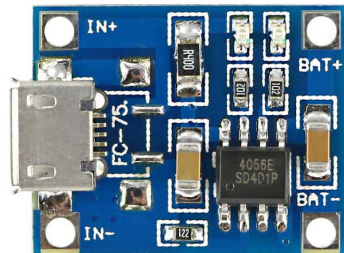
Fonte: Próprio autor/GDESTE/PPGET.

Figura 16: Bateria *LiPo*.

Fonte: Próprio autor/GDESTE/PPGET.

4.2.3 Carregador

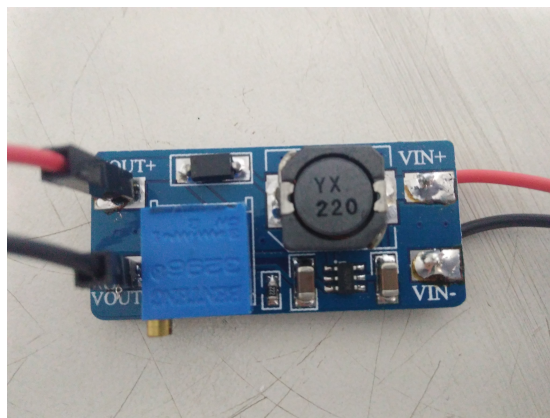
Quanto ao módulo carregador TP4056, representado na Figura 17, podemos afirmar que o mesmo é apropriado para carregamento da bateria de lítio utilizadas no projeto. A alimentação do módulo pode ser feita pela rede elétrica, através do cabo mini *USB* ou utilizando os terminais do circuito *IN+* e *IN-*. Em nosso trabalho conectamos o módulo fotovoltaico nos terminais *IN+* e *IN-*. Os módulos a serem alimentados pela bateria ficam conectados nos terminais *B+* e *B-*. O carregador utiliza um circuito integrado (CI) controlador TP4056, com tensão de operação de 5 V e tensão de corte na saída de 4,2 V (FILIPEFLOP, 2018).

Figura 17: Carregador TP4056.

Fonte: Filipeflop (2018)

4.2.4 Conversor de tensão *DC-DC*

Para entregar uma tensão estável de 5V que atenda a necessidade dos sensores do projeto e evitar o uso do regulador de tensão embarcado do Arduino Pro Mini, utilizamos um módulo conversor de tensão *DC-DC* para todo o sistema. Este módulo ajustável utiliza um regulador MT3608 e opera com tensões de entrada de 2 a 24 V. Oferece na sua saída tensões de 2,5 a 28 V, com eficiência de 91%, por meio de ajuste manual de um *trimpot*. No projeto a tensão de 3,7 V da bateria foi ajustada para 5 V com o uso deste módulo.

Figura 18: Conversor de Tensão MT3608.

Fonte: Próprio autor/GDESTE/PPGET.

Na Figura 19 podemos ver todo sistema montado em testes de laboratório.

Figura 19: Módulo de suprimento de energia.

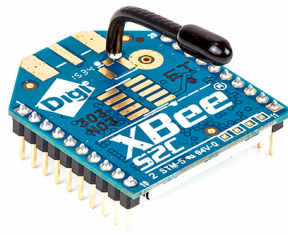
Fonte: Próprio autor/GDESTE/PPGET.

4.3 Módulo de Transmissão de Dados

Dentre as tecnologias de transmissão local mais utilizadas como *ZigBee*, *Bluetooth Low Energy*, *WiFi* e *WiFi Direct* optamos pelo uso de *ZigBee* por ter baixo custo, menor consumo de energia, possibilidade de um número elevado de nós, distância variada de acordo com o modelo de rádio utilizado e biblioteca aberta de fácil configuração e implantação. Para comunicação entre a rede local e a plataforma em nuvem foi utilizado módulo *Ethernet* para o *Arduíno* por ter um menor uso de recursos com biblioteca de fácil configuração e manutenção do enlace. O enlace *Ethernet* é mais confiável para testes do que o uso do *Wi-Fi* disponível (DIGI, 2018a; KOOIJMAN, 2015).

Os módulos *ZigBee* utilizados neste trabalho foram os *XBee S2C* para comunicação entre os nós sensores e o nó *gateway*, como podem ser vistos na Figura 20. Os módulos *XBee S2C ZigBee* são fáceis de usar, suportados por bibliotecas do *Arduíno* e não são muito caros. O *ZigBee* é uma camada em cima do protocolo *IEEE 802.15.4* que adiciona roteamento em malha e recursos adicionais de gerenciamento da rede. O módulo também utiliza uma interface *SPI* de alta velocidade facilita a integração com microcontroladores e reduz o tempo de desenvolvimento do projeto (DIGI, 2018a; KOOIJMAN, 2015).

Todos os módulos possuem os mesmos parâmetros *Personal Area Network Identifier* (ID), *API (Application Programming Interface) Enable* (AP), *Encryption Enable* (EE), *Encryption Key* (KY) configurados. A única exceção é o nó *gateway* que possui o parâmetro *Coordinator Enable* (CE), pois ele é o coordenador da rede *ZigBee*.

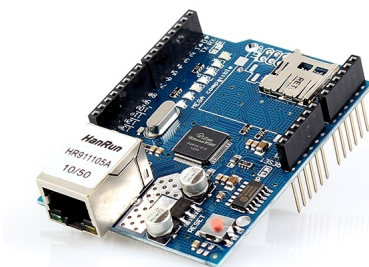
Figura 20: Módulo XBee.

Fonte: Filipeflop (2018)

O parâmetro *ID* é o mesmo *PAN ID* que utiliza 4 bytes para representar o identificador da rede. Esse parâmetro evita que o nó se conecte a outras redes aleatoriamente. O parâmetro *AP* habilita o modo *API* que permite uso de quadros de propósitos variados, facilitando a transmissão entre vários módulos e a identificação da origem e destino dos dados. Ao habilitar o parâmetro *EE* os pacotes são criptografados e passados em um código de integridade. No parâmetro *KY* é criada uma chave utilizada para prevenir que módulos que não a possuem conectem-se à rede (DIGI, 2018a; KOOIJMAN, 2015).

A configuração do módulo *Xbee S2C ZigBee* pode ser feita através do *software* gratuito *Digi X-CTU* (DIGI, 2018b), ou por meio de comandos *AT*. Utilizamos o *XBee USB Explorer*, como interface de comunicação com o *software X-CTU*, na versão 6.3.0, disponibilizado gratuitamente pela *DIGI International Inc*.

Com a finalidade de transmitir os dados coletados pelos nós sensores para a plataforma em Nuvem para fins de armazenamento, visualização e análise foi utilizado um módulo *Ethernet* para Arduíno. O módulo *Ethernet W5100*, representado na Figura 21, foi utilizado para esse propósito. O W5100 é um controlador *Ethernet* 10/100 compatível com *IEEE* 802.3 10BASE-T e 802.3u 100BASE-TX. Dessa maneira, o acesso à *Internet* foi adicionado ao Arduíno sem a necessidade de um sistema operacional (WIZNET, 2010).

Figura 21: Arduino *Ethernet Shield*.

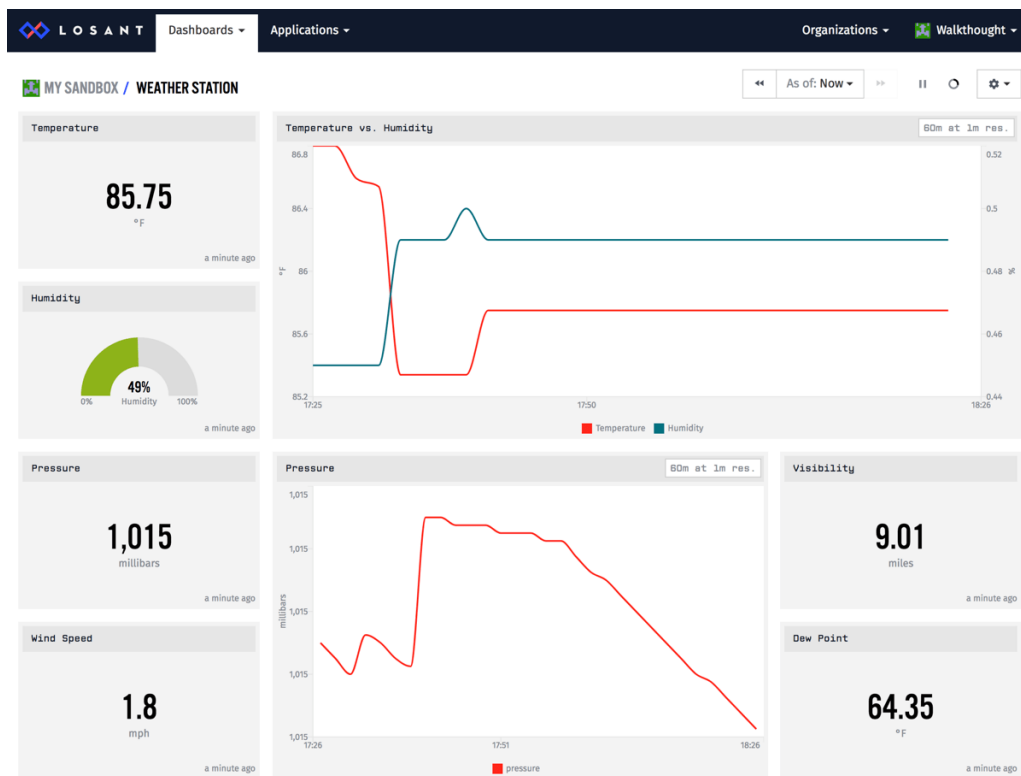
Fonte: Filipeflop (2018)

4.4 Módulo de Redistribuição de Dados

A redistribuição de dados é o processo para tornar disponíveis para aplicação externa, como uma plataforma *on-line* baseada em Nuvem, os dados coletados da sonda de qualidade da água. Uma plataforma *on-line* oferece acesso instantâneo, 24/7 aos dados do projeto por meio de qualquer navegador da web ou de uma Interface de Programação de Aplicativos (*API*).

Dentre as plataformas testadas, a *Losant* foi a que se apresentou mais vantajosa, pois possui várias de suas características gratuitas para uso por tempo indeterminado. A *Losant* usa padrões de comunicação abertos, como *REST* e *MQTT*, para fornecer conectividade com os seus serviços. Os dados coletados podem gerar avisos, ou disparar um comando para um outro dispositivo. Além da visualização dos dados individuais de um dispositivo, como pode ser observado na Figura 22, é possível agregar os dados de vários sensores e obter uma média de um determinado conjunto, ou região. Essa troca de dados e informações é feita com o auxílio de chaves que garantem criptografar totalmente todos os dados em trânsito, bem como em repouso (LOSANT, 2018b).

Figura 22: Losant Dashboard.



Fonte: Losant (2018b)

Esse serviço de gerenciamento de dados permite que os usuários autorizados acessem os dados coletados em tempo real. Além de qualquer informação específica do projeto, a interface *on-line* pode fornecer mapas de área dinâmica, sobrepostos com informações sobre o tempo, dados recentes e históricos, gráficos de séries temporais e sumários estatísticos. Os visitantes podem interagir com os mapas do projeto e visualizar dados de monitoramento em tempo real ou tendências de parâmetros ao longo do tempo.

4.5 Módulo Principal

A concepção da rede de sensores sem fio proposta nesta pesquisa foi elaborada a partir do uso de uma plataforma de prototipagem código aberto acessível, como a Arduino. O objetivo do módulo principal, no nó sensor, é realizar um procedimento de coleta na ordem mais apropriada, empacotar os dados e encaminhá-los para o nó *gateway*. Após realizar as tarefas, o módulo deve entrar em hibernação economizando o máximo de energia possível até o fim do intervalo. No caso do nó *gateway*, o

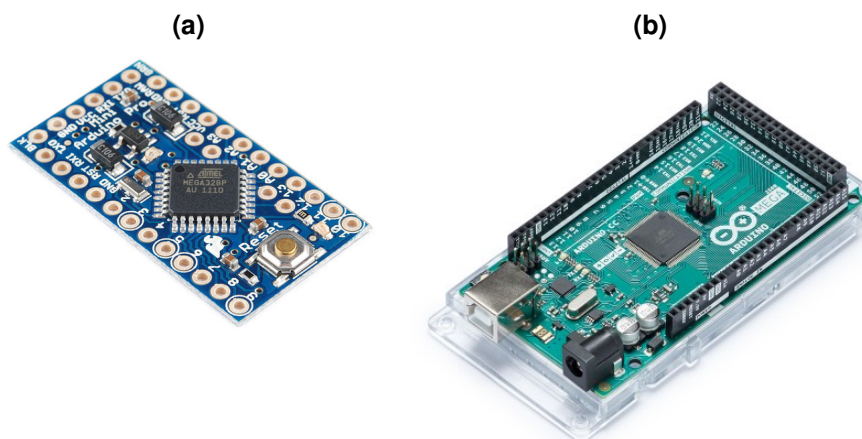
objetivo é receber os dados dos diversos nós sensores e encaminhá-los para seções específicas de cada nó sensor dentro da plataforma *Losant*.

4.5.1 Plataforma Arduino

Arduino é uma plataforma código aberto que pode ser programada para processar entradas e saídas entre o dispositivo e componentes externos conectados a ele. A escolha pelo seu uso no trabalho ocorreu pelo custo de aquisição menor que as demais plataformas e, ainda, por possuir bibliotecas, *softwares* e hardware código aberto. Suas aplicações são as mais diversas podendo ser utilizado, inclusive, na prototipação de sistemas embarcados (ARDUINO, 2017).

A versão do Arduino escolhida para o nó sensor foi o Arduino Pro Mini como mostrado na Figura 23. O Arduino Pro Mini é uma plataforma baseada no microcontrolador ATmega328. Possui 14 pinos de entrada e saída digitais (sendo que 6 desses pinos podem ser usados como saídas *PWM*), 6 entradas analógicas, um ressonador integrado. O Arduino Pro Mini possui duas versões onde uma opera em 3.3 V e 8 MHz, e a outra em 5 V e 16 MHz. A comunicação USB com o Pro Mini é possível através de um conector de seis pinos conectado a um cabo *FTDI* (ARDUINO, 2017).

Figura 23: Arduínos utilizados no projeto: (a) Pro Mini, (b) Mega 2560.



Fonte: Arduino (2017)

O Arduino é uma das maiores fontes de consumo de energia dentro desse trabalho. No caso, da escolha pela versão Pro Mini do Arduino se deu pela possibilidade de usar um hardware que trabalhasse com outras voltagens e

frequências mais baixas e possuísse menos componentes. O Arduíno Pro Mini não possui uma conexão USB própria e usa um regulador mais eficiente. Embora haja um *LED* de atividade presente, ele tem um resistor de 10 k Ω e assim o consumo de energia fica abaixo de 0,3 mA. No Pro Mini há a opção de um *jumper* de solda para desconectar tanto o regulador quanto o LED de energia para economia máxima quando o regulador não estiver sendo usado.

No nó *gateway* foi utilizado o Arduíno Mega, como mostrado na Figura 23. Este, utiliza processador ATmega1280 com *clock* de 16 MHz que incorpora maior capacidade de memória e entrada e saída de dados. Apresenta, ainda características, como 54 pinos E/S digitais (14 destes podendo ser utilizados como saída *PWM*) além de 16 entradas analógicas. A memória *SRAM* é de 8 kB a *EEPROM* 4 kB e a Memória *Flash* de 128 kB (ARDUINO, 2017). Embora seja um nó mais simples, o nó coordenador precisava de memória suficiente para o uso das bibliotecas necessárias para o módulo *Ethernet* e para gerenciar a comunicação com a plataforma *Losant* (LOSANT, 2018b). As características principais dos Arduínos utilizados no projeto são mostradas na Tabela 12.

Tabela 12: Características dos Arduínos Pro Mini e Mega.

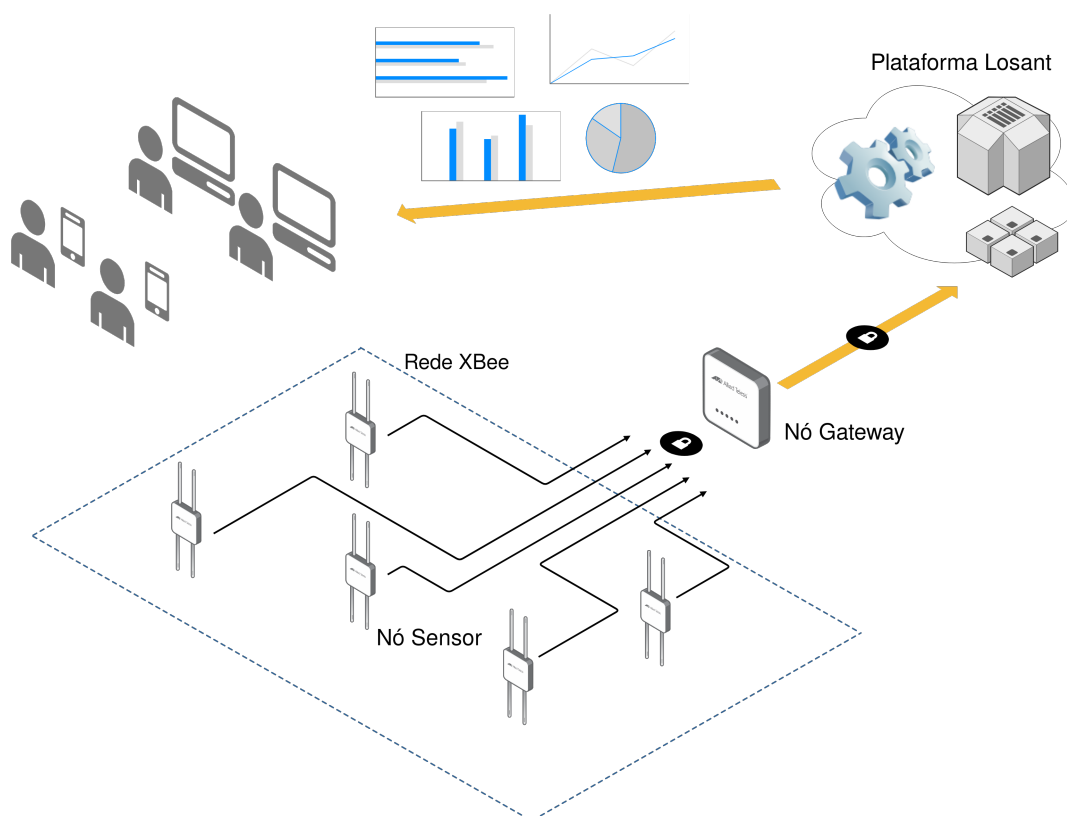
Características	Pro Mini	Mega
Microcontrolador	ATmega328	ATmega1280
Tensão de entrada	3,35 -12 V ou 5 - 12 V	7 - 12 V
Tensão de operação	3,3 ou 5 V	5 V
Pinos digitais de E/S	14	54
Pinos PWM	6	15
UART	1	4
SPI	1	1
I2C	1	1
Pinos analógicos de entrada	6	16
Corrente DC por pino E/S	40 mA	20 mA ou 50 mA
Memória Flash	32 kB	256 kB
SRAM	2 kB	8 kB
EEPROM	1 kB	4 kB
Clock	8 MHz ou 16 MHz	16 MHz

Fonte: Arduino (2017)

4.6 Arquitetura do Sistema Monitoramento de Qualidade da Água

Nossa arquitetura proposta é composta de três componentes básicos: nó sensor, nó *gateway* e a plataforma em Nuvem. Os três componentes utilizam os módulos apresentados anteriormente para compor a estrutura da arquitetura de monitoramento de qualidade da água baseado em RSSF. A Figura 24 representa a relação entre os componentes básicos dentro da arquitetura sugerida para rede. A primeira etapa de aquisição, processamento e transferência de dados é feita pela rede ZigBee até os dados saírem do nó *gateway* para a plataforma *Losant*. A segunda etapa de análise, armazenamento e redistribuição dos dados é feita pela plataforma *Losant*.

Figura 24: Arquitetura SMQA/RSSF.



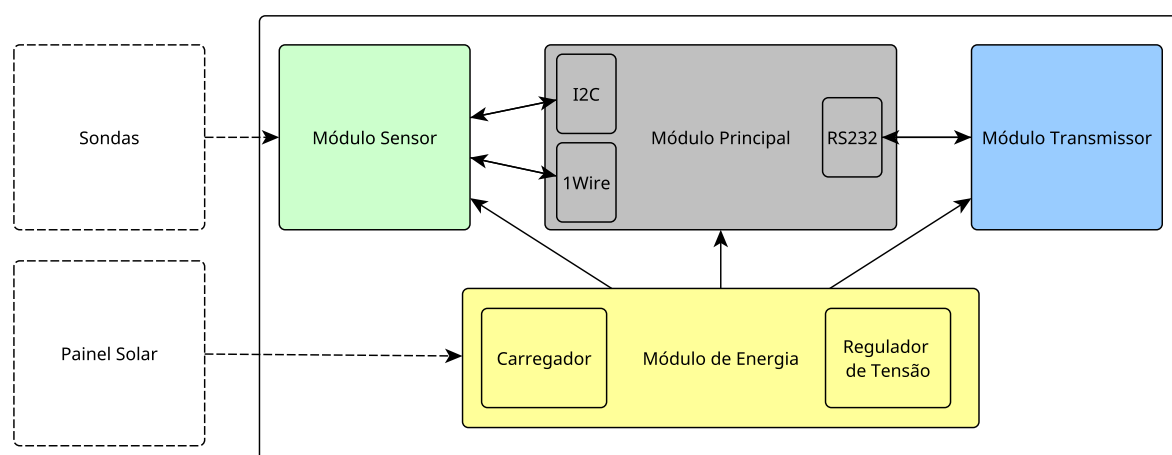
Fonte: Próprio autor/GDESTE/PPGET.

A prototipação dos nós sensor e *gateway* e os teste iniciais foram realizados no Laboratório do Grupo de Desenvolvimento de Sistemas de Telecomunicações e Sistemas Embarcados (GDeste) do Instituto Federal do Ceará, *campus* Fortaleza (GDESTE, 2018). O GDeste desenvolve trabalhos em Sistemas de Telecomunicações, Sistemas Embarcados, Prototipagem de Circuitos Impressos, Sistemas Web, Web

Design, Aplicações para Dispositivos Móveis e Simulações Numéricas.

A Figura 25 mostra a arquitetura proposta para o nó sensor. Os sensores de OD, ORP, pH e CE utilizam o protocolo *I2C* para comunicação com o módulo principal. Este protocolo utiliza um canal com dois fios para *clock* e transferência de dados. As requisições de leitura são enviadas de forma individual para cada sensor. Os sensores de temperatura utilizam o protocolo *OneWire*. Este, similar ao protocolo *I2C*, utiliza um único fio para envio de requisições e respostas, mas sem a necessidade de *clock*.

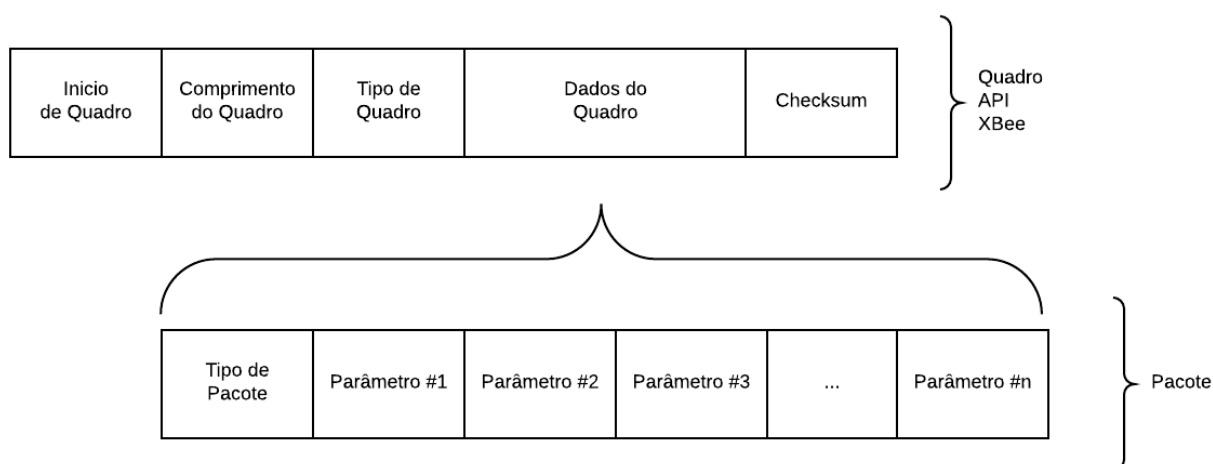
Figura 25: Esquemático Nó sensor.



Fonte: Próprio autor/GDESTE/PPGET.

O módulo de transmissão de dados é composto pelo módulo *XBee S2C*. Ele é responsável pelo envio dos dados coletados pelo nó sensor para o nó *gateway* da rede. A topologia estrela foi utilizada no projeto visando a economia de energia, pois pode ser aplicada desligando os módulos *XBee* fazendo-os operar como um dispositivo final. Os módulos *XBee* foram configurados no modo *API* para utilização de quadros que facilitam o envio dos dados para um destino específico e a descoberta da origem dos dados recebidos.

Os dados coletados pelo nó sensor são organizados em um pacote que consiste de um cabeçalho simples de verificação e os valores dos parâmetros analisados. Este pacote é encapsulado no quadro *API* gerado pela biblioteca *XBee.h* do Arduino e transmitido para o nó *gateway* da rede para o tratamento desses dados, como mostra a Figura 26. A comunicação do módulo de transmissão e o módulo principal é feita através do protocolo *RS232* e a biblioteca *XBee.h* para criação, gerenciamento e depuração de quadros na comunicação da rede *XBee*.

Figura 26: Quadro API com pacote de qualidade de água.

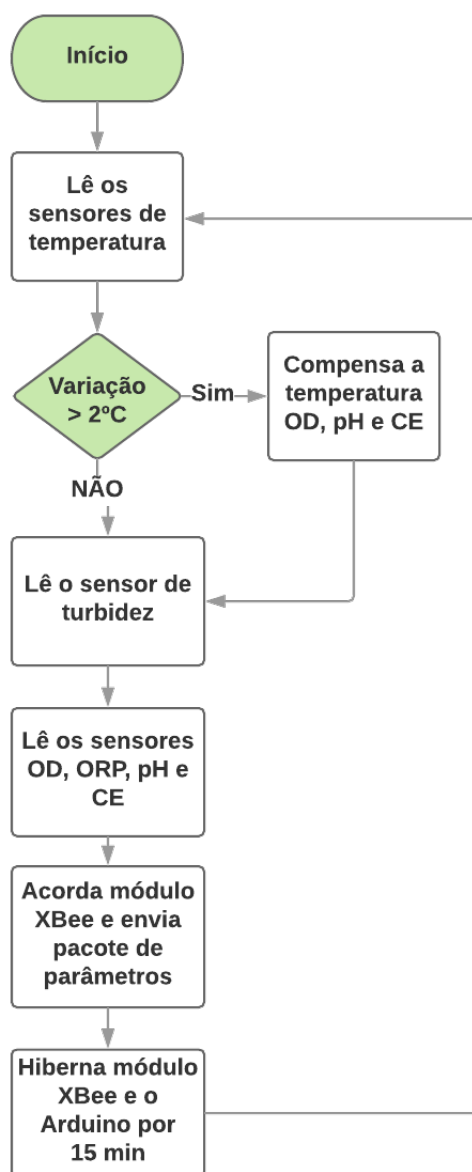
Fonte: Próprio autor/GDESTE/PPGET.

O Arduíno Pro Mini foi utilizado para execução da rotina de amostragem do corpo d'água e encaminhamento dos dados para armazenamento e tratamento em uma plataforma em Nuvem. Ele possui um circuito com menos componentes o que diminui o consumo de energia. A quantidade de memória e velocidade de processamento são suficientes para atender a execução da rotina sem gargalo.

A rotina de amostragem e envio dos dados é exibida na Figura 27. O intervalo de 15 min foi escolhido com base no que a literatura demonstrou ser um intervalo apropriado. Mas outros trabalhos sugerem uma frequência de amostragem adaptativa que atenda as necessidade de informações apropriados e redução do consumo de energia (SHU *et al.*, 2017).

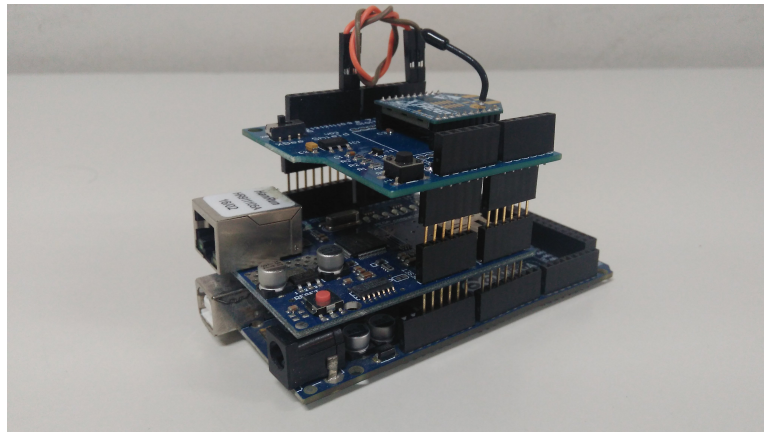
O laboratório do GDeste confeccionou o circuito que abrigaria todos os módulos que formam o nó sensor. Esse circuito foi colocado em um invólucro pelo fato do nó sensor ser utilizado em um ambiente externo e sujeito à intempéries e a danos causados por animais ou curiosos. Para isso, foi utilizada uma caixa plástica, de dimensionamento 200 x 160 x 115 mm.

O dispositivo nó *gateway*, exposto na Figura 28, possui as funções de coordenar a rede em estrela formada pelos módulos *XBee*. Na chegada de um quadro de um nó sensor, o nó *gateway* é capaz de identificar qual o nó que o enviou e publicar as informações na seção destinada àquele nó na plataforma *Losant*. Para tanto o nó *gateway* utiliza um módulo *Ethernet* que lhe dá capacidades de acesso à *Internet*.

Figura 27: Rotina de amostragem no nó sensor.

Fonte: Próprio autor/GDESTE/PPGET.

Além dos protocolos *ZigBee* e *Ethernet*, o nó *gateway* utiliza o protocolo *MQTT* para publicação dos dados dos nós sensores na plataforma *Losant* (LOSANT, 2018a). Todos esses protocolos foram implementados no Arduino através de bibliotecas disponibilizadas na própria *IDE* do Arduino ou para *download* nas páginas dos fabricantes.

Figura 28: Nó gateway.

Fonte: Próprio autor/GDESTE/PPGET.

As bibliotecas utilizadas (*Losant*, *Ethernet* e *XBee*) pelo nó *gateway* ocupam mais memória do que é disponibilizado em Arduíno típicos como o UNO, Pro Mini, *Lilypad*. Assim, o Arduíno Mega foi escolhido por possuir maiores capacidades de memória dentre os Arduínos disponíveis e ser compatível com os módulos a serem utilizados. O nó *gateway* não pode ter restrições de fornecimento e energia por precisar manter as conexões dos protocolos *MQTT* e *EThernet* ativas, e por estar a espera de quadros vindos dos nós sensores da rede *ZigBee*.

4.7 Custo

A elaboração inicial de um protótipo possui um custo mais elevado do que produção em escala industrial. Nas Tabelas 13 e 14 são apresentados os valores em dólares dos componentes (sem impostos) utilizados no protótipo. Se for utilizado o valor médio mensal do dólar de \$ 3,789 (novembro de 2018) o custo dos nós sensor e *gateway*, em reais, será respectivamente, R\$ 4.297,89 e R\$ 351,88 . Para os nós sensores, é considerado que os componentes foram conectados em um único circuito, através de soquetes, para mitigar os problemas de testes em campo.

Tabela 13: Custo da prototipagem de um nó sensor.

Componente	Part Number	Custo
Arduino Pro Mini	DEV-11113	\$ 9,95
<i>XBee S2C</i>	XB24CAWIT-001	\$ 17,50
<i>Kit Oxigênio Dissolvido</i>	KIT-103D	\$ 283,00
<i>Kit ORP</i>	KIT-102O	\$ 192,00
<i>Kit pH</i>	KIT-101P	\$ 164,00
<i>Kit Condutividade</i>	EC-KIT-1.0	\$ 215,00
<i>Inline Voltage Isolator</i>	BE-IVI	\$ 104,00
Sensor de Temperatura	DS18B20	\$ 2,78
Sensor Turbidez	SEN0189	\$ 9,90
Painel solar 6W	PRT-13783	\$ 59,00
Bateria	-	\$ 12,95
Carregador	TP4056	\$ 0,29
Conversor de tensão <i>DC-DC</i>	MT3608	\$ 0,60
Caixa plástica		\$ 60,00
Placa de fenolite, resistores, diodos, etc.)		\$ 5,00
Total		\$ 1.134,31

Tabela 14: Custo da prototipagem do nó *gateway*.

Componente	Part Number	Custo
Arduino Mega	1050-1018-ND	\$ 38,50
XBee S2C	XB24CAWIT-001	\$ 17,50
XBee Shield	FBA_01ARD00007	\$ 14,99
Etheret Shield	W5100	\$ 12,89
Fonte de alimentação 9 V	KIT-101P	\$ 8,99
Total		\$ 92,87

Os custos apresentados nas tabelas são apenas a conversão direta dos valores. Para produtos importados é preciso calcular o quanto de imposto incide sobre a compra e o frete. O valor médio do frete internacional é R\$ 76,00. Nessa modalidade de compra, são cobradas as alíquotas de 60% do imposto de importação e de 17% do ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) sobre o valor total dos produtos, incluso o frete. Assim, o custo total de produção de um nó *gateway*

e um nó sensor seria de R\$ 8.846,64, aproximadamente. Comparando com um *kit* proprietário da empresa *Libelium*¹ (dois nós sensores e um nó *gateway*) que custa R\$ 43.237,05 (€5.250,00 + frete + alíquotas), o sistema proposto, com a mesma configuração, custaria R\$ 16.892,29 mesmo sem estar sendo produzido em escala industrial.

4.8 Conclusões

Neste capítulo foi realizado um estudo de componentes empregados no desenvolvimento dos dispositivos básicos para formar o protótipo do sistema MQA baseado RSSF. O sistema foi dividido em módulos que melhor apresenta a função de cada componente. O *firmware* dos nós foi desenvolvido utilizando a *IDE* Arduino, tendo por uma das características a adição de outro sensor sem precisar refazer o código. Arquitetura do sistema proposto está em conformidade com o *framework* de sistemas de monitoramento de qualidade da água apresentado no referencial teórico. O levantamento do custo de produção do protótipo possibilita a comparação com soluções proprietárias semelhantes, e mesmo em fase de desenvolvimento apresenta um valor duas vezes e meia menor.

No próximo capítulo serão apresentados e discutidos os testes que foram conduzidos com a rede e o protótipo. Os sensores serão comparados com sensores padrão de laboratório para validação. Um teste de campo foi realizado para comprovar o funcionamento do sistema. O capítulo é encerrado com um levantamento do consumo final de energia do nó sensor.

¹ <<https://www.the-iot-marketplace.com/libelium-devicelynk-smart-water-solution-kit>>

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são detalhados e discutidos testes que foram feitos com a rede, sensores e o protótipo. Inicialmente, é descrito como foi realizado um teste de conexão da rede, para mostrar o desempenho os rádios *XBee* com a distância. Posteriormente, uma comparação na medição individual do sensores de com sensores de laboratório. Um teste de campo, instalando o nó sensor para leitura da água de um poço artesiano e da água provida pela distribuidora, demonstrando as possíveis interfaces de visualização de dados. Por fim um teste de consumo de energia do nó, comparando o consumo estimado com o real.

A validação do sensores utilizados ocorreu Laboratório de Petroquímica do Instituto Federal do Ceará, *campus* Caucaia (IFCE, 2018). O laboratório é composto pelo Laboratório de Química Geral (LQG) e pelo Laboratório de Instrumentação Analítica (LIA) e ambos possuem estrutura que atende os alunos dos cursos de Petroquímica, Eletroeletrônica e Metalurgia. Além de atender a alunos de cursos diversos do Campus do Pecém. O LIA possui equipamentos de bancadas como pHmetro digital, turbidímetro, e medidor de condutividade. A metodologia utilizada na calibração e validação se basearam nos métodos de análise aplicados no laboratório.

5.1 Validação Rede *XBee*

Para avaliar a rede *XBee*, foi elaborado um protocolo de testes para análise do comportamento da rede em um ambiente que se assemelhasse com um possível ponto de instalação. Para tanto, o *campus* Fortaleza do IFCE foi utilizado com ambiente de testes.

O teste consistiu em avaliar o desempenho do rádio com a distância em ambiente urbano. A fim de medir a qualidade da água em um ambiente de *campus* os nós sensores seriam, possivelmente, instalados externamente nos prédios. O ambiente externo com maior distância para análise, foi o estacionamento do campus Fortaleza

que conta com, aproximadamente, 100 m de comprimento. As Figura 29 e 30 mostram o ambiente onde os testes foram realizados.

Figura 29: Ambiente de testes: Estacionamento IFCE, *campus* Fortaleza distância medida por ferramenta do Google Maps®.



Fonte: Google Maps.

Figura 30: Ambiente de testes: Estacionamento IFCE, *campus* Fortaleza.



Fonte: Autor.

Foram realizados ensaios de transmissão de pacotes suportado pelo módulo *XBee S2C*, simulando o envio de um quadro *API* com pacote de dados de qualidade de água com tamanho de 34 Bytes. Foram transmitidos 500 pacotes em cada rodada de teste para uma melhor observação do efeito da distância e do ambiente na transmissão.

A troca de mensagens ocorreu entre o nó coordenador e um segundo nó, configurado como dispositivo final, em uma rede ponto a ponto. A estação base, consistia de um notebook conectado a um módulo *XBee* coordenador para execução das rotinas de teste com o *software XCTU*[®]. O teste foi realizado em uma escala menor (número de nós) do que a rede implantada pode atingir.

O desempenho foi avaliado utilizando os seguintes itens:

- Largura de banda;
- Perda de pacotes;
- Indicador da Força do Sinal Recebido (RSSI) e potência do sinal;
- Tempo de envio dos dados.

Abaixo a lista componentes utilizados:

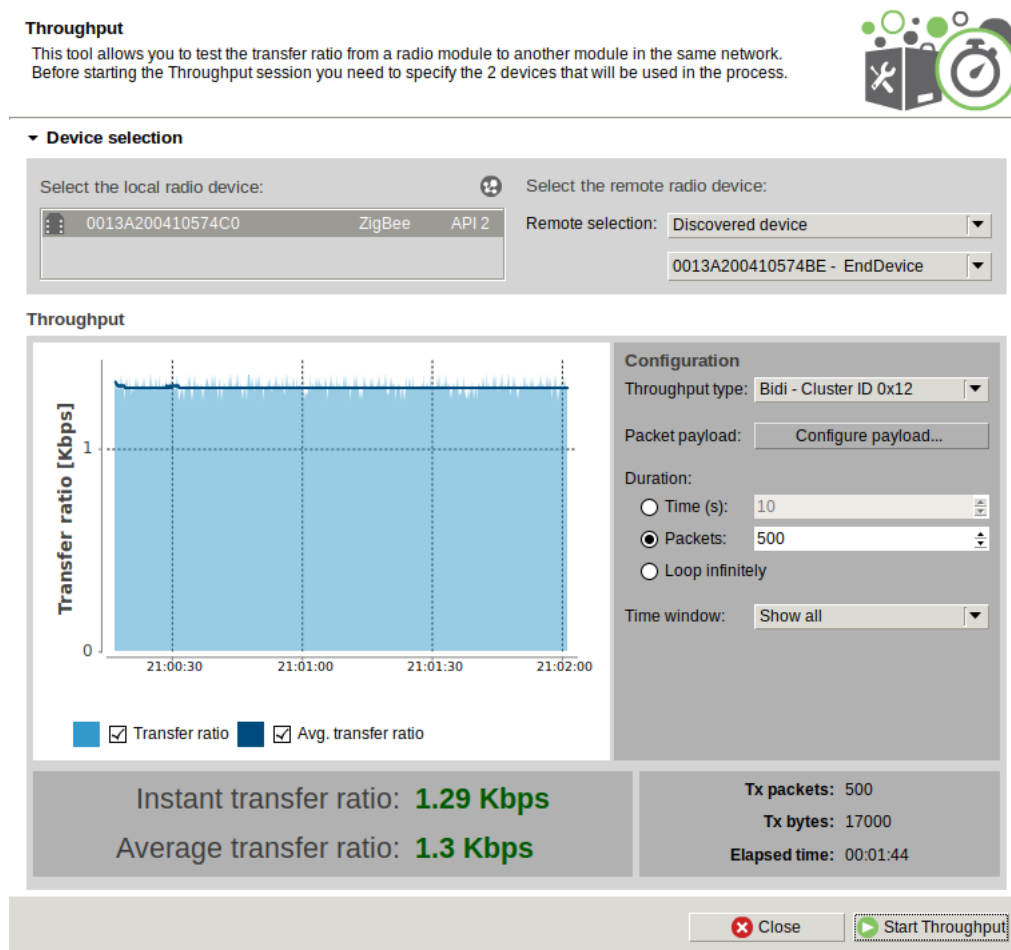
- Notebook *Dell*, Processador *Core i5*,
Sistema Operacional Linux Ubuntu 18.04;
Software X-CTU;
- Cabo *USB*;
- Módulos *Xbee Explorer USB Adapter*;
- Rádio de transmissão: *XBee (S2C)*.

Para iniciar o teste de taxa de vazão da rede, utilizando o *X-CTU*[®], deve-se clicar em "*Tools*" e ir na opção *Throughput* para abrir a janela de configuração. A Figura 31, mostra a tela com a configuração e um teste de exemplo executado. Os resultados foram obtidos através de cinco rodadas com as seguintes configurações:

1. *Select the local radio*: Seleciona o nó coordenador *XBee*;
2. *Discovered device*: Seleciona automaticamente o nó conectado à rede;

3. *Throughput type*: Selecciona Bidirectional - Cluster;
4. *Packet payload*: Aperta o botão "Configure payload"....., selecciona "Random payload of 34 bytes";
5. *Duration*: Selecciona Packets e digita 500;
6. Aperta o botão "Start Throughput".
7. Aguarda a transmissão dos 500 pacotes.

Figura 31: Exemplo de teste de vazão utilizando *software XCTU®*.



Fonte: Autor.

Para começar o teste de alcance, utilizando o *X-CTU®*, deve-se clicar em "Tools" e seleccionar a opção *Range Test* para abrir a janela de configuração. A Figura 32, mostra a tela com os itens de configuração e um teste de exemplo executado. Os resultados foram obtidos através de cinco rodadas com as seguintes configurações:

1. *Select the local radio*: Seleciona o nó coordenador *XBee*;
2. *Discovered device*: Seleciona automaticamente o nó conectado à rede;
3. *Packet payload*: Aperta o botão "Configure payload"... e escreva um pequeno texto que ocupe 34 Bytes;
4. *Configuration*: Seleciona *Number of Packets* e digita 500;
5. Aperta o botão "*Start Range Test*".
6. Aguarda a transmissão dos 500 pacotes.

Figura 32: Exemplo de teste de alcance utilizando *software XCTU®*.



Fonte: Autor.

Durante os testes a estação base foi fixada com o rádio a 2,30 m de altura. O segundo rádio foi fixado em um poste móvel a mesma altura. O estacionamento foi dividido em 5 pontos de análise com distância de 20 m entre cada ponto. Após uma

primeira rodada de testes foi decidido que seriam adicionados pontos em 85, 90 e 95 m para um maior detalhamento do desempenho da rede próximo aos 100 m. A Tabela 15 apresenta as médias dos resultados obtidos em cada ponto estabelecido.

Tabela 15: Média dos resultados dos testes de alcance e vazão.

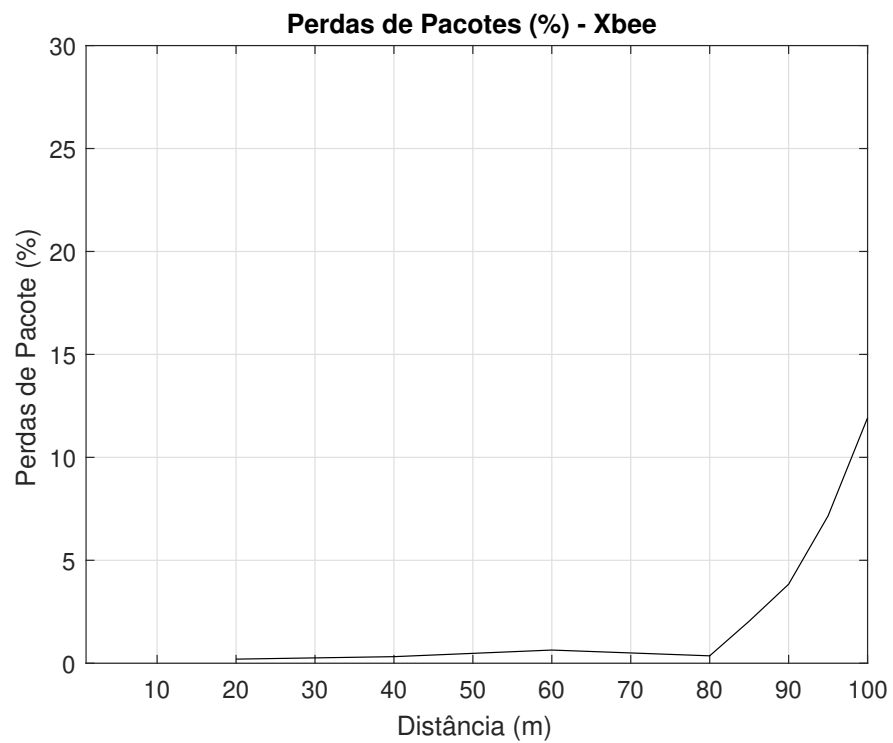
Distância (m)	Tempo de envio	Tx (kbps)	RSSI Local (dBm)	RSSI Remoto (dBm)	Perda de pacotes (%)
20	00:00:58	2,33	-56,6	-57,2	0,20
40	00:01:03	2,15	-62,0	-62,6	0,32
60	00:01:41	1,36	-63,0	-63,2	0,64
80	00:01:48	1,26	-65,4	-64,8	0,36
85	00:01:52	1,21	-62,0	-62,4	2,042
90	00:01:54	1,19	-65,0	-65,8	3,838
95	00:02:03	1,10	-70,2	-70,4	7,16
100	00:02:25	0,97	-69,2	-73,4	11,92

Fonte: Autor

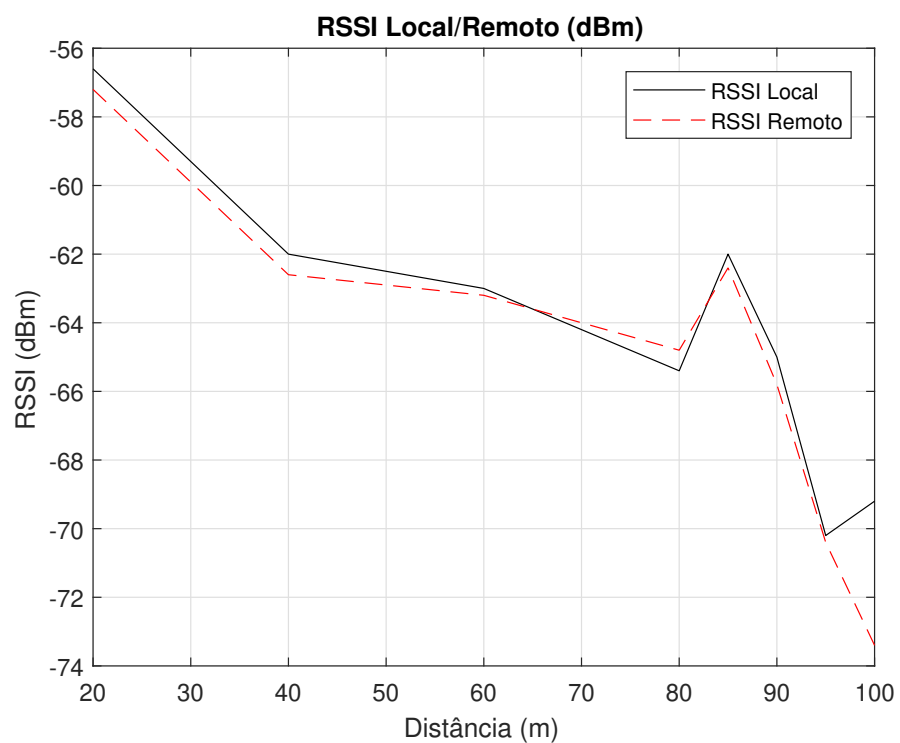
Na Figura 33 é mostrado o comportamento da perda de pacotes à medida que a distância entre os nós aumenta. Até os primeiros 80 metros não há uma alteração significativa, com exceção de que nos 60 metros a perda foi um pouco maior. Essa alteração pode ser atribuído à variação da quantidade de carros no ambiente dos testes. A partir do 85 metros, a perda de pacotes é significativa e cresce rapidamente até os 100 metros.

Na Figura 34 é exibida variação da intensidade do sinal (RSSI) com o aumento da distância entre os nós. Destaque para a média nos 85 metros. Neste ponto, a intensidade do sinal é muito próximo do resultado obtido para os 40 metros de distância. Essa súbita alteração também pode ser atribuída a dinâmica do local. Uma diminuição da quantidade de automóveis pode ter contribuído para o resultado.

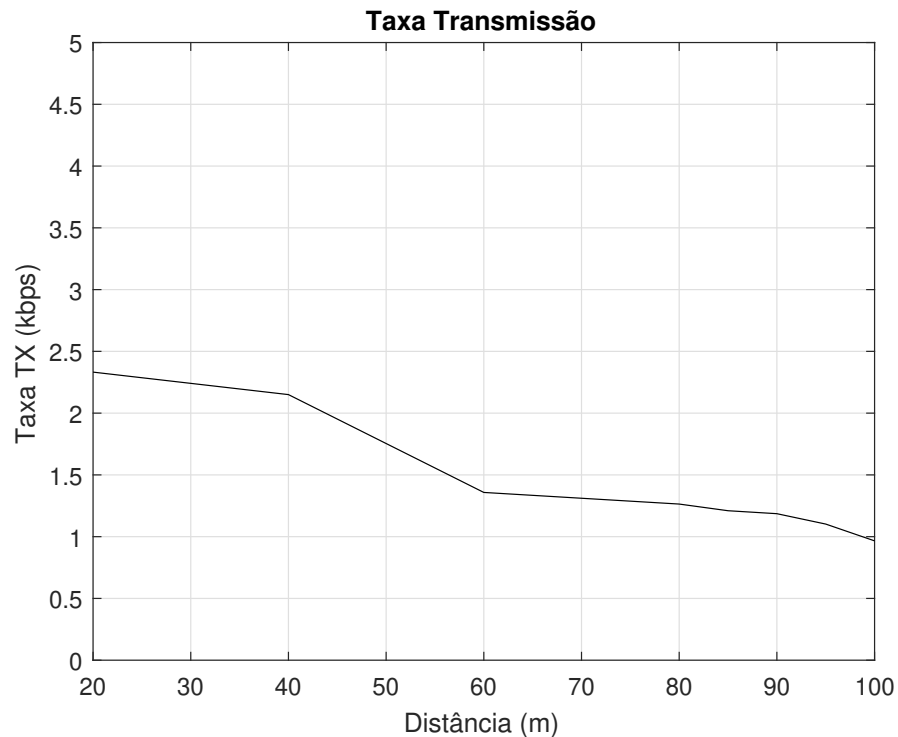
Na Figura 35 é mostrado que acontece com taxa de transmissão com o aumento da distância. A diminuição da taxa ocorre de forma mais acentuada no primeiros 60 metros e decai mais suavemente até os 100 metros. Apresenta uma variação acentuada nos 80 m da mesma forma que ocorreu nos resultados de perda de pacotes.

Figura 33: Resultados perda de pacotes com a distância.

Fonte: Autor.

Figura 34: Resultados RSSI local e remoto com a distância.

Fonte: Autor.

Figura 35: Resultados taxa de transmissão com a distância.

Fonte: Autor.

5.2 Validação sondas e sensores

Os testes conduzidos no laboratório de Petroquímica do IFCE, *campus* Caucaia, visava verificar a precisão e exatidão dos sensores utilizados no nó sensor do sistema proposto. Antes do início dos testes os sensores foram calibrados de acordo com o solicitado pelo fabricante. A calibração dos sensores (OD, ORP, pH e CE) pode ser exportada a fim de servir como cópia de segurança, ou para calibrar outros sensores.

Os principais cuidados com a calibração consistiu em:

1. Lavar a sonda com água corrente ao removê-la da proteção.
2. Colocar a solução de calibração em um béquer e mergulhar a sonda.
3. Deixar a sonda mergulhada até as leituras estabilizarem (30s - 2min).
4. Enviar o comando correspondente.
5. Repetir os passos de 1 a 3 se for necessário mais de um ponto de calibração.

No primeiro teste, os sensores utilizados no protótipo foram comparados individualmente com sensores de referência. Não foi possível validar todos os sensores utilizados no SMQA proposto. O laboratório de Petroquímica possuía somente um condutivímetro, um pHmetro. Para complementar os testes, foi utilizado um oxímetro de mão do laboratório do GDeste. Não foi possível validar o sensor de *ORP*, no momento.

Na Figura 36 é mostrado o oxímetro usado como referência. Foi utilizado o modelo AT-115 da Alfakit que é construído para realizar medições em projetos de aquicultura e de controle e tratamento de água e esgoto. Nas Figuras 37 e 38 podem ser vistos o condutivímetro e o pHmetro usados como referência. Ambos são microprocessados, sendo que o condutivímetro, mPA-150, pode medir condutividade em águas (S/cm), álcool (S/m) e SDT e o pHmetro, mPA-210, pode medir pH e temperatura utilizando eletrodos variados.

Figura 36: Oxímetro de referência da Alfakit®, modelo AT-115.



Fonte: Alfakit (2019).

Foram analisadas amostras da água do poço artesiano do *campus* Caucaia, da água fornecida pela distribuidora local e da água ultrapura preparada no laboratório de Petroquímica. Para cada tipo de água foram colhidas amostras pela manhã, meio-dia e à tarde. Cada amostra foi analisada em 10 rodadas nos sensores de referência e nos utilizados no protótipo do nó sensor. Cada rodada de análise consiste em uma leitura nos sensores do laboratório e uma nos do nó sensor.

Figura 37: Condutivímetro de referência da Tecnopon[®], modelo mCA-150.



Fonte: Tecnopon (2019).

Figura 38: Medidor de pH de referência da Tecnopon[®], modelo mPA-210.



Fonte: Tecnopon (2019).

O protocolo de análise consistiu em:

1. Coletar uma amostra de um tipo de água.
2. Medir um parâmetro com um sensor de referência.
3. Deixar a sonda mergulhada até as leituras estabilizarem.
4. Medir o mesmo parâmetro com um sensor do protótipo.

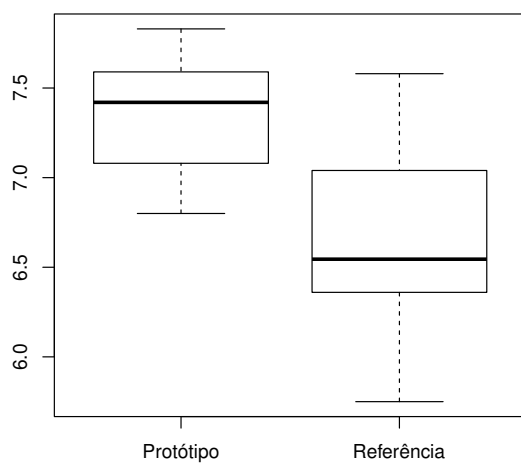
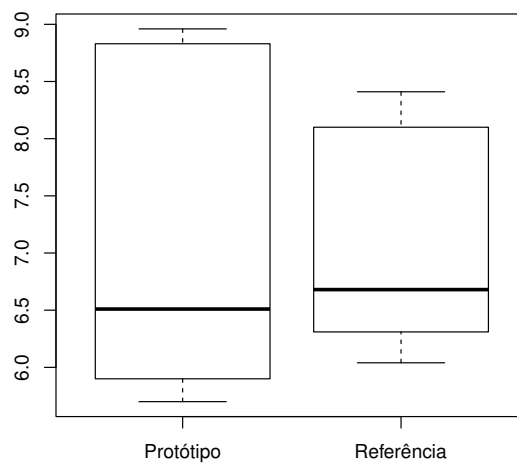
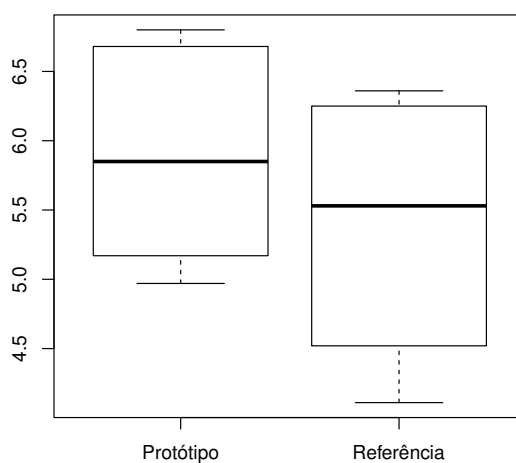
5. Deixar a sonda mergulhada até as leituras estabilizarem.
6. Realizar 10 repetições dos passos de 2 a 5 com cada amostra de água e sensor.

Para saber se os resultados da análise são representativos ou não, muitas vezes, foi observada a distribuição dos valores. Desses valores extraiu-se a média e o desvio padrão de cada conjunto de leituras com a finalidade de se saber o quão exato (próximo do valor do sensor de referência) e preciso (dispersão entre os valores) é o sistema proposto.

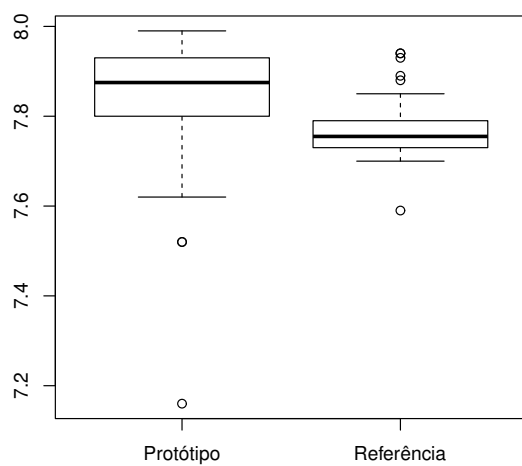
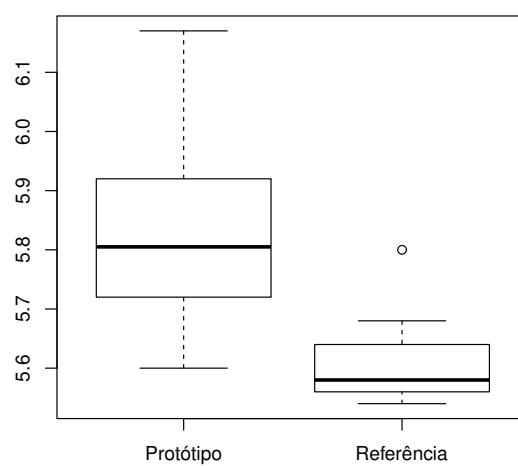
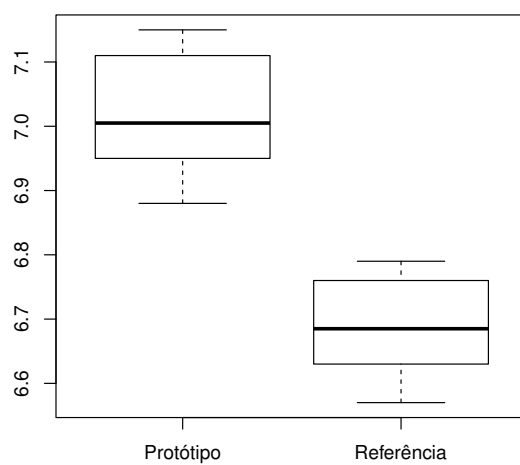
Os resultados da análise comparativa dos sensores de OD de referência e o utilizado no protótipo podem ser vistos na Figura 39. Os sensores tiveram o seu comportamento variado com o tipo de água, o que dificulta saber o quão exato e preciso é o sensor do protótipo em relação ao de referência. Nos testes com água ultrapura e dos poço temos um interseção dos dados e uma diferença menor entre os valores médios que pode indicar uma semelhança entre os dos sensores. Apesar disso, os dois sensores apresentaram uma dispersão elevada nos valores para água ultrapura e do poço.

Na Figura 40 são apresentados os resultados para o comparativo entre os sensores de pH. O desempenho dos sensores foi semelhante para os três tipos de água e não houve interseção entre os valores dos dois sensores. Ainda assim, a maior diferença entre os valores médios foi de 0,3, o que pode ser um indicativo de exatidão. A maior dispersão dos valores do sensor do protótipo foi de 0,2, o que pode indicar uma boa precisão do sensor do protótipo.

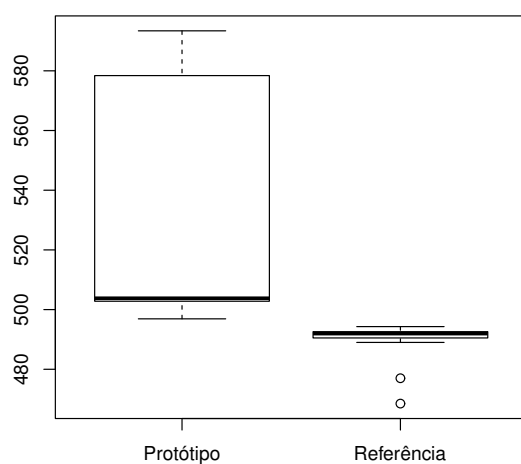
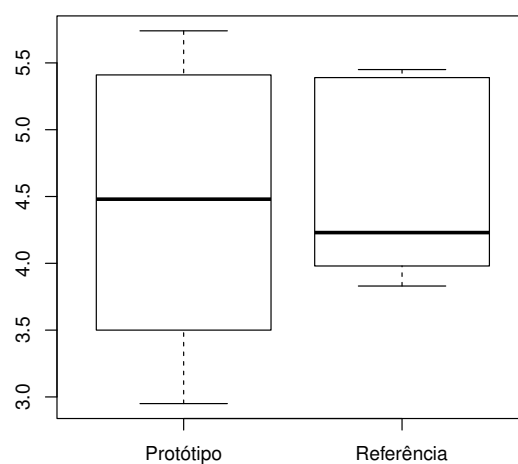
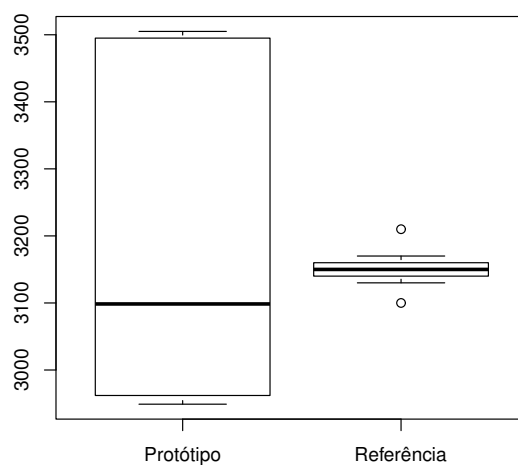
Na Figura 41 podem ser vistos os resultados do comparativo dos sensores de condutividade de referência e do protótipo. Foi observado interseção nos valores obtidos para água ultrapura e do poço. Embora este seja um indicativo de exatidão, foram observados valores altos entre as valores médios dos sensores e para a dispersão do sensor utilizado no protótipo. Vale ressaltar que o sensor do protótipo foi calibrado com dois pontos (seco e o ponto mais baixo). Embora seja possível ser calibrado com dois pontos, o sensor terá maior precisão se calibrado os três pontos. Não foi possível calibrar o terceiro ponto (de valor mais alto), pois o laboratório de Petroquímica não possuía tal solução no momento dos testes.

Figura 39: Desempenho do sensor de OD (mg/L).**(a)** Água distribuidora.**(b)** Água ultrapura.**(c)** Água do poço.

Fonte: Autor

Figura 40: Desempenho do sensor de pH.**(a)** Água distribuidora.**(b)** Água ultrapura.**(c)** Água do poço.

Fonte: Autor

Figura 41: Desempenho do sensor de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$).**(a)** Água distribuidora.**(b)** Água ultrapura.**(c)** Água do poço.

Fonte: Autor

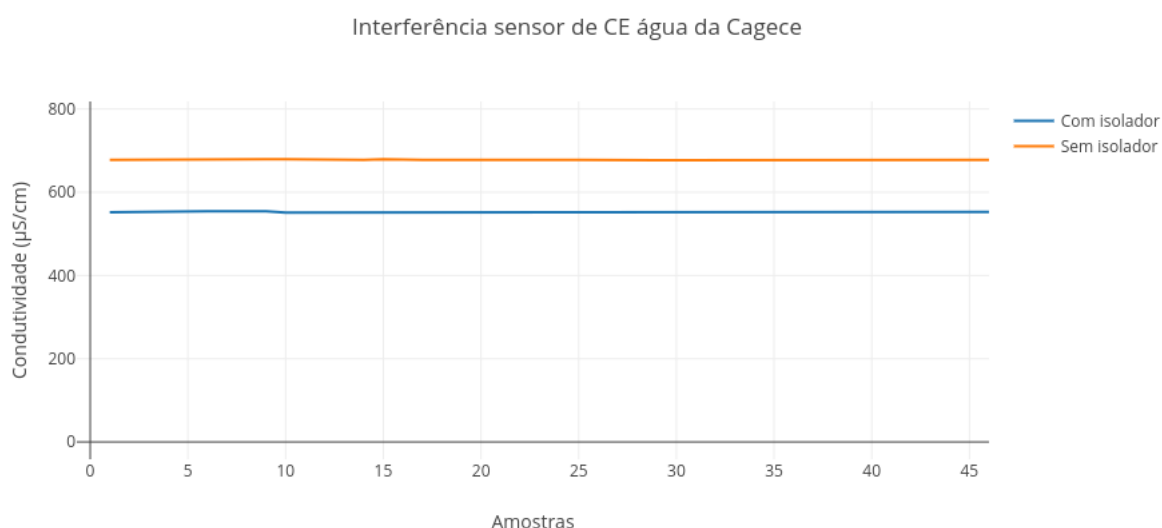
Durante o processo de prototipação foi percebida uma diferença nas leituras dos sensores de OD, ORP, pH e CE quando estavam separados em recipientes individuais e quando colocados no mesmo recipiente. O fabricante dos sensores recomenda o uso de um circuito isolador, a fim de criar um canal com o sensor sem interferências.

Para demonstrar a ocorrência da interferência, foi conduzido um segundo teste

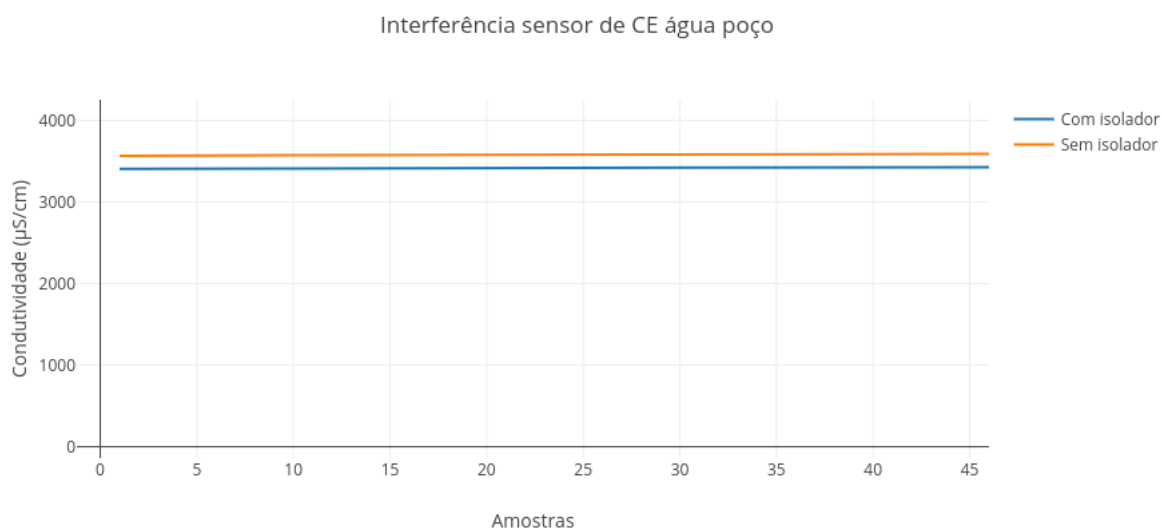
com amostras de água da distribuidora e do poço. Os sensores realizaram leituras de uma mesma amostra em um único recipiente. Com o intuito de ter uma visualização apropriada dos resultados foram feitas coleta de dados por, no mínimo, 30 minutos, com e sem o circuito isolador.

Nas Figuras 42 e 43 são mostradas as leituras obtidas pelo sensor de condutividade. Os valores obtidos sem o uso do circuito isolador se mantiveram sem acima dos valores registrados com o uso do mesmo. Foram registradas uma diferença média entre as leituras de 161 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na água do poço e 125 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na água da distribuidora. É possível ver que as diferenças registradas entre leituras se tornam mais significativas em corpos d'água com menor condutividade.

Figura 42: Comparativo entre leituras de CE da água da Cagece.

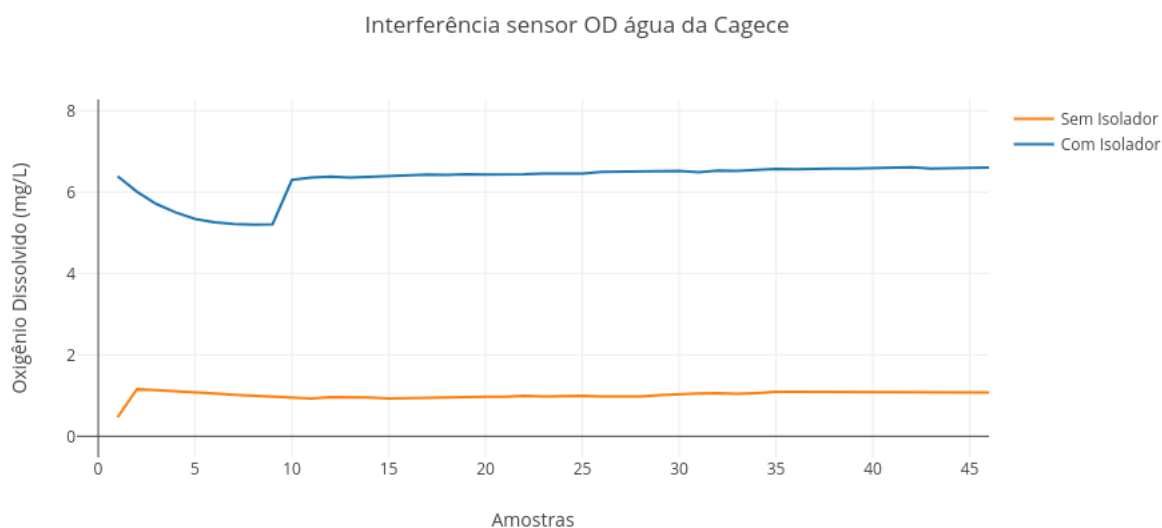


Fonte: Autor.

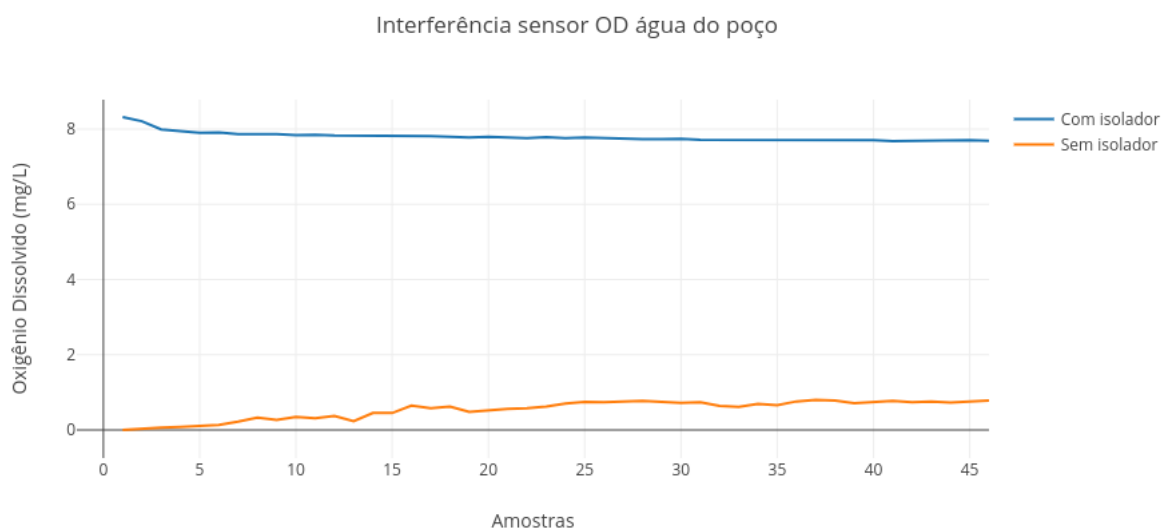
Figura 43: Comparativo entre leituras de CE da água do poço

Fonte: Autor.

O comparativo das leituras do sensor de OD pode ser visto nas Figuras 44 e 45. Os gráficos mostram que sem o isolador, a interferência no sensor de OD poderia levar a interpretação de que o corpo d'água possui níveis muito baixos de oxigênio (0,54 e 1,01 mg/L em média). Essa diferença nas leituras torna inviável o uso do sensor de OD sem o circuito isolador.

Figura 44: Comparativo entre leituras de OD da água da Cagece.

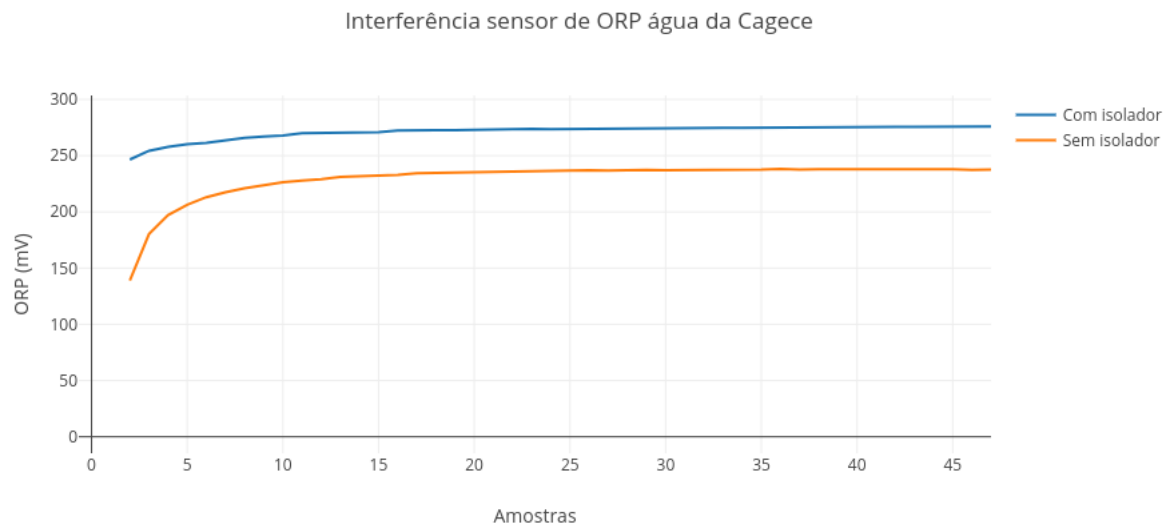
Fonte: Autor.

Figura 45: Comparativo entre leituras de OD da água do poço.

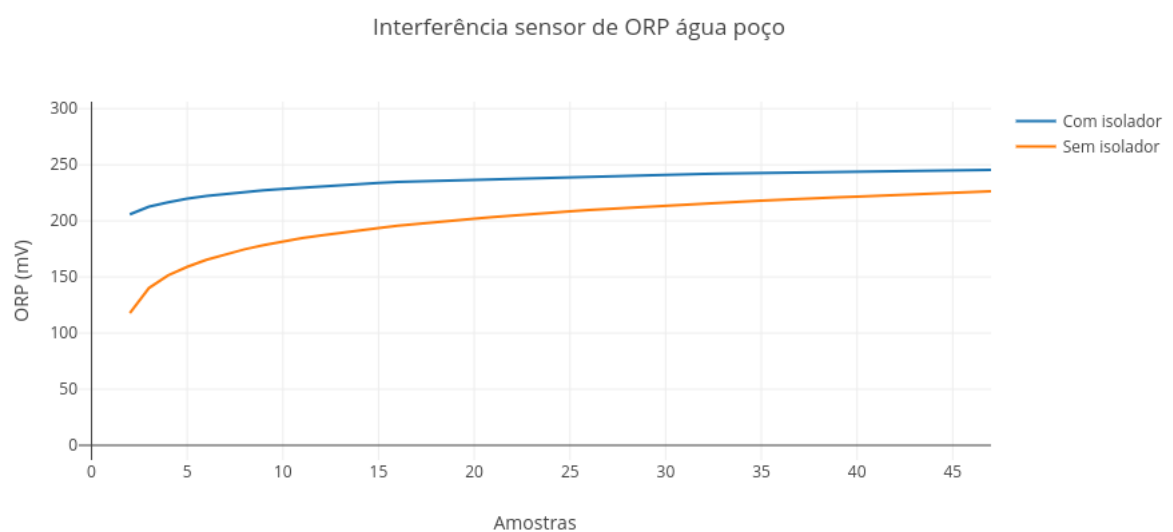
Fonte: Autor.

Nas Figuras 46 e 47 são apresentados os valores das leituras do sensor de *ORP*. As leituras do sensor sem o circuito isolador apresentaram valores abaixo do obtido pelo sensor com o isolador. Sem o isolador, o gráfico do sensor tem uma curva maior até estabilizar as leituras, sendo mais significativa na água salobra do poço. Foi registrada uma diferença significativa entre as leituras da água do poço (20,9 mV) e da água da Cagece (37,5 mV), levando-se em consideração os valores típicos para esse parâmetro.

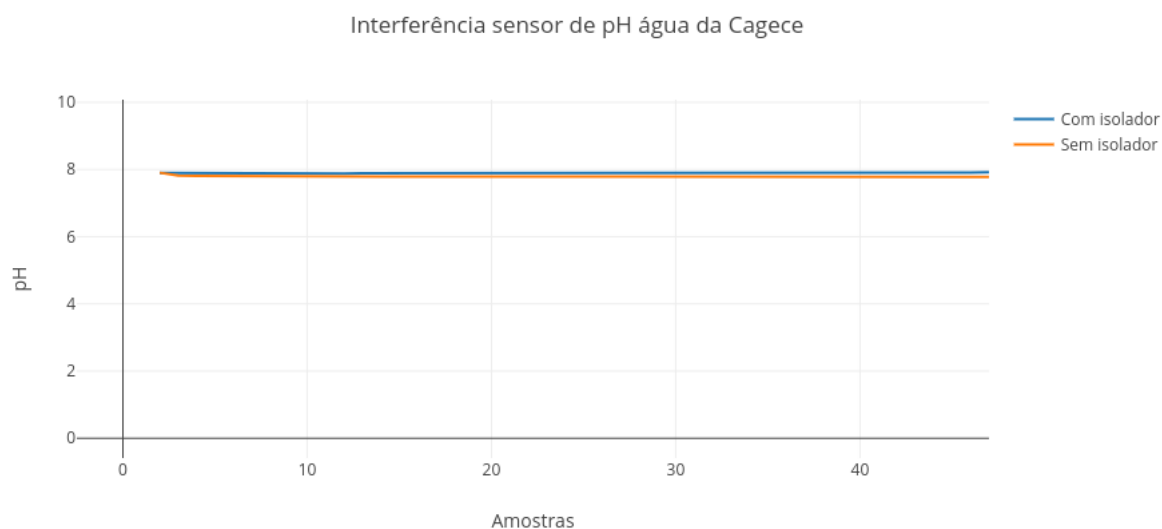
Nas Figuras 48 e 49 são mostrados os valores obtidos pelo sensor de pH. A diferença média entre as leituras com e sem o isolador são muito pequenas (0,0004 para água do poço e 0,1 para água da Cagece) que, em algumas aplicações, poderia ser desprezada. Embora, segundo Atlas (2017), o sensor de pH, sem o circuito isolador, sofra interferência dos sensores de OD e CE; na prática foi o único sensor que não sofreu alterações consideráveis.

Figura 46: Comparativo entre leituras de *ORP* da água da Cagece.

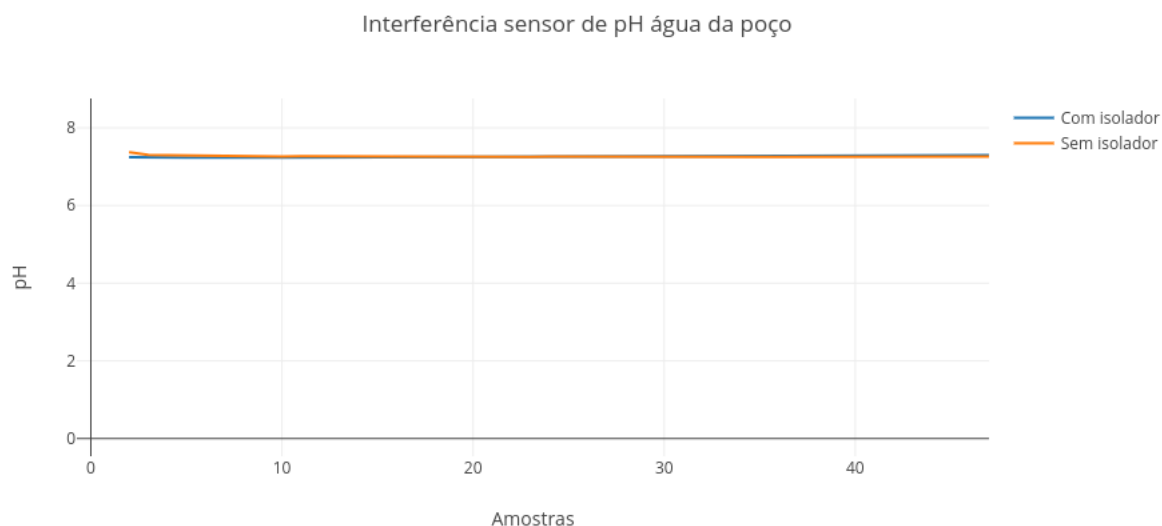
Fonte: Autor.

Figura 47: Comparativo entre leituras de *ORP* da água do poço.

Fonte: Autor.

Figura 48: Comparativo entre leituras de pH da água da Cagece.

Fonte: Autor.

Figura 49: Comparativo entre leituras de pH da água do poço.

Fonte: Autor.

5.3 Teste de campo

O teste de campo foi conduzido em duas etapas. Na primeira, foram efetuadas leituras da água do poço artesiano do campus Caucaia. Como não há acesso ao

poço diretamente, a água teve que ser medida em uma torneira no Laboratório de Petroquímica. Para realizar as medições foi necessário confeccionar uma célula de amostragem para que a água entrasse em contato com os sensores, como mostrado na Figura 50. Na segunda etapa, foram feitas leituras da água fornecida pela distribuidora direto na caixa d'água do IFCE, *campus* Caucaia. Nas duas etapas foram tomadas amostras por um período de 7 dias ininterruptos.

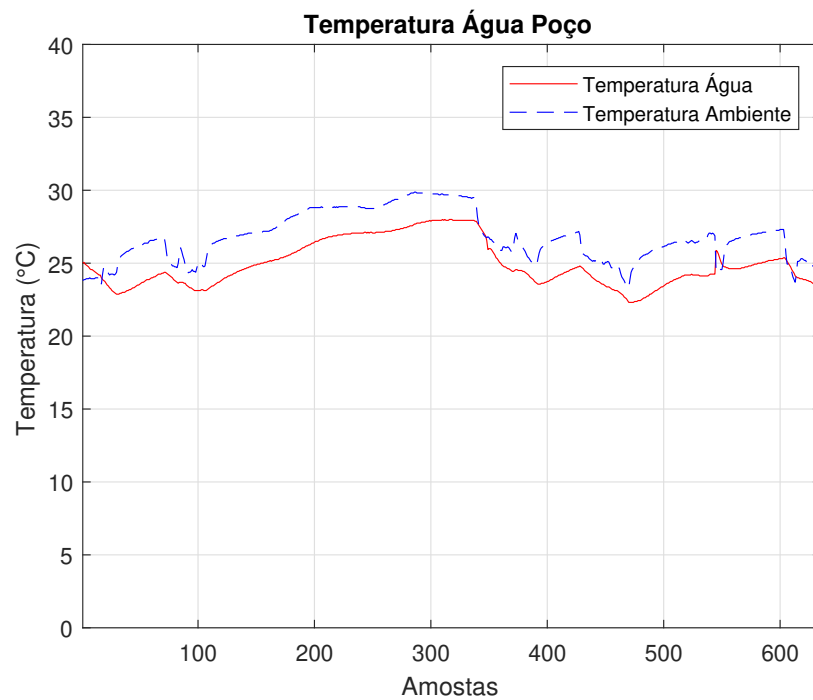
Figura 50: Célula de amostragem da água do poço.



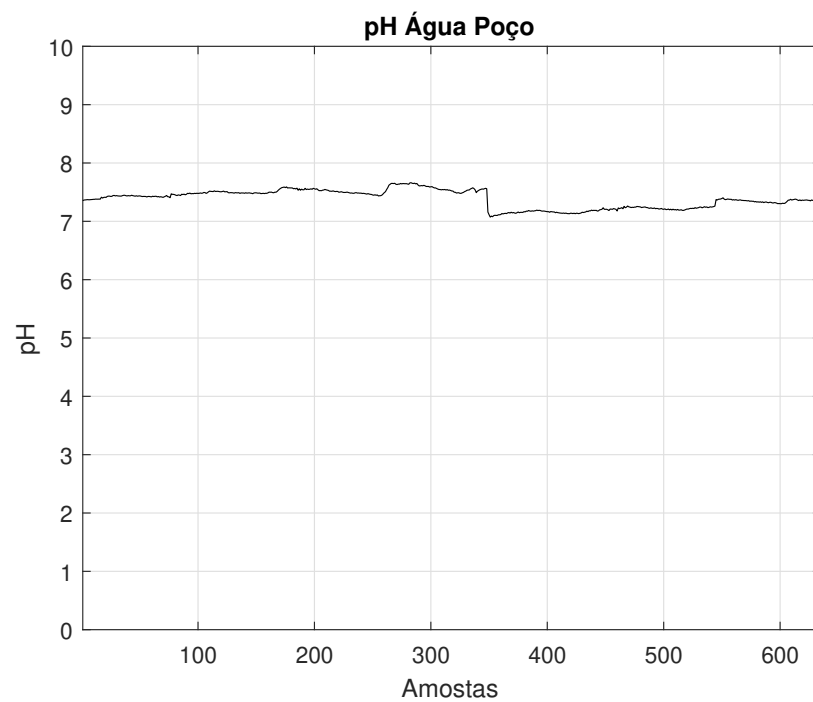
Fonte: Autor.

A Figura 51 apresenta as leituras de temperatura da água e do ambiente, que, no caso, é o laboratório de Petroquímica. A temperatura da água na célula de amostragem acompanha a curva da temperatura do laboratório, como era esperado. Entre as amostras 150 e 350 a temperatura aumentou constantemente pelo fato do ar-condicionado do laboratório ter ficado desligado durante todo o final de semana. As Figuras 52 e 53 mostram a variação do pH e *ORP*, respectivamente. Os valores obtidos do monitoramento do poço estão dentro do esperado para água salobras.

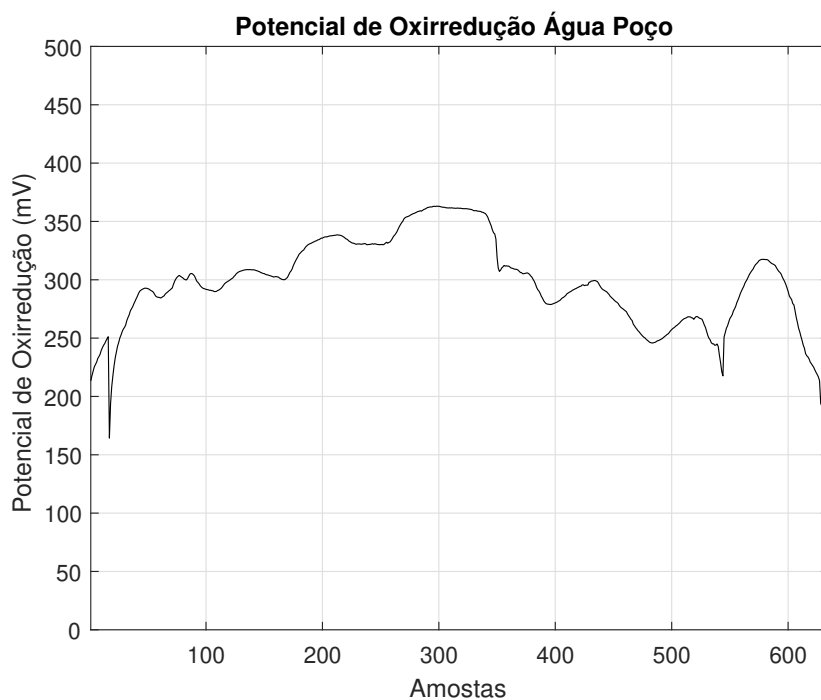
A Figura 54 mostra os valores de OD coletados. A baixa concentração de OD é típica de águas de poços, especialmente nesse caso, onde o poço é selado. O gráfico mostra valores atípicos em quase 100 amostras. Uma das possíveis causas dessa variação pode ser a presença de ar na tubulação.

Figura 51: Dados coletados da água do poço.

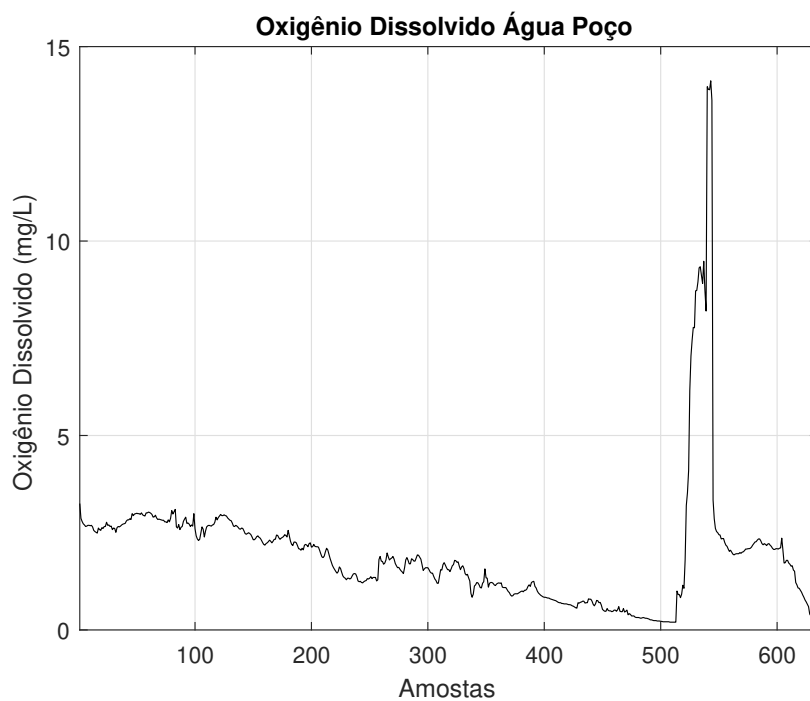
Fonte: Autor.

Figura 52: Dados coletados da água do poço.

Fonte: Autor.

Figura 53: Dados coletados da água do poço.

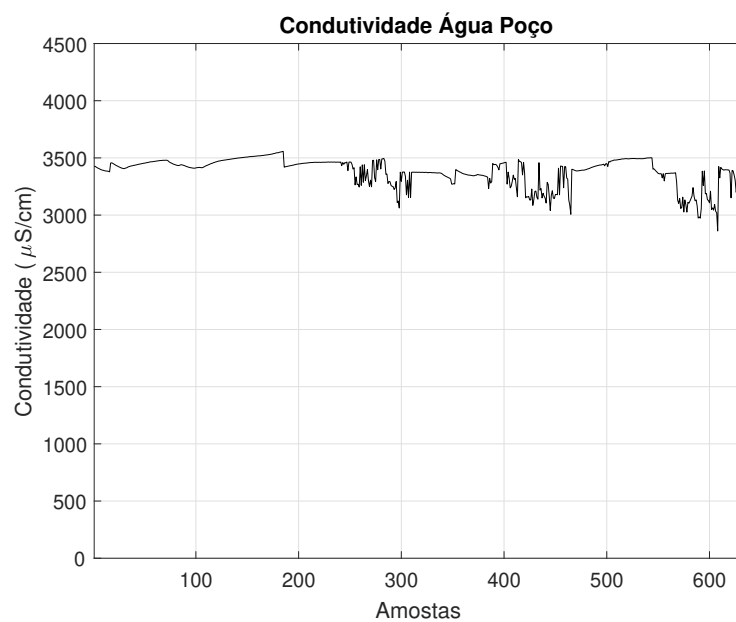
Fonte: Autor.

Figura 54: Dados coletados da água do poço.

Fonte: Autor.

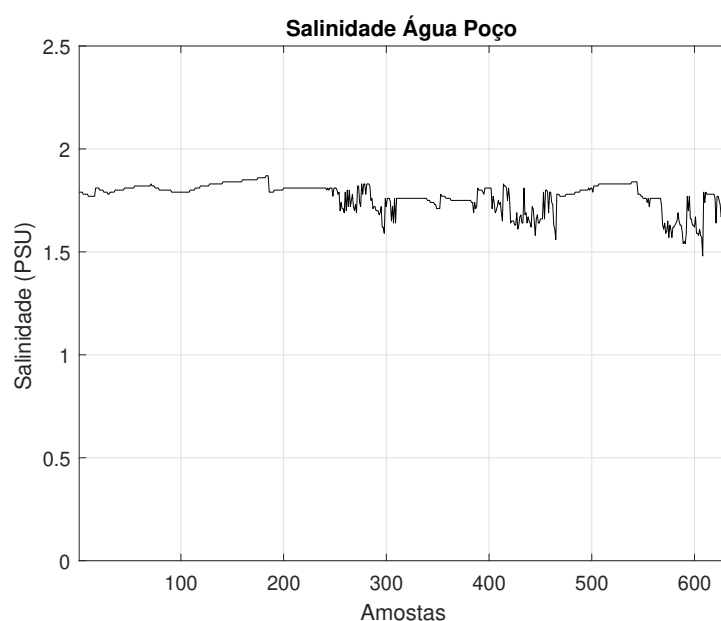
Os técnicos do laboratório de Petroquímica descreveram a água do poço como salobra e que não era utilizada em seu estado bruto nas atividades cotidianas. Nas Figuras 55, 56 e 57 é salientado o nível de salinidade da água que é característico manguezais e de estuários.

Figura 55: Dados coletados da água do poço.

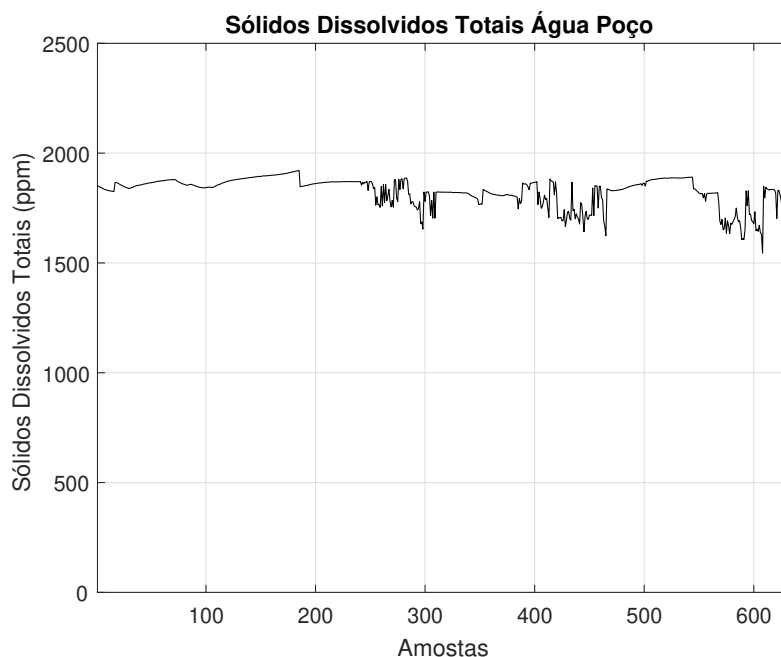


Fonte: Autor.

Figura 56: Dados coletados da água do poço.



Fonte: Autor.

Figura 57: Dados coletados da água do poço.

Fonte: Autor.

A segunda bateria de coleta de dados foi feita com o nó sensor monitorando a água que o *campus* Caucaia recebe da distribuidora local. O ponto de monitoramento escolhido foi a caixa d'água do campus. Esta fica exposta ao sol durante todo o dia. Na Figura 58 são mostrados os dados obtidos da temperatura do ambiente próximo a caixa d'água e da água armazenada. É possível perceber o ciclo diário de variação da temperatura. As Figuras 59 e 60 apresentam os dados do comportamento do pH e *ORP* com a variação da temperatura da água.

Na Figura 61 é exibido os dados coletados de OD. Por um período de quase três dias houve um aumento na quantidade de oxigênio na água. Houve uma queda muito brusca nos dados relativos à condutividade e salinidade, como mostrado nas Figuras 62, 63 e 64. Como não houve nenhuma ação na distribuição de água por parte da equipe de infraestrutura do *campus* Caucaia, essa alteração foi atribuída a variações na água fornecida pela distribuidora. Vale salientar que essas variações não seriam percebidas sem o auxílio do sistema de monitoramento proposto.

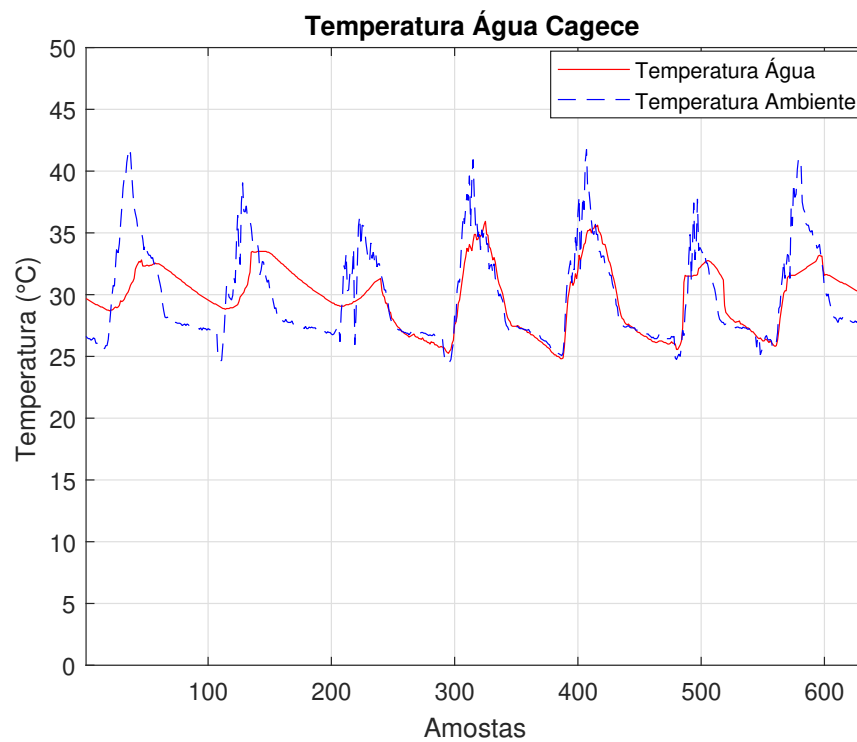
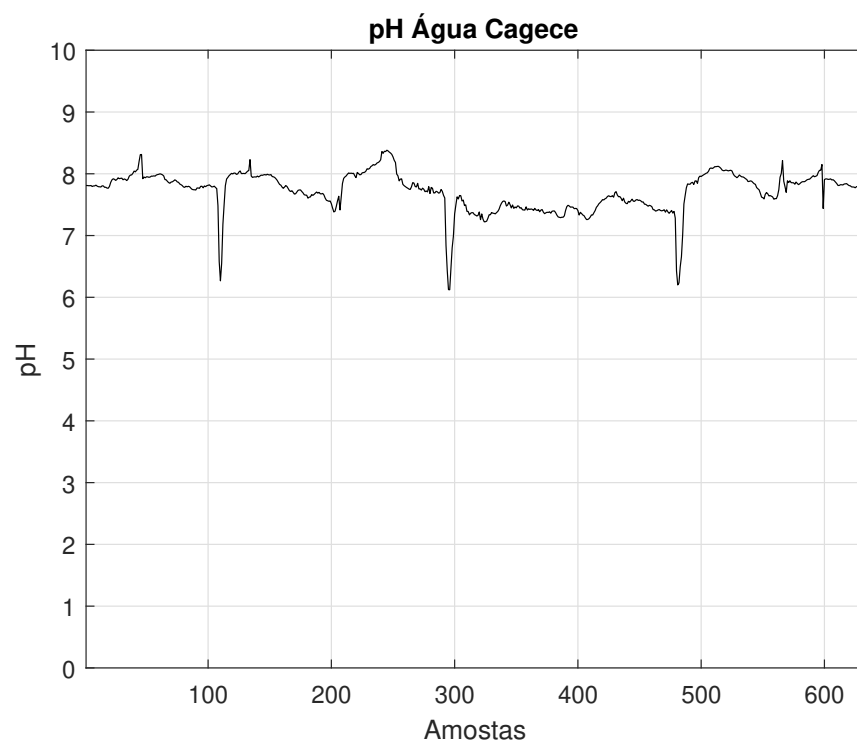
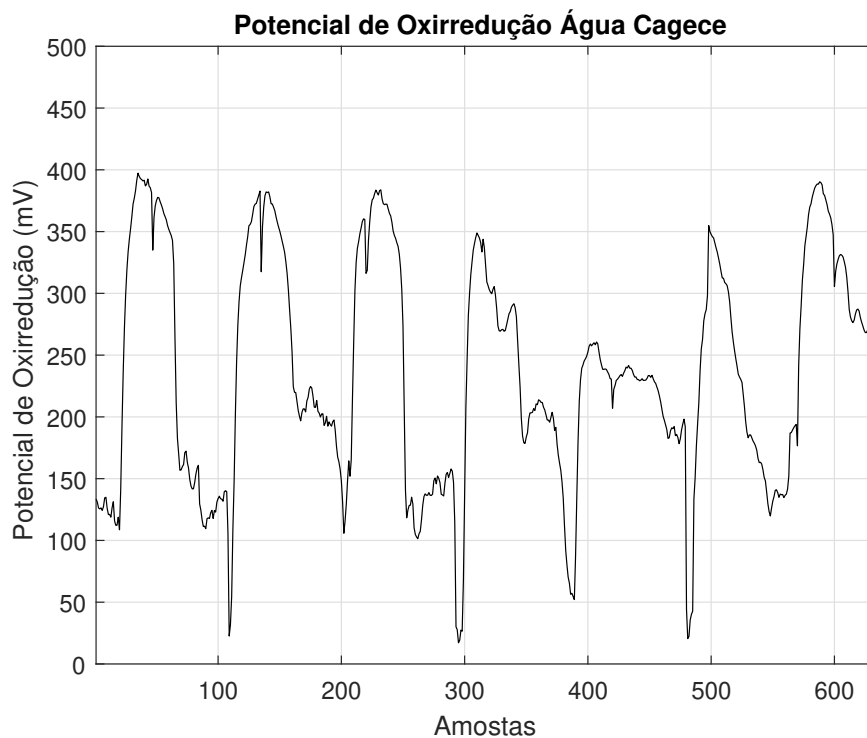
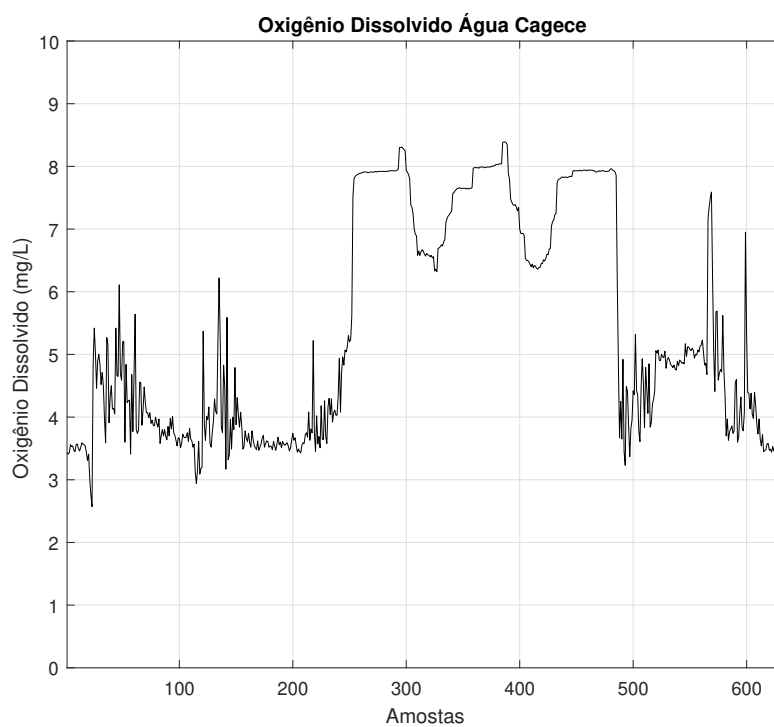
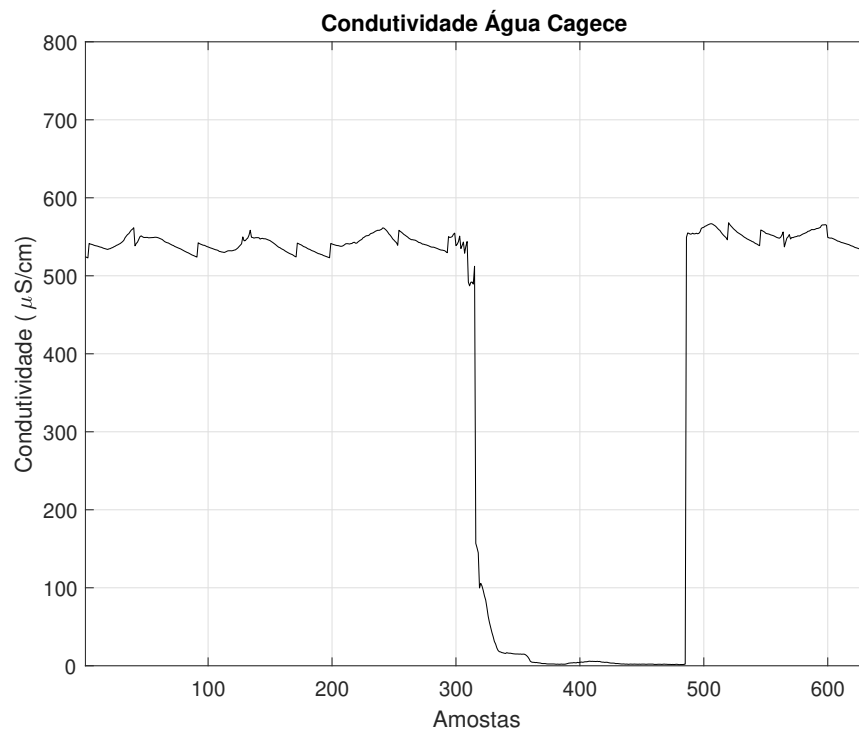
Figura 58: Dados coletados da água da distribuidora.**Figura 59:** Dados coletados da água da distribuidora.

Figura 60: Dados coletados da água da distribuidora.

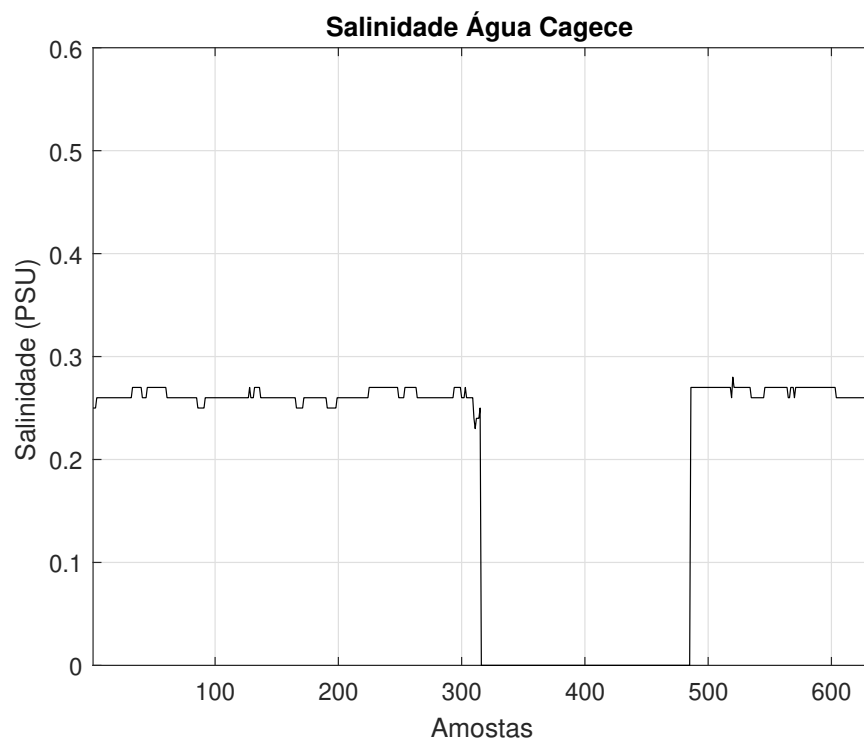
Fonte: Autor.

Figura 61: Dados coletados da água da distribuidora.

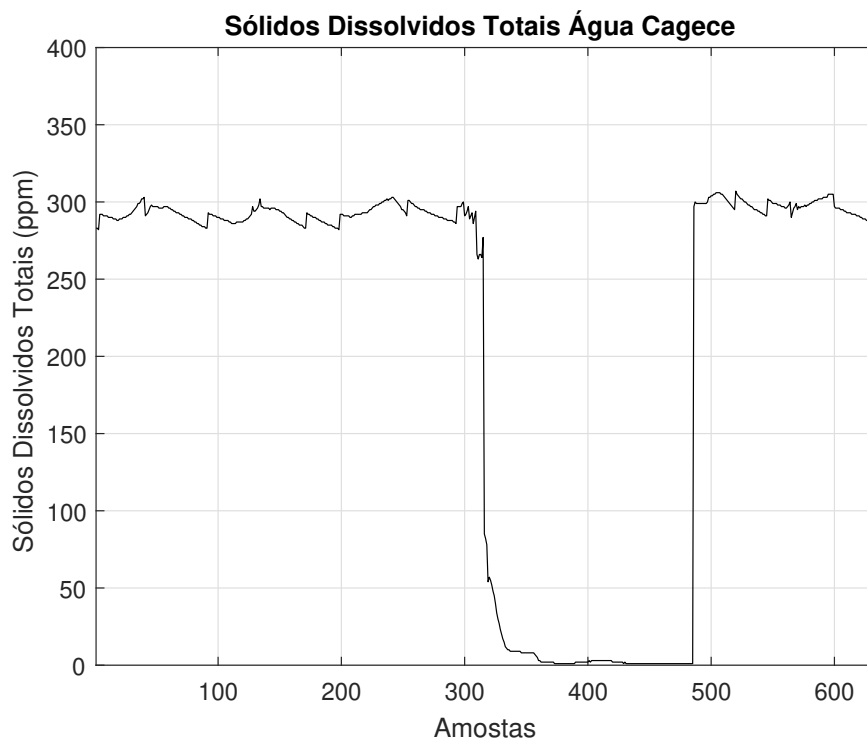
Fonte: Autor.

Figura 62: Dados coletados da água da distribuidora.

Fonte: Autor.

Figura 63: Dados coletados da água da distribuidora.

Fonte: Autor.

Figura 64: Dados coletados da água da distribuidora.

Fonte: Autor.

5.4 Consumo de energia nó sensor

Nesta seção, é calculada a estimativa do consumo de energia do sistema proposto. Com isso, a capacidade da bateria e a potência do painel solar utilizados no projeto também são propostas tendo em vista o consumo de energia do nó sensor. A fim de reduzir o consumo de energia, os sensores, o Arduino e o módulo *XBee* alternam entre os modos ativo e ocioso. A depender da necessidade do sistema.

O módulo de comunicação e de aquisição de dados são os grandes consumidores de energia: mantê-los ligados o tempo todo pode consumir a bateria antes que essa possa ser recarregada. Assim, o ciclo de trabalho fornece uma maneira eficaz de obter eficiência energética. O cálculo consiste na relação entre tempo ativo e tempo total. Nesta configuração, módulo de comunicação *XBee* é ativado por 150 ms a cada 15 minutos para coleta de dados, o que equivale a um ciclo de trabalho de aproximadamente 0,014%.

A Tabela 16 apresenta o ciclo de trabalho dos estados ativo e inativo, o consumo de energia (incluindo corrente média e tensão de trabalho) de cada componente do

protótipo do nó sensor. Este foi o cenário real obtido no projeto. Os sensores utilizados fazem uso de um circuito isolador que eleva o consumo de energia. Os circuitos isoladores adquiridos eram de um modelo mais antigo e não possuíam qualquer forma de economia de energia. O consumo de energia médio total deste monitoramento pode ser calculado como 530,4 mW, que é um consumo de energia elevado para uma estação de monitoramento ambiental.

Tabela 16: Cenário real do consumo de energia do nó sensor.

Dispositivos	Modo	Corrente (mA)	Ciclo de trabalho (%)	Corrente média (mA)	Voltagem de operação (V)
Arduino Pro Mini	Ativo	19,9	1,299	3,358	5
	Inativo	3,14	98,701		
Xbee S2C	Ativo	33,0	0,014	28,001	3,3
	Inativo	28,0	99,986		
Sensor de Turbidez	Ativo	40,0	0,007	0,003	5
	Inativo	0,0	99,993		
Sensor de OD	Ativo	55,0	0,134	21,046	5
	Inativo	21,0	99,866		
Sensor de ORP	Ativo	58,0	0,134	21,050	5
	Inativo	21,0	99,866		
Sensor de pH	Ativo	59,0	0,134	21,051	5
	Inativo	21,0	99,866		
Sensor de Condutividade	Ativo	90,0	0,134	21,092	5
	Inativo	21,0	99,866		
Sensor de Temperatura	Ativo	4,0	0,007	0,000	5
	Inativo	0,0	99,993		
Total				115,6	

Fonte: Autor

Usando a potência calculada, se uma bateria de capacidade de 2200 mAh (tensão de 3,7 V) for usada, o tempo teórico para o próximo carregamento é dado por $2200 \text{ (mAh)} * 3,7 \text{ (V)} / 530,4 \text{ (mW)} = 15$ horas. Na prática, uma bateria *LiPo* não pode ser 100% descarregada repetidamente (KOOIJMAN, 2015). Para tanto, será utilizada uma margem de 25%. Assim, 25% de 2200mAh é de cerca de 550 mAh. Assim, o novo tempo de recarga é agora dado por $1650 \text{ (mAh)} * 3,7 \text{ (V)} / 530,4 \text{ (mW)} = 11,5$ horas. Assim, a bateria pode suportar o sistema por quase doze horas sem recarga, o que não satisfaz o objetivo do projeto.

Isso se deve ao fato de o intervalo de tempo mais eficiente por um dia de um painel solar é de 6 horas, em média. A capacidade de um painel solar deve ser pelo menos 4 vezes o consumo médio de energia da carga em geral. Como o consumo médio de energia calculado é de 530,4 (mW), então uma carga de energia mínima do painel solar seria de cerca de $530,4 \text{ mW} * 4 = 2121,6 \text{ mW}$. Esta é uma razão pela qual um painel solar selecionado inicialmente teria que ser substituído por um de 2 W.

A Tabela 17 apresenta o que seria uma correção no consumo de energia do protótipo do nó sensor. Nela foram considerados redução no consumo do Arduino através de modificações no hardware e no *software*. Neste cenário o *XBee* é devidamente colocado no estado inativo. Por último os circuitos isoladores utilizados com os sensores seriam substituídos por uma versão mais recente que permite um estado de baixo consumo. A energia utilizada pelo nó sensor, devidamente modificado, ficaria em torno de 51,85 mW. Este baixo consumo de energia garante que o nó projetado possa utilizar uma bateria de menor carga e um painel solar de baixa potência.

Tabela 17: Cenário de correção do consumo de energia do nó sensor.

Dispositivos	Modo	Corrente (mA)	Ciclo de trabalho (%)	Corrente média (mA)	Voltagem de operação (V)
Arduino Pro Mini	Ativo	3,72	1,299	0,052	3,3
	Inativo	0,004	98,701		
Xbee S2C	Ativo	33,0	0,014	0,006	3,3
	Inativo	0,001	99,986		
Sensor de Turbidez	Ativo	40,0	0,007	0,003	5
	Inativo	0,0	99,993		
Sensor de OD	Ativo	84,0	0,134	3,907	3,3
	Inativo	3,8	99,866		
Sensor de ORP	Ativo	84,0	0,134	3,907	3,3
	Inativo	3,8	99,866		
Sensor de pH	Ativo	87,0	0,134	3,911	3,3
	Inativo	3,8	99,866		
Sensor de Condutividade	Ativo	97,0	0,134	3,925	3,3
	Inativo	3,8	99,866		
Sensor de Temperatura	Ativo	4,0	0,007	0,000	3,3
	Inativo	0,0	99,993		
Total				15,712	

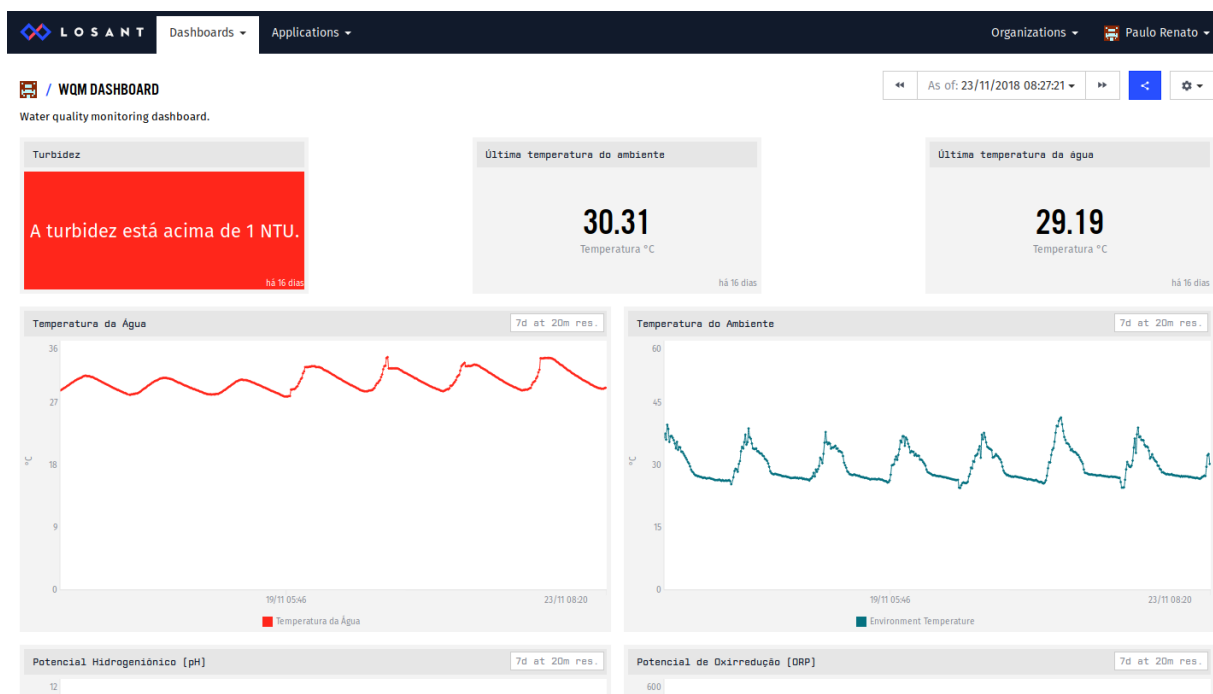
Fonte: Autor

Refazendo os cálculos, se uma bateria de capacidade de 2200 mAh (tensão de 3,7 V) for usada, o tempo teórico para o próximo carregamento é dado por 1650 (mAh) * 3,7 (V) / 51,85 (mW) = 117 horas (ou quase 5 dias). Um painel que atenderia este segundo cenário seria de 51,85 mW * 4 = 207,4 mW. O que garante um preço menor no custo de produção. Desta forma, as modificações do segundo cenário garantiriam autonomia do sistema mesmo que a bateria não fosse recarregada por 5 dias, o que satisfaz o objetivo do projeto.

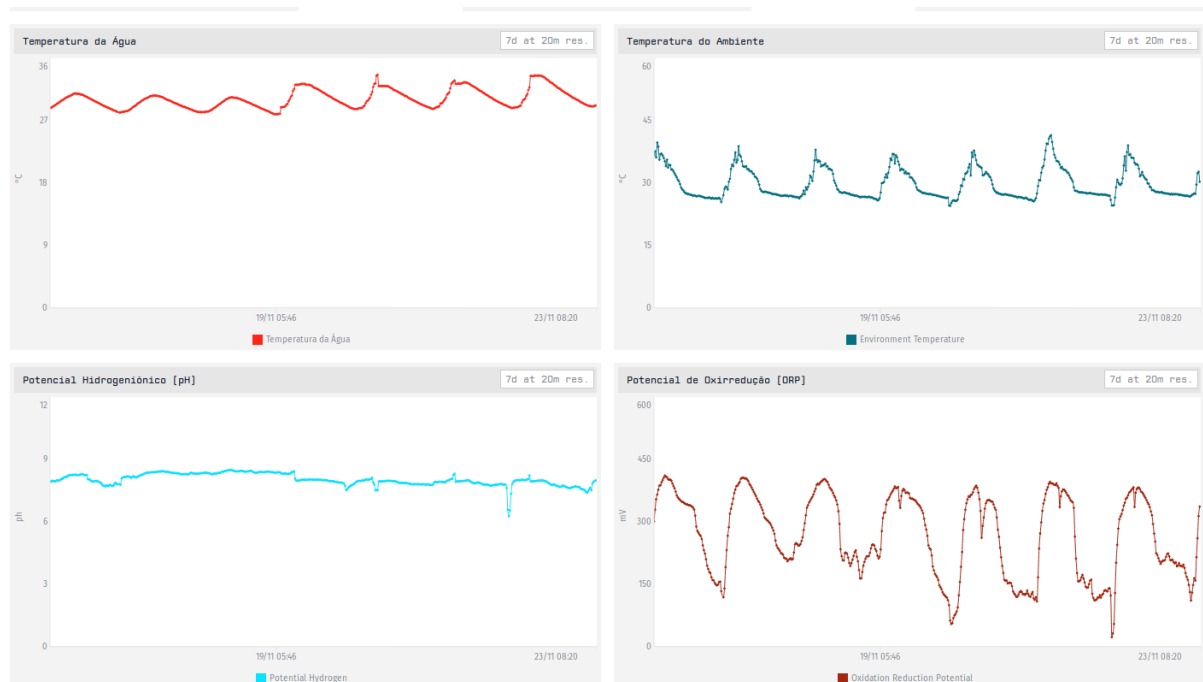
5.5 Plataforma Losant

Embora a plataforma Losant ofereça recursos para sistemas IoT não foi possível explorá-los todos. A função da plataforma dentro do SMQA proposto ficou restrita a armazenamento e redistribuição dos dados. É possível a verificação dos dados em tempo real em Painel de Controle MQA Losant. As Figuras 65, 66 e 67 foram extraídas do painel que permite a visualização dos dados em tempo real. O painel de controle criado na plataforma é interativo, permitindo modificar a forma de apresentação dos dados.

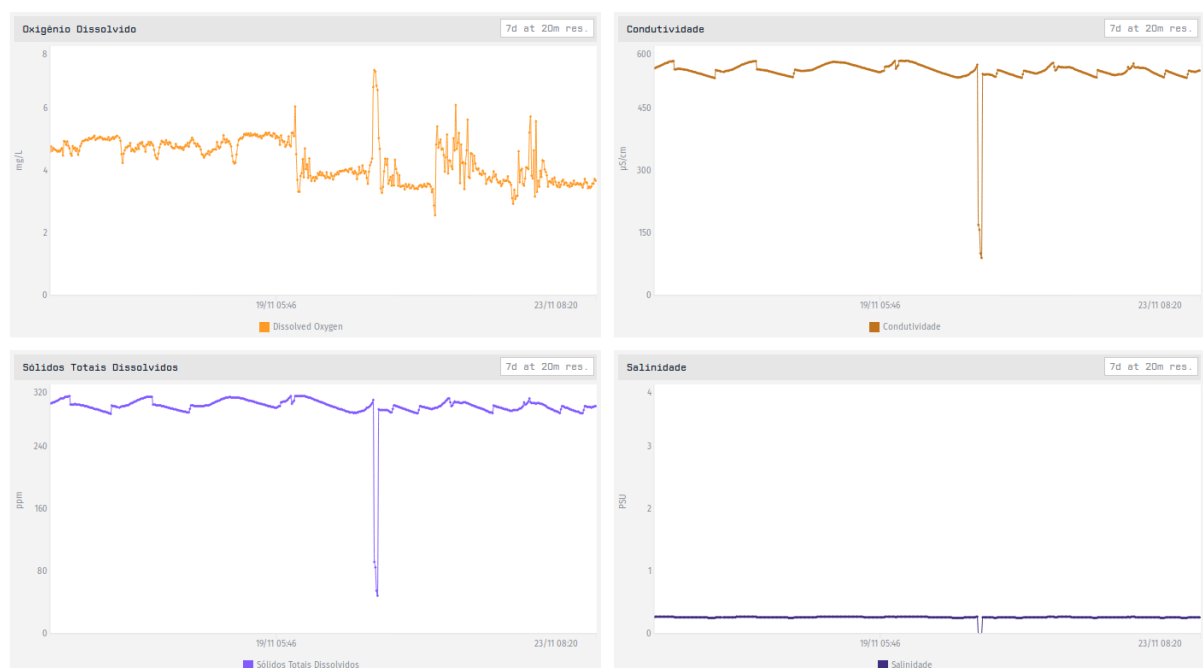
Figura 65: Tela extraída dos testes de monitoramento.



Fonte: Autor.

Figura 66: Tela extraída dos testes de monitoramento.

Fonte: Autor.

Figura 67: Tela extraída dos testes de monitoramento.

Fonte: Autor.

5.6 Conclusões

A solução de rede sem fio se mostrou adequada para o uso urbano. Os resultados podem ser ainda melhores com o uso de antenas com melhor ganho, uso de uma frequência diferente da já congestionada 2,4 GHz.

Em relação aos nós sensores, foi verificado a sua exatidão e precisão utilizando sensores de bancada de laboratório como referência. O sensor que mais divergiu foi o de condutividade, mas a causa possível pode ter sido a falta de um ponto de calibração durante os testes. Foi verificada que é necessário o uso de um circuito isolador nesse ambiente, pois é perceptível a interferência nas leituras. No teste de campo é possível ver que o sistema proposto consegue caracterizar o corpo d'água analisado.

O consumo do nó sensor ainda está inadequado por possuir componentes de alto consumo que não hibernam. Mas com alteração de componentes de hardware e uso de bibliotecas de *software* para diminuir o consumo, mesmo para um protótipo pode-se atingir um consumo menor, o que pode diminuir o custo do projeto no módulo de suprimento de energia.

A qualidade de água pôde ser enviada para um usuário final para análise em tempo real e *on-line*. A plataforma *on-line* em Nuvem, *Losant*, pode armazenar os dados com etiquetas com o momento de recepção dos dados e exibir os dados em um painel de controle que pode ser compartilhado publicamente.

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Procurou-se utilizar somente componentes de baixo custo na composição do *hardware* dos nós sensores e *gateway*. Esta escolha facilitou a compra dos componentes e eles realizaram suas funções satisfatoriamente. O protótipo do nó sensor possui um consumo médio de energia de 115,6 mA quando alimentado com 5 V. Este valor não está dentro dos objetivos do projeto, pois o nó sensor não conseguiria autonomia necessária sem elevar os custos do projeto.

Foi estabelecido um protocolo para testes da rede proposta. Os resultados dos testes demonstram que a rede possui pouca variação até os 80 metros, a partir desse ponto a perda de pacotes aumenta consideravelmente. Mesmo com uma queda acentuada na vazão entre os 40 e 60 metros, ainda assim é possível ter em torno de 30 - 40 nós transmitindo quadros de 34 bytes simultâneos. Com isso podemos inferir que a melhor distancia entre os nós sensores e o nó *gateway*, em ambientes urbanos, é em torno de 80 metros. Mas há espaço para melhorias, se for usada de uma antena de maior ganho e/ou o usados de rádios que transmitam em uma frequência menos poluída do que a de 2,4 GHz.

Ensaio comparando a medição do nó sensor com sensores de bancada demonstraram uma diferença nas leituras dos sistemas abaixo de 4,5%, o que demonstra a capacidade do sistema de medir parâmetros de qualidade da água. O sensor de condutividade teve um variação maior, mas pode ser justificada pela falta de calibração do ponto mais alto do sensor. O sistema também foi instalado no Laboratório de Petroquímica e na caixa d'água do IFCE, *campus* Caucaia para monitorar os dois tipos de água.

Quanto ao custo, a produção do protótipo completo do sistema teve valor menor do que 40% do preço de um sistema de monitoramento de qualidade da água proprietário. No entanto, considerando que mais da metade do custo do nó sensor (mais de R\$ 3.600,00) foi gasto com sensores de qualidade da água, uma solução mais barata, ou o desenvolvimento de uma sensores mais viáveis economicamente, poderia ser uma

solução interessante para estar dentro do objetivo de preço.

O *firmware* foi desenvolvido com a *IDE* Arduíno, que faz uma abstração sobre a linguagem C++. O *firmware* foi feito para realizar as leituras de forma simples e que, ao mesmo tempo, pudessem ser adicionados a comunicação com novos sensores. Tanto o concentrador também possui um padrão de comunicação que pode ser modificado sem precisar ser refeito. Assim, uma das partes mais importante do *software* seja ter características como modularidade e escalabilidade.

O projeto pode trazer benefícios que ajudem a avançar para sistemas inteligentes de monitoramento de qualidade da água, que deixa de ser um monitoramento exclusivamente passivo e passa a ter uma função ativa. O usuário deixa de depender exclusivamente da distribuidora de água e de órgãos governamentais para saber a qualidade da água. O benefício se estende a comunidade científica que se beneficia com um volume maior de dados sobre corpos d'água. Complementando os testes realizados em laboratório, ações preventivas podem ser tomadas por autoridades governamentais para garantir a qualidade da água disponível. Para além da qualidade da água, o sistema pode ser facilmente adaptado para monitora qualidade de outros líquidos.

fornecer uma diretriz para a configuração de um sistema de monitoramento de qualidade da água.

6.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, podemos aumentar a quantidade de nós para uma maior área de monitoramento. Pode-se explorar mais o uso da *API* da plataforma *Losant* que nos permitirá melhorar o sistema realizar com análise de tendência e tratamento de alertas em caso de mudanças nos parâmetros monitorados.

O sistema de monitoramento da qualidade da água pode ser estendido a vários locais. Vale a pena explorar um modelo dinâmico de sistema de água para simular o ciclo da água e a dinâmica da qualidade na área urbana assimilada com os dados coletados pelo sistema de monitoramento. O sistema também é valioso para ser integrado ao sistema de gestão de águas urbanas para explorar uma estratégia inteligente de gestão de recursos hídricos orientada por dados em uma cidade inteligente no futuro.

Aumentar a robustez do código dos nós sensores para que nós com mais ou menos sensores possam usar o mesmo código. Essa flexibilidade da quantidade de parâmetros lidos dos nós sensores afetará o formato do pacote e da recepção do pacote no nó coordenador. Exemplo, usar 1 ou 2 *bytes* para identificar os sensores disponíveis no nó sensor.

Otimizar o consumo de energia com tecnologias melhores para aquisição e armazenamento, *hardware* com menor consumo (sensores e módulo principal) e através da taxa de amostragem. Foi utilizado 15 min de frequência de amostragem da água mais um sistema mais inteligente pode mudar o intervalo com que são feitas essas amostragem para garantir um tempo maior de uso da bateria.

Referências Bibliográficas

ADAFRUIT. **Li-Ion (Lithium-Ion) and LiPoly (Lithium Polymer)**. 2018. Disponível em: <<https://learn.adafruit.com/all-about-batteries/liion-lithium-ion-and-li-poly-lithium-polymer>>. Acesso em: 16/07/2018.

ADU-MANU, Kofi Sarpong; TAPPARELLO, Cristiano; HEINZELMAN, Wendi; KATSRIKU, Ferdinand Apietu; ABDULAI, Jamal-Deen. Water quality monitoring using wireless sensor networks: Current trends and future research directions. **ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)**, ACM, v. 13, n. 1, p. 4, 2017.

AHUJA, Sanjay; POTTI, Pavan. An introduction to rfid technology. **Communications and Network**, v. 2, n. 3, p. 183–186, 2010.

AL-FUQAHA, Ala; GUIZANI, Mohsen; MOHAMMADI, Mehdi; ALEDHARI, Mohammed; AYYASH, Moussa. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, 2015.

ALFAKIT. **Equipamentos para análise de água, solo e efluentes**. 2019. Disponível em: <<https://alfakit.com.br>>. Acesso em: 10/01/2019.

ALLIANCE, LoRa. **LoRaWAN**. 2018. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/about-lorawan>>. Acesso em: 15/06/2018.

AMRUTA, M Kulkarni; SATISH, M Turkane. Solar powered water quality monitoring system using wireless sensor network. In: IEEE. **Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s), 2013 International Multi-Conference on**. [S.l.], 2013. p. 281–285.

ANA. **Agência Nacional de Águas**. 2016. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 15/06/2016.

ANTONOPOULOS, Christos; AUZANNEAU, Fabrice; BONHOMME, Yannick; CARTRON, Mickael; CORREDOR, Iván; DAGILYTE, Ausra; SILVA-FARINA, Antonio da; ARCAS-CASTRO, Guillermo de; HERNANDO, Ana García; GHERMAN, Valentin; GIANNOULIS, Spilios; HERNÁNDEZ, Vicente; HERNÁNDEZ-PÉREZ, Eduardo; KERASIoTIS, Fotis; KOULAMAS, Christos; LIUTKEVICIUS, Agnius; LLORENTE-ALONSO, Alvaro; LONGARES-ABAIZ, Javier; LOPEZ-MARCOS, Mario; VRUBLIAUSKAS, Arunas. **Problem Solving for Wireless Sensor Networks**. [S.l.: s.n.], 2008. ISBN 978-1-84800-202-9.

ARDUINO. **Introduction**. 2017. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 08/02/2017.

ATLAS. **Atlas Scientific**. 2017. Disponível em: <<https://www.atlas-scientific.com/>>. Acesso em: 08/02/2017.

AYAZ, Muhammad; AMMAD-UDDIN, Mohammad; BAIG, Imran *et al.* Wireless sensor's civil applications, prototypes, and future integration possibilities: A review. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 18, n. 1, p. 4–30, 2017.

BRASIL, M d S. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, n. 12, 2011.

BRASIL, M d S. Portaria de consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do sistema Único de saúde. **Diário Oficial da União**, n. 12, 2017.

BURKE, Jeffrey Allenby David G. **Low Cost Water Quality Monitoring Needs Assessment**. 2014. Disponível em: <<https://bit.ly/2I5Kyy1>>. Acesso em: 22/02/2017.

CAPELLA, Juan V; BONASTRE, Alberto; ORS, Rafael; PERIS, Miguel. In line river monitoring of nitrate concentration by means of a wireless sensor network with energy harvesting. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 177, p. 419–427, 2013.

CAPELLA, Juan Vicente; CAMPELO, José Carlos; BONASTRE, Alberto; ORS, Rafael. A reference model for monitoring iot wsn-based applications. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 16, n. 11, p. 1816, 2016.

CCME, Canadian Council of Ministers of the Environment. **Canadian environmental quality guidelines**. [S.l.]: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2002.

CHEN, Yiheng; HAN, Dawei. Big data and hydroinformatics. **Journal of Hydroinformatics**, IWA Publishing, v. 18, n. 4, p. 599–614, 2016.

CHEN, Yiheng; HAN, Dawei. Water quality monitoring in smart city: A pilot project. **Automation in Construction**, Elsevier, v. 89, n. 1, p. 307–316, 2018.

CHI, Qingping; YAN, Hairong; ZHANG, Chuan; PANG, Zhibo; XU, Li Da. A reconfigurable smart sensor interface for industrial wsn in iot environment. **IEEE transactions on industrial informatics**, IEEE, v. 10, n. 2, p. 1417–1425, 2014.

CHUNG, Wan-Young; YOO, Jae-Ho. Remote water quality monitoring in wide area. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 217, p. 51–57, 2015.

CONAMA. Resolução. 357, de 17 de março de 2005. **Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA**, v. 357, 2005.

CONAMA. Resolução n.º 430, de 13 de maio de 2011. dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a resolução n.º 357, de 17 de março de 2005, do conselho nacional do meio ambiente-conama. **Diário Oficial da União**, 2011.

CULLER, David; CHAKRABARTI, Samita. 6lowpan: Incorporating ieee 802.15. 4 into the ip architecture. **White paper**, 2009.

- CURIEL, Cesar Eduardo Hernández; BALTAZAR, Victor Hugo Benítez; RAMÍREZ, Jesús Horacio Pacheco. Wireless sensor networks for water quality monitoring: Prototype design. **International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological, and Geophysical Engineering**, v. 10, n. 2, p. 158–163, 2016.
- DFROBOT. **Gravity: Analog Turbidity Sensor For Arduino**. 2018. Disponível em: <<https://www.dfrobot.com/product-1394.html>>. Acesso em: 10/02/2018.
- DIGI. **XBee/XBee-PRO S2C Zigbee RFModule**. Mineápolis, 2018.
- DIGI. **XCTU Configuration and Test Utility Software**. Mineápolis, 2018.
- DINH, Tuan Le; HU, Wen; SIKKA, Pavan; CORKE, Peter; OVERS, Leslie; BROSNAN, Stephen. Design and deployment of a remote robust sensor network: Experiences from an outdoor water quality monitoring network. In: IEEE. **Local Computer Networks, 2007. LCN 2007. 32nd IEEE Conference on**. [S.l.], 2007. p. 799–806.
- DONG, Jianhua; WANG, Guoyin; YAN, Huyong; XU, Ji; ZHANG, Xuerui. A survey of smart water quality monitoring system. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, v. 22, n. 7, p. 4893–4906, 2015.
- DUNBABIN, Matthew; GRINHAM, Alistair. Experimental evaluation of an autonomous surface vehicle for water quality and greenhouse gas emission monitoring. In: IEEE. **Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2010. p. 5268–5274.
- DUNBABIN, Matthew; MARQUES, Lino. Robots for environmental monitoring: Significant advancements and applications. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, IEEE, v. 19, n. 1, p. 24–39, 2012.
- EICHHORN, Mike; TAUBERT, Ralf; AMENT, Christoph; JACOBI, Marco; PFUETZENREUTER, Torsten. Modular auv system for sea water quality monitoring and management. In: IEEE. **OCEANS-Bergen, 2013 MTS/IEEE**. [S.l.], 2013. p. 1–7.
- EPA, USA. National recommended water quality criteria. **United States Environmental Protection Agency', Office of Water, Office of Science and Technology**, 2009.
- ERGULER, Imran. A potential weakness in rfid-based internet-of-things systems. **Pervasive and Mobile Computing**, Elsevier, v. 20, p. 115–126, 2015.
- FAUSTINE, Anthony; MVUMA, Aloys N; MONGI, Hector J; GABRIEL, Maria C; TENGE, Albino J; KUCEL, Samuel B. Wireless sensor networks for water quality monitoring and control within lake victoria basin: prototype development. **Wireless Sensor Network**, Scientific Research Publishing, v. 6, n. 12, p. 281, 2014.
- FILIPEFLOP. **Módulo XBee S2C ZigBee Wire Antenna**. 2018. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/>>. Acesso em: 10/07/2018.
- FONDRIEST, Environmental Inc. **Fundamental of Environment Measurements**. 2018. Disponível em: <<https://www.fondriest.com/environmental-measurements/>>. Acesso em: 20/05/2018.

FUZINATTO, Cristiane Funghetto. **Avaliação da qualidade da água de rios localizados na Ilha de Santa Catarina utilizando parâmetros toxicológicos e o índice de qualidade de água**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

GALLAH, N; BAHRI, OB; LAZREG, N; CHAOUCH, A; BESBES, Kamel. Water quality monitoring based on small satellite technology. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, SCIENCE & INFORMATION SAI ORGANIZATION LTD 19 BOLLING RD, BRADFORD, WEST YORKSHIRE, 00000, ENGLAND, v. 8, n. 3, p. 357–362, 2017.

GDESTE. **Grupo de Desenvolvimento de Sistemas de Telecomunicações e Sistemas Embarcados (GDESTE)**. 2018. Disponível em: <<http://gdeste.ifce.edu.br/>>. Acesso em: 17/07/2018.

GOMEZ, Carles; PARADELLS, Josep. Wireless home automation networks: A survey of architectures and technologies. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 48, n. 6, 2010.

GUBBI, Jayavardhana; BUYYA, Rajkumar; MARUSIC, Slaven; PALANISWAMI, Marimuthu. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. **Future generation computer systems**, Elsevier, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.

HUAWEI. **LoRaWAN**. 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/2Dw0DP4>>. Acesso em: 10/02/2018.

IFCE. **Campus Caucaia**. 2018. Disponível em: <<https://ifce.edu.br/caucaia>>. Acesso em: 15/07/2018.

IN-SITU. **Aqua TROLL® 600 Multiparameter Sonde Spec Sheet**. 2018. Disponível em: <<https://in-situ.com/wp-content/uploads/2015/12/AT\textunderscore600>>. Acesso em: 17/07/2018.

INSTEON. Insteon whitepaper, the details,. **White Paper**, 2013. Disponível em: <<http://cache.insteon.com/pdf/insteondetails.pdf>>.

ITO, Alexandre Hitoshi. **Smart Sensor: Uso de Sensores de Cloro com Transmissão em Redes sem Fio no Monitoramento da Qualidade de Água em Sistema de Distribuição**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.

JADALIHA, Mahdi; CHOI, Jongeun. Environmental monitoring using autonomous aquatic robots: Sampling algorithms and experiments. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 3 Park Avenue, 17 th Fl New York NY 10016-5997 United States, v. 21, n. 3, p. 899–905, 2013.

KELLY, Vivian. New ieee 802.11 ac™ specification driven by evolving market need for higher, multi-user throughput in wireless lans. **IEEE Standards Association**, 2014.

KINNEY, Patrick *et al.* Zigbee technology: Wireless control that simply works. In: **Communications design conference**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 1–7.

KOOIJMAN, Matthijs Mathhijs. **Building Wireless Sensor Networks Using Arduino**. [S.l.]: Packt Publishing, 2015. 249 p. ISBN 978-1-78439-558-2.

KORTUEM, Gerd; KAWSAR, Fahim; SUNDRAMOORTHY, Vasughi; FITTON, Daniel. Smart objects as building blocks for the internet of things. **IEEE Internet Computing**, IEEE, v. 14, n. 1, p. 44–51, 2010.

KOTAMÄKI, Niina; THESSLER, Sirpa; KOSKIAHO, Jari; HANNUKKALA, Asko O; HUITU, Hanna; HUTTULA, Timo; HAVENTO, Jukka; JÄRVENPÄÄ, Markku. Wireless in-situ sensor network for agriculture and water monitoring on a river basin scale in southern finland: Evaluation from a data user's perspective. **Sensors**, Molecular Diversity Preservation International, v. 9, n. 4, p. 2862–2883, 2009.

LEONARD, Naomi E; PALEY, Derek A; DAVIS, Russ E; FRATANTONI, David M; LEKIEN, Francois; ZHANG, Fumin. Coordinated control of an underwater glider fleet in an adaptive ocean sampling field experiment in monterey bay. **Journal of Field Robotics**, Wiley Online Library, v. 27, n. 6, p. 718–740, 2010.

LIBELIUM. **Smart Water Sensors to monitor water quality in rivers, lakes, and the sea**. 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/2tvO4wv>>. Acesso em: 03/12/2016.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. [S.l.]: Átomo, 2008.

LIU, Jincun; WU, Zhengxing; YU, Junzhi. Design and implementation of a robotic dolphin for water quality monitoring. In: IEEE. **Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2016 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2016. p. 835–840.

LOPES, Frederico Wagner de Azevedo; JR, AP Magalhães; PEREIRA, JAA. Avaliação da qualidade das águas e condições de balneabilidade na bacia do ribeirão de carrancas/mg. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 4, p. 111–120, 2008.

LOSANT. **Getting Started with the Arduino WiFi 101 Shield**. 2018. Disponível em: <<https://docs.losant.com/getting-started/boards/getting-started-with-arduino-wifi-101/>>. Acesso em: 09/07/2018.

LOSANT. **The Losant Enterprise IoT Platform**. 2018. Disponível em: <<https://www.losant.com/iot-platform>>. Acesso em: 14/07/2018.

MAINETTI, Luca; PATRONO, Luigi; VILEI, Antonio. Evolution of wireless sensor networks towards the internet of things: A survey. In: IEEE. **Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2011 19th International Conference on**. [S.l.], 2011. p. 1–6.

MELO, Marcelo Laranjeira. **Veículo Aquático Autônomo para Monitoramento da Qualidade da Água em Lagoas**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Fortaleza, Fortaleza, 2017.

MOON, Ayaz Hassan; IQBAL, Ummer; BHAT, G Mohiuddin. Secured data acquisition system for smart water applications using wsn. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 10, 2016.

MURPHY, Kevin; HEERY, Brendan; SULLIVAN, Timothy; ZHANG, Dian; PALUDETTI, Lizandra; LAU, King Tong; DIAMOND, Dermot; COSTA, Ernane; REGAN, Fiona *et al.* A low-cost autonomous optical sensor for water quality monitoring. **Talanta**, Elsevier, v. 132, p. 520–527, 2015.

O'FLYNN, B; REGAN, F; LAWLOR, Antoin; WALLACE, John; TORRES, J; O'MATHUNA, C. Experiences and recommendations in deploying a real-time, water quality monitoring system. **Measurement Science and Technology**, IOP Publishing, v. 21, n. 12, p. 124004, 2010.

O'FLYRM, B; MARTINEZ, R; CLEARY, John; SLATER, C; REGAN, F; DIAMOND, D; MURPHY, Heather. Smartcoast: a wireless sensor network for water quality monitoring. In: IEEE. **Local Computer Networks, 2007. LCN 2007. 32nd IEEE Conference on**. [S.l.], 2007. p. 815–816.

OMS. Guidelines for drinking-water quality. **WHO chronicle**, v. 38, n. 4, p. 104–8, 2011.

PNQA. **Portal da Qualidade das Águas**. 2016. Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/>>. Acesso em: 20/08/2016.

POSTOLACHE, Octavian; PEREIRA, José Dias; GIRÃO, Pedro Silva. Wireless sensor network-based solution for environmental monitoring: water quality assessment case study. **IET Science, Measurement & Technology**, IET, v. 8, n. 6, p. 610–616, 2014.

QUICK-TECK. **DS18B20 Waterproof Temperature Sensor Cable**. 2014. Disponível em: <<https://bit.ly/2O0xUpr>>. Acesso em: 27/03/2018.

RAO, Aravinda S; MARSHALL, Stephen; GUBBI, Jayavardhana; PALANISWAMI, Marimuthu; SINNOTT, Richard; PETTIGROVET, Vincent. Design of low-cost autonomous water quality monitoring system. In: IEEE. **Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2013 International Conference on**. [S.l.], 2013. p. 14–19.

RAPOUSIS, Nikolaos; KATSARAKIS, Michalis; PAPADOPOULI, Maria. Qowater: A crowd-sourcing approach for assessing the water quality. In: ACM. **Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Cyber-Physical Systems for Smart Water Networks**. [S.l.], 2015. p. 11.

RASIN, Zulhani; ABDULLAH, Mohd Rizal. Water quality monitoring system using zigbee based wireless sensor network. **International Journal of Engineering & Technology**, v. 9, n. 10, p. 24–28, 2009.

RIBEIRO, Maria Claudia Martins. Nova portaria de potabilidade de água: busca de consenso para viabilizar a melhoria da qualidade de água potável distribuída no brasil. **Revista DAE, São Paulo**, n. 189, p. 8–14, 2012.

- RITTER, Christie; COTTINGHAM, Mallory; LEVENTHAL, Jared; MICKELSON, Alan. Remote delay tolerant water quality monitoring. In: IEEE. **Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), 2014 IEEE**. [S.l.], 2014. p. 462–468.
- SHIN, Daejung; NA, Seung You; KIM, Jin Young; BAEK, Seong-Joon. Sonar localization using ubiquitous sensor network for water pollution monitoring fish robots. In: IEEE. **Signal Processing and Information Technology, 2007 IEEE International Symposium on**. [S.l.], 2007. p. 80–85.
- SHU, Tongxin; XIA, Min; CHEN, Jiahong; SILVA, Clarence de. An energy efficient adaptive sampling algorithm in a sensor network for automated water quality monitoring. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 11, p. 2551, 2017.
- SILVA, Paulo Renato Xavier da; MARINHO, Cleiton da Silva; SILVA, Jorge Fredericson de Macedo Costa; MENEZES, José Wally Mendonça. Aplicação de rssf para monitoramento da qualidade da água no contexto de internet das coisas. In: IEEE. **VIII Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação. ENCOM**. Salvador, 2018. p. 157–158.
- SPERLING, Marcos Von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed.. ed. [S.l.]: Editora UFMG, 2014.
- SUN, Bo; AHMED, Farhad; SUN, Frank; QIAN, Qin; XIAO, Yang. Water quality monitoring using storm 3 data loggers and a wireless sensor network. **International Journal of Sensor Networks**, Inderscience Publishers (IEL), v. 20, n. 1, p. 26–36, 2016.
- TECNOPON. **Equipamentos para laboratório**. 2019. Disponível em: <<https://www.tecnopon.com.br/>>. Acesso em: 10/01/2019.
- THAKARE, US; BORKAR, SM. Implementation of wsn's device addressing, data aggregation and secure control in iot environment. **IEEE Trans**, v. 5, 2017.
- TUNA, Gurkan; NEFZI, Bilel; ARKOC, Orhan; POTIRAKIS, Stelios M. Wireless sensor network-based water quality monitoring system. **Key Engineering Materials**, Trans Tech Publications, v. 605, p. 47–50, 2014.
- TUNDISI, José Galizia; TUNDISI, Takako Matsumura. **Limnologia**. [S.l.]: Oficina de textos, 2016.
- VASCONCELLOS, Gabriel Rodrigues. **Avaliação das Condições de Oxirredução em Sistema Alagado Construído de Escoamento Horizontal Subsuperficial**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- WAGH, Trusha R; RAO, AP. River monitoring an application for wireless sensor network platform. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 4, n. 11, p. 511–515, 2014.

- WANG, Y-P Eric; LIN, Xingqin; ADHIKARY, Ansuman; GROVLEN, Asbjorn; SUI, Yutao; BLANKENSHIP, Yufei; BERGMAN, Johan; RAZAGHI, Hazhir S. A primer on 3gpp narrowband internet of things. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 55, n. 3, p. 117–123, 2017.
- WIRANTO, Goib; MAMBU, Grace A; HERMIDA, I Dewa Putu; WIDODO, Slamet *et al.* Design of online data measurement and automatic sampling system for continuous water quality monitoring. In: IEEE. **Mechatronics and Automation (ICMA), 2015 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2015. p. 2331–2335.
- WIXTED, Andrew J; KINNAIRD, Peter; LARIJANI, Hadi; TAIT, Alan; AHMADINIA, Ali; STRACHAN, Niall. Evaluation of lora and lorawan for wireless sensor networks. In: IEEE. **SENSORS, 2016 IEEE**. [S.l.], 2016. p. 1–3.
- WIZNET. **W5100 Datasheet**. Gyeonggi-do, 2010.
- YAQOOB, Ibrar; AHMED, Ejaz; HASHEM, Ibrahim Abaker Targio; AHMED, Abdelmuttlib Ibrahim Abdalla; GANI, Abdullah; IMRAN, Muhammad; GUIZANI, Mohsen. Internet of things architecture: Recent advances, taxonomy, requirements, and open challenges. **IEEE wireless communications**, IEEE, v. 24, n. 3, p. 10–16, 2017.
- ZAKARIA, Yona; MICHAEL, Kisangiri. An integrated cloud-based wireless sensor network for monitoring industrial wastewater discharged into water sources. **Wireless Sensor Network**, Scientific Research Publishing, v. 9, n. 08, p. 290, 2017.
- ZHAN, Andong; CHEN, Guihai; WANG, Wei. Utilizing automatic underwater vehicles to prolong the lifetime of underwater sensor networks. In: IEEE. **Computer Communications and Networks, 2009. ICCCN 2009. Proceedings of 18th International Conference on**. [S.l.], 2009. p. 1–6.
- ZHANG, Minhai; SHE, Shuangxiang. Wastewater monitoring system in industrial workshop based on wireless sensor network. **International Journal of Online Engineering (iJOE)**, v. 13, n. 03, p. 63–74, 2017.
- ZHU, Xiuna; LI, Daoliang; HE, Dongxian; WANG, Jianqin; MA, Daokun; LI, Feifei. A remote wireless system for water quality online monitoring in intensive fish culture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 71, p. S3–S9, 2010.

APÊNDICE A – Fundamentação Teórica

Tabela 18: Trabalhos relacionados.

Referência	Parâmetro Medidos	Tecnologia de comunicação	Frequência de amostragem	Principais contribuições
(AMRUTA; SATISH, 2013)	pH, OD, Turbidez	ZigBee	1 hora	Alimentação por painel solar e baterias
(BURKE, 2014)	Temperatura, pH, OD, condutividade, salinidade, condutância específica, resistividade, nível de água, ORP, TDS	ZigBee	Programável	Data loggers open source baseados em Arduino; uso de sensores comerciais, alimentação por painel solar e baterias; um portal para envio dos dados para exibição.
(CAPELLA <i>et al.</i> , 2013)	Nitrato	ZigBee, GPRS/GSM	1 semana	Implantação de colheita de energia RSSF para monitoramento contínuo do rio
(CURIEL; BALTAZAR; RAMÍREZ, 2016)	Temperatura, pH	ZigBee	não especificado	Projeto e implementação do protótipo MQA baseado no Arduino Uno

(FAUSTINE <i>et al.</i> , 2014)	Temperatura, pH, OD, condutividade	ZigBee, GSM/GPRS (SMS)	20 min	Protótipo do sistema MQA baseado no microcontrolador Arduino e alimentado por painéis solares
(MOON; IQBAL; BHAT, 2016)	Temperatura, pH, OD, condutividade, ORP, turbidez	RF	não especificado	Concepção e implementação do sistema MQA com funcionalidades de segurança (autenticação e encriptação)
(MURPHY <i>et al.</i> , 2015)	Temperatura, pH, condutividade, DO, nível de água, clorofila, turbidez, concentração de algas azul-esverdeadas	WiFi	10 s	Utilização de sensor óptico para monitorização do ambiente aquático
(POSTOLACHE; PEREIRA; GIRÃO, 2014)	Temperatura, condutividade, turbidez	ZigBee	não especificado	Projeto de sistema MQA de baixo custo baseado em componentes off-the-shelf

(RAO <i>et al.</i> , 2013)	Temperatura, pH, luz, condutividade, OD, potencial de redução da oxidação	4G	10 s	Projeto de sistema MQA de baixo custo baseado em hardware open-source (Arduino)
(RAPOUSIS; KATSARAKIS; PAPADOPOULI, 2015)	Temperatura, pH, condutividade, ORP, cloro	WiFi	não especificado	Combinação de informações RSSF e multidão (feedback do usuário)
(RITTER <i>et al.</i> , 2014)	Temperatura, pH, DO, ORP, condutividade	ZigBee	sobre demanda	Coleta contínua de dados no sensor com acesso a dados sobre medida
(TUNA <i>et al.</i> , 2014)	Temperatura, pH, OD, condutividade, turbidez, nitrato	ZigBee	não especificado	Projeto de nós sensores sem fio montados em bóias com visualização de dados na Web
(WAGH; RAO, 2014)	pH, nível de água	ZigBee	15 min	Projeto de sensores simples para monitoramento do rio alimentado por painel solar

(WIRANTO <i>et al.</i> , 2015)	Temperatura, pH, OD	ZigBee	não especificado	Design de sistema MQA contínuo com unidade automática de recolha de amostras
(ZHANG; SHE, 2017)	Temperatura, pH	ZigBee/GPRS	não especificado	Protótipo de sistema MQA contínuo somente para transporte de dados
(CHEN; HAN, 2018)	Temperatura, pH, OD, ORP, condutividade e turbidez	WiFi	15 min	Sistema MQA que utiliza sonda multiparamétrica e câmera; uso de sensores comerciais; tratamento e exibição de dados com auxílio de VMs, SDN e Grafana; alimentação por painel solar e baterias.

Fonte: Autor.