

LUCAS NUNES MONTEIRO

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA
EM TEMPO REAL**

Sorocaba

2020

LUCAS NUNES MONTEIRO

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA
EM TEMPO REAL**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafão

Coorientador: Prof. Dr. Ivando Severino Diniz

Sorocaba

2020

M775s	Monteiro, Lucas Nunes
	Sistema de monitoramento da qualidade da água em tempo real / Lucas Nunes Monteiro. -- Sorocaba, 2020 103 p. : il., tabs.
	Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba Orientador: Fernando Pinhabel Marafão Coorientador: Ivando Severino Diniz
	1. Internet das coisas. 2. Sistemas embarcados (Computadores). 3. Água Qualidade. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Sistema de Monitoramento da Qualidade da Água em Tempo Real

AUTOR: LUCAS NUNES MONTEIRO

ORIENTADOR: FERNANDO PINHABEL MARAFAO

COORIENTADOR: IVANDO SEVERINO DINIZ

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Sistemas Eletrônicos pela Comissão Examinadora:

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Fernando Pinhabel Marafao".

Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFAO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Leonardo Fernandes Fraceto".

Prof. Dr. LEONARDO FERNANDES FRACETO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Fabricio Parra Santilio".

Prof. Dr. FABRICIO PARRA SANTILIO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Mato Grosso

Sorocaba, 27 de novembro de 2020.

Dedico esse trabalho para todas as pessoas envolvidas no desenvolvimento do mesmo, desde meus orientadores aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que apesar de todas as dificuldades enfrentadas, sempre acreditaram e me apoiaram em todas as minhas escolhas da vida.

Ao meu orientador, Fernando Pinhabel Marafão, pelo valioso apoio e orientação, sempre disponível para transmitir seu conhecimento e incitar reflexões indispensáveis para a realização desse trabalho com êxito. Agradeço a oportunidade de trabalho em conjunto; trabalho que me proporcionou grande desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao meu co-orientador, Ivando Severino Diniz, por sempre apoiar e fomentar a pesquisa e desenvolvimento de novos projetos. Obrigado pela confiança e pelo grande trabalho realizado com todos os alunos.

A equipe Yamatec, por me fornecer todos recursos necessários para o desenvolvimento do projeto e pelo apoio de todos os membros que a compõe. Agradeço ao período disponibilizado, qual foi destinado para o desenvolvimento do projeto.

RESUMO

O monitoramento de parâmetros físico-químicos e biológicos, que envolvem a qualidade das águas, é fundamental para a gestão de recursos hídricos, permitindo a avaliação e o acompanhamento de alterações de suas características. O Índice de Qualidade das Águas (IQA) é o principal indicador qualitativo utilizado no Brasil para avaliação da qualidade da água para o abastecimento público, sendo composto por parâmetros como: temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido (OD), resíduo total, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), coliformes termotolerantes, nitrogênio total, fósforo total e turbidez. Neste contexto e considerando a importância de alguns parâmetros principais, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema para o monitoramento em tempo real da qualidade da água, composto por: sensores e circuitos eletrônicos para o condicionamento e aquisição de dados, dispositivo para processamento, armazenamento, análise e transmissão (GSM/GPRS) dos dados, além de aplicativo para monitoramento remoto. O aplicativo é capaz de disponibilizar as informações dos parâmetros de forma gráfica e de receber notificações de alertas sobre possíveis desvios da qualidade da água monitorada. Os sistemas eletrônico e de *software* foram validados por meio de simulações e testes em bancada. Uma análise comportamental dos sensores de cada parâmetro monitorado foi realizada sob diferentes condições da qualidade da água, possibilitando a identificação de uma correlação positiva entre os parâmetros sólidos dissolvidos totais (TDS) e turbidez, e uma correlação negativa entre os parâmetros OD e TDS e turbidez e OD. Com os dados do monitoramento, uma análise de correlação utilizando o método de Pearson foi realizada, sendo possível: a identificação da diminuição do pH positivamente relacionado com a diminuição da quantidade de oxigênio dissolvido na água; do aumento de sólidos totais dissolvidos (TDS), capazes de influenciar a diminuição do pH; bem como a análise do aumento de TDS e a diminuição de oxigênio dissolvido.

Palavras-chave: Internet das coisas. Sistemas embarcados (Computadores). Água Qualidade.

ABSTRACT

The monitoring of physical-chemical and biological parameters, which involve water quality, is essential for the management of water resources, allowing the assessment and monitoring of changes in their characteristics. The Water Quality Index (IQA) is the main qualitative indicator used in Brazil to assess the quality of water for public supply, composed of parameters such as: water temperature, pH, dissolved oxygen (OD), total waste, biochemical demand of the oxygen (BOD), thermotolerant coliforms, total nitrogen, total phosphorus and turbidity. In this context and considering the importance of some main parameters, this work aims to develop a system for real-time monitoring of water quality, consisting of: sensors and electronic circuits for conditioning and data acquisition, device for processing, storage, analysis and transmission (GSM/GPRS) data, as well as an application for remote monitoring. The application is capable of providing parameter information graphically and notification of possible deviations from the monitored water quality. The electronic and software systems were validated through simulations and bench tests. A behavioral analysis of the sensors of each monitored parameter was carried out under different water quality conditions, allowing the identification of a positive correlation between the parameters total dissolved solids TDS and turbidity, and a negative correlation between the parameters OD and TDS and turbidity and OD. With the monitoring data, a correlation analysis was performed by the Pearson method, making it possible: to identify the pH decrease positively related to the decrease in the amount of oxygen dissolved in the water; the increase in the total dissolved solids (TDS), capable of influencing the pH drop; as well as the analysis of increased TDS and decreased dissolved oxygen.

Keywords: Internet of things. Embedded systems (Computers). Water Quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Influência da temperatura nos parâmetros de qualidade das águas	18
Figura 2 – Curva média de qualidade do parâmetro temperatura	18
Figura 3 – Níveis de turbidez.....	20
Figura 4 – Curva média de qualidade do parâmetro turbidez	21
Figura 5 – Curva média de qualidade do parâmetro resíduo total	23
Figura 6 – Curva média de qualidade do parâmetro pH	24
Figura 7 – Solubilidade do gás oxigênio.....	25
Figura 8 – Curva média de qualidade do parâmetro oxigênio dissolvido	26
Figura 9 – Curva média de qualidade do parâmetro DBO	28
Figura 10 – Curva média de qualidade do parâmetro nitrogênio total	29
Figura 11 – Curva média de qualidade do parâmetro fósforo total	30
Figura 12 – Curva média de qualidade do parâmetro coliformes termotolerantes	31
Figura 13 – Arquitetura do sistema proposto	41
Figura 14 – Termômetro digital DS18B20	43
Figura 15 – Sensor de Turbidez SKU-SEN0189	44
Figura 16 – Sensor de Sólidos Dissolvidos Totais SKU-SEN0244	45
Figura 17 – Mini sonda de pH	46
Figura 18 – KIT-105D para Oxigênio Dissolvido	48
Figura 19 – Diagrama de blocos de um circuito de condicionamento de sinal	49
Figura 20 – Filtro passa-baixa RC	49
Figura 21 – ESP32-DevKit.....	51
Figura 22 – Módulo SIM800L GSM/GPRS.....	52
Figura 23 – Gráfico de dispersão (associação positiva e negativa).....	54
Figura 24 – Gráfico de dispersão $a = 0$	55
Figura 25 – Gráfico de dispersão com erros aleatórios	55
Figura 26 – Exemplo de valores do coeficiente de correlação de Pearson	58
Figura 27 – Diagrama de blocos do sistema de aquisição.....	60
Figura 28 – Condicionamento do sinal do Sensor Temperatura.....	61
Figura 29 – Condicionamento do sinal do Sensor de Turbidez	62
Figura 30 – Condicionamento do sinal do Sensor de Sólidos Totais Dissolvidos (TDS).....	63
Figura 31 – Placa com circuito impresso da sonda de TDS	64
Figura 32 – Placa com circuito impresso do sensor de OD	64
Figura 33 – Placa com circuito impresso da mini sonda de pH	65
Figura 34 – Simulação dos sinais dos sensores	65
Figura 35 – Circuito ESP32 com módulo SIM800L GPRS/GSM	66
Figura 36 – Esquema do sistema eletrônico proposto	67
Figura 37 – Fluxograma da rotina de execução ESP32.....	69
Figura 38 – Arquitetura banco de dados Firebird	70
Figura 39 – Estrutura dos arquivos PHP	71
Figura 40 – Tela Principal do Aplicativo idealizado	72
Figura 41 – Tela do gráfico do aplicativo.....	73
Figura 42 – Arquitetura do serviço de notificação	73
Figura 43 – Serviço de notificação no servidor	74
Figura 44 – Tempo para o envio dos dados utilizando conexão GPRS	75
Figura 45 – Simulação das Telas do aplicativo idealizado.....	76
Figura 46 – Calibração da sonda de oxigênio dissolvido (OD)	77
Figura 47 – Comportamento dos íons de hidrogênio dentro e fora da sonda de pH.....	78
Figura 48 – Mini sonda de pH imersa na solução de transporte.....	80
Figura 49 – Soluções padrões de calibração de pH	81
Figura 50 – Comparação pH medido x pH ref.....	81
Figura 51 – Resposta em tensão (V) do sensor de turbidez	82
Figura 52 – Comportamento do sensor de TDS	82
Figura 53 – Comportamento dos sensores dos parâmetros monitorados em água sem alterações	83
Figura 54 – Comportamento do TDS (ohm) sem alterações de parâmetros	84

Figura 55 – Comportamento do TDS (ohm) em dissolução em 3% de NaCl	84
Figura 56 – Comportamento do TDS em dissolução em 6% de NaCl.....	85
Figura 57 – Comparação dos comportamentos do sensor de TDS	85
Figura 58 – Relação entre resistência ôhmica e TDS.....	86
Figura 59 – Comportamento do sensor de turbidez em dissolução de 3% de NaCl	86
Figura 60 – Comportamento do sensor de turbidez em dissolução de 6% de NaCl	87
Figura 61 – Comportamento proporcional entre TDS e Turbidez em dissolução de 6% de NaCl.....	87
Figura 62 – Comportamento do sensor de OD sem alterações de parâmetros	87
Figura 63 – Comportamento do sensor de OD em dissolução de 3% de NaCl.....	88
Figura 64 – Comportamento do sensor de OD em dissolução de 3% de NaCl.....	88
Figura 65 – Comportamento proporcional entre TDS e OD em dissolução de 3% de NaCl	89
Figura 66 – Comportamento dos sensores dos parâmetros em dissolução de 3% de NaCl	89
Figura 67 – Comportamento dos sensores dos parâmetros em dissolução de 6% de NaCl	90
Figura 68 – Comportamento dos sensores dos parâmetros em dissolução de 6% de Argila	91
Figura 69 – Análise de correlação entre os parâmetros sob alteração com argila	92
Figura 70 – Arquitetura de monitoramento closed-loop de um reservatório	93
Figura 71 – Reservatório implementado	93
Figura 72 – Comportamento dos parâmetros da água do reservatório monitorado	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das águas doces	13
Quadro 2 – Classificação e variáveis das águas	14
Quadro 3 – Preços das soluções presentes no mercado	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de turbidez recomendados	20
Tabela 2 – Padrões de parâmetros de potabilidade de água	33
Tabela 3 – Características básicas do DS18B20	42
Tabela 4 – Características básicas do SKU-SEN0189	43
Tabela 5 – Características básicas do SKU-SEN0244	45
Tabela 6 – Características básicas da mini sonda de pH	46
Tabela 7 – Características básicas da sonda de OD	47
Tabela 8 – Limites dos Parâmetros utilizados no sistema de monitoramento da água	48
Tabela 9 – Comparação ESP8266 e ESP32	50
Tabela 10 – Interpretação convencional do coeficiente de correlação r	57
Tabela 11 – Resposta em tensão (mV) do sensor de OD	78
Tabela 12 – Resposta em tensão (V) da mini sonda de pH	79
Tabela 13 – Resposta em tensão (V) na calibração	81
Tabela 14 – Dados dos parâmetros coletados pelo sistema	91
Tabela 15 – Correlação de Pearson entre os parâmetros monitorados	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo Geral	11
1.2	Objetivos Específicos	11
1.3	Organização	11
2	CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS	12
2.1	IQA (Índice de Qualidade das Águas)	15
2.2	IAP (Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público)	16
2.3	Portaria de Consolidação nº 5	17
2.4	Variáveis Físicas da Qualidade das Águas	17
2.4.1	Temperatura	17
2.4.2	Turbidez	19
2.4.3	Resíduo Total	21
2.5	Variáveis Químicas da Qualidade das Águas	23
2.5.1	pH	23
2.5.2	Oxigênio Dissolvido (OD)	24
2.5.3	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	27
2.5.4	Nitrogênio Total	28
2.5.5	Fósforo Total	29
2.5.6	Potencial Oxido-Redução (ORP)	30
2.6	Variável Microbiológica de Qualidade das Águas	31
2.6.1	Coliformes termotolerantes	31
2.7	Reservatórios de Água Potável	32
2.8	Considerações Parciais	33
3	SISTEMAS TÍPICOS DE MONITORAMENTO DE ÁGUA	35
3.1	Métodos de análise de Qualidade da Água em Laboratório	35
3.2	Métodos de Monitoramento de Qualidade da Água em Tempo Real	35
3.3	Considerações Parciais	40
4	SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA PROPOSTO	41
4.1	Variáveis da Qualidade de Água do Sistema Proposto	42
4.1.1	Temperatura	42
4.1.2	Turbidez	43
4.1.3	Sólidos Dissolvidos Totais (TDS)	44
4.1.4	pH	45
4.1.5	Oxigênio Dissolvido (OD)	46
4.2	Circuito de Condicionamento de Sinal	48
4.3	Microcontrolador	50
4.4	Comunicação sem Fio	51

4.5	Servidor	52
4.5.1	Banco de Dados do Servidor	53
4.6	Aplicativo	53
4.6.1	Notificações de Alertas	53
4.6.2	Banco de Dados do Aplicativo	53
4.7	Análise Correlacional das Variáveis Quantitativas	54
4.8	Considerações Parciais	59
5	PROTÓTIPO EXPERIMENTAL	60
5.1	Circuitos Eletrônicos Implementados	60
5.1.1	Adequação do Sensor de Temperatura	60
5.1.2	Adequação do Sensor de Turbidez	61
5.1.3	Adequação do Sensor de Sólidos Totais Dissolvidos (TDS)	62
5.1.4	Adequação do Sensor de Oxigênio Dissolvido (OD)	64
5.1.5	Adequação do Sensor de pH	64
5.1.6	Microcontrolador ESP32	65
5.1.7	Módulo de Comunicação	65
5.2	Sistema de Processamento implementado	67
5.3	Desenvolvimento dos Bancos de Dados	70
5.4	Desenvolvimento do Servidor	71
5.5	Desenvolvimento do Aplicativo	71
5.6	Desenvolvimento do Sistema de Notificações	73
5.7	Considerações Parciais	74
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	75
6.1	Armazenamento e Visualização dos Dados	75
6.2	Comportamento dos Sensores dos Parâmetros Monitorados	76
6.2.1	Calibração do Sensor de Oxigênio Dissolvido (OD)	77
6.2.2	Calibração do Sensor de pH	78
6.2.3	Análise de Correlação de Dados dos Sensores Sob Simulação de Alteração da Água	83
6.2.4	Análise de Correlação de Dados dos Sensores em um Reservatório de Água Potável	92
6.3	Considerações Parciais	95
7	CONCLUSÕES FINAIS	96
7.1	Publicações correlatas	97

1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo será apresentada a motivação do desenvolvimento do presente trabalho, abordando os principais objetivos e sua organização.

A água é um recurso natural vital para a qualidade de vida e para o desenvolvimento humano. A disponibilidade de água é um requisito básico essencial para o bem-estar e saúde humana. Todos os processos metabólicos dependem de sua ação, seja direta ou indiretamente. A água apresenta características particulares como, alto potencial de dissolução de compostos orgânicos e inorgânicos, proporcionando organismos como, por exemplo, os autotróficos a absorção de nutrientes por toda a superfície do corpo (ESTEVES, 1998).

A utilização da água para as necessidades básicas de consumo é comprometida com o excesso de nutrientes e compostos químicos presentes no corpo d'água, e em decorrência de alterações de cor, cheiro, sabor e toxicidade, influenciada por despejos domésticos, industriais e fertilizantes agrícolas (LAMON, 2014). Um corpo d'água que apresenta má qualidade pode ter as mesmas características das águas cristalinas que apresentam boa qualidade, não apresentando odor ou sabor, porém podem conter bactérias e substâncias tóxicas são imperceptíveis a olho nu (ANA, 2005).

O abastecimento público e as atividades econômicas, como agricultura, indústria e a piscicultura são alguns dos diversos fins que a água é destinada. A poluição dos recursos hídricos exerce grande influência no equilíbrio ecológico dos ecossistemas, interferindo de forma direta na qualidade das águas distribuídas para consumo humano, o que demanda a adesão de políticas corretas de gerenciamento (ANA, 2005). A Agência Nacional de Águas (ANA), órgão responsável pelo monitoramento das águas superficiais e subterrâneas do Brasil, lançou em 2013 a Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade da Água (RNQA), avaliando por meio do indicador qualitativo de Índice de Qualidade das Águas (IQA) a qualidade da água para o abastecimento público, visando padronização nacional e estímulo para cooperação entre os operadores das redes de monitoramento (ANA, 2005).

A avaliação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas são fatores primordiais para a adequada gestão dos recursos hídricos, permitindo a caracterização e a análise de tendências e prospecções de cenários em bacias hidrográficas, viabilizando assim implementação de diferentes instrumentos de gestão, tais como: planos de bacia, outorga, cobrança e enquadramento dos cursos de água (ANA, 2005).

O monitoramento de qualidade das águas fornece evidências empíricas para apoiar na tomadas de decisões no abastecimento público e no âmbito industrial e ambiental. Nos dias atuais, o monitoramento e a análise de qualidade das águas são desafios em constante crescimento, devido à presença de uma ampla diversidade de produtos químicos em nossas águas. Além de fornecer evidências objetivas na tomadas de decisões, por meio do monitoramento de qualidade das águas em tempo real, é possível a realização da gestão das águas, alertando-nos sobre possíveis problemas atuais, contínuos e emergentes, determinando a conformidade com os padrões de água potável e protegendo outros usos benéficos da água. Os dados gerados pelo monitoramento auxiliam os gestores da água, disponibilizando informações sobre melhoria ou piora na qualidade das águas, viabilizando implementações de novas políticas para proteção da saúde humana e do meio ambiente (MEYERS, 2017).

Muitas concessionárias de água, públicas ou privadas, e indústrias de diversos setores ainda utilizam métodos manuais para a coleta de amostras e envio a laboratórios. Existem diversas soluções presentes no mercado, desde simples sondas a estações de monitoramento, porém apresentam alta complexidade de

implementação e dependem de diversos instrumentos. As técnicas avançadas de monitoramento, como sensoriamento *in situ* e tecnologia de informação, permitem o monitoramento eficaz da qualidade da água e são frequentemente chamadas de “técnicas inteligentes de monitoramento da qualidade da água” (NIVETEC, 2019).

Em 2009, a *Water Innovations Alliance Foundation*, fundação que realiza uma série de iniciativas para avançar na compreensão de novas oportunidades em tecnologias aplicadas ao âmbito de qualidade das águas, realizou o lançamento da *Smart Water Grid Initiative*, a qual empresas relevantes para a água de todo o mundo participaram. A *Smart Water Grid (SWG)* é uma iniciativa de rede de água inteligente que busca trazer uma abordagem da tecnologia da informação avançada para a gestão da água. Advindo da SWG, o *SWQMS (Smart Water Quality Monitoring System)* ou Sistema de Monitoramento Inteligente da Qualidade da Água, é uma parte do SWG que se refere a implementação de sistemas de monitoramento inteligente sobre a qualidade da água que utilizam da tecnologia da informação para auxiliar na tomadas de decisões. Desde seu lançamento, muitas discussões que abordam sobre a SWG estão sendo realizadas com a finalidade de alcançar um abastecimento de água eficiente e com alta confiabilidade (DONG *et al.*, 2015).

Atualmente, os sistemas de monitoramento inteligente podem ser implantados em diferentes aplicações, destacando-se em monitoramento de qualidade da água corrente e armazenada doméstica (LAMBROU *et al.*, 2014; OFFIONG *et al.* 2014; KUMAR, 2016); monitoramento ambiental de lagos, rios e água do mar (KAGEYAMA *et al.*, 2016); em centros de aquicultura (WIRANTO *et al.*, 2015; ENCINAS *et al.*, 2017; RAJU, 2017); e redes de distribuição de água potável (GEETHA, S. GOUTHAMI, S., 2017; CLOETE, 2016; AHMED *et al.*, 2020).

O surgimento de novas tecnologias destinadas ao monitoramento de qualidade das águas apresenta muitos benefícios para gestores e tomadores de decisões, no auxílio a despeito da avaliação da qualidade dos recursos hídricos, permitindo uma abordagem com maior eficiência e confiabilidade nas informações coletadas. Mas, segundo (DONG *et al.*, 2015), mesmo com o crescimento exponencial de novas tecnologias e grandes avanços relacionados ao âmbito de monitoramento inteligente de qualidade das águas, recursos e soluções presentes no mercado precisam se tornar mais acessíveis (de menor custo) e apresentar maior confiabilidade em relação as informações coletadas. Há um grande potencial e a necessidade de aprimoramento das tecnologias de sensores aplicadas ao monitoramento de qualidade das águas, em relação ao custo operacional e de implementação. Além disso, em (MUINUL *et al.*, 2014), são destacadas as necessidades de novas pesquisas para o desenvolvimento de soluções integradas de baixo custo, relacionadas à melhoria dos sistemas remotos nesse âmbito de qualidade; também, prevê-se que, com a redução de tamanho e custo de soluções aplicadas aos sensores de qualidade da água, eles podem ser amplamente implantados.

Novas tecnologias devem ser desenvolvidos e melhoradas para aplicações de campo, o qual com a utilização da tecnologia da informação e comunicação (TIC) aplicada tecnologia de sensores mostra um grande potencial para o monitoramento, transmissão e para o desenvolvimento de uma gestão eficaz da qualidade da água (PARK, 2020).

Além dos sensores, as tecnologias avançadas de análise de dados, como ferramentas de aprendizado de máquina (*machine learning*) e o aprendizado profundo (*deep learning*), são capazes de fornecer informações valiosas para o gerenciamento eficaz de dados de qualidade da água, empregados a

previsão de mudanças na qualidade da água e utilizado para a análise de dados ambientais massivos, para fornecer informações úteis para gestão de recursos hídricos (VIJAYAKUMAR, 2015; ZHOU, 2018).

Dentro dessas perspectivas, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento alinhado ao conceito de cidades inteligentes converge com as tendências tecnológicas de mercado e de pesquisas aplicadas ao âmbito de qualidade das águas. Este trabalho propõe a criação e implementação de um sistema de monitoramento de qualidade das água em tempo real que possibilitará, por meio da gestão da informação e detecção de alterações nos níveis dos parâmetros monitorados, indicar possível contaminação em um corpo d'água.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho propõem o desenvolvimento de um sistema focado no monitoramento dos parâmetros da qualidade das águas em tempo real, utilizando conceitos das cidades inteligentes que permita auxiliar gestores na eficiência na avaliação e apresentar indicadores que possam ser utilizados na tomada de decisão sobre possíveis contaminações dos níveis da qualidade da água de reservatórios e redes de distribuição.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são a investigação das principais soluções e tipos de sensores relacionados a qualidade da água, bem como os principais parâmetros utilizados para o monitoramento remoto em tempo real; investigação dos principais tipos de circuitos eletrônicos; e investigação do comportamento de correlação e técnica aplicada a análise de correlação entre as variáveis ambientais de qualidade da água.

1.3 Organização

Este trabalho está organizado em capítulos. No capítulo 2 serão apresentadas diretrizes ambientais sobre a classificação de qualidade das águas e o índice de Qualidade das Águas (IQA) com seus respectivos parâmetros e padrões utilizados para determinação de sua qualidade. No capítulo 3 será apresentado o estado da arte sobre o monitoramento de qualidade das águas, apresentando projetos e produtos presentes no mercado, bem como sensores e sondas utilizadas para a determinação e análise dos parâmetros monitorados. No capítulo 4 será apresentado o sistema de monitoramento de qualidade da água proposto; capítulo qual inclui a contribuição dos parâmetros selecionados e seus respectivos sensores, metodologia aplicada ao condicionamento de sinais, especificação dos itens que compõem a arquitetura de *hardware* e *software*, e a metodologia de análise correlacional entre as variáveis quantitativas monitoradas. No capítulo 5 serão apresentados todos os procedimentos e processos utilizados para o desenvolvimento do sistema proposto. Por fim, os capítulos 6 e 7 apresentam respectivamente os resultados experimentais obtidos e as conclusões finais do trabalho.

2 CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS

Nesse capítulo será abordado a caracterização da qualidade das águas, bem como a classificação dos corpos hídricos e a descrição dos parâmetros físico-químicos que constituem o IQA (índice de qualidade das águas).

Para a caracterização da qualidade de um corpo d'água são determinados parâmetros, os quais representam as suas características físicas, químicas e/ou biológicas, dependendo de sua classificação. Esses parâmetros são indicadores de qualidade da água e quando apresentam valores superiores aos estabelecidos para determinado uso, são caracterizados como impuras. As exigências requeridas para a qualidade da água dependem de sua utilização. Por estarem relacionados à saúde humana, os critérios mais relevantes para a qualidade estão relacionados à água potável (POSUDIN, 2014).

Em condições naturais, as principais fontes de águas doces (mananciais) incluem águas subterrâneas, águas superficiais e precipitação (água da chuva). Em fatores hidrográficos, essas águas doces são classificadas em água potável, água superficial e água subterrânea. A água potável é a água destinada ao consumo humano, correspondendo aos requisitos de qualidade. A água superficial é aquela que não penetra o solo, se acumulando em várias bacias e córregos, formando rios e lagos. Já a água subterrânea é água localizada abaixo da superfície da Terra, responsável pela formação dos aquíferos (POSUDIN, 2014).

A água superficial demanda atenção para a padronização de sua qualidade, pois apresenta capacidade de ser contaminada por despejos industriais e municipais e conter excesso de nutrientes, causando à eutrofização da água, provocada por algas. As águas subterrâneas por penetrarem através dos poros do solo da superfície apresentam uma ação de filtragem e a maioria dos patógenos (bactérias e fungos) são eliminadas pelas partículas do solo. Dessa forma, não é necessário aplicar muito esforço para levar a qualidade da água subterrânea aos padrões da água potável (POSUDIN, 2014) (CETESB, 2017).

No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos fundamenta a gestão dos recursos hídricos o uso múltiplo das águas, condicionando os usos da água pela sua qualidade. As águas que apresentam melhor qualidade permitem usos mais exigentes, enquanto águas que apresentam baixa qualidade, são destinadas a usos menos exigentes. A Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos hídricos superficiais e dá diretrizes ambientais para seu enquadramento nas classes de utilizações propostas, bem como condições e padrões para o lançamento de efluentes (BRASIL, 2005). Para cada classificação são estabelecidas condições de qualidade das águas por meio de variáveis descritivas, tais como resíduos sólidos e substâncias que geram odor ou gosto, e quantitativas, como pH, DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e OD (Oxigênio Dissolvido) (CETESB, 2017). As variáveis apresentam limite máximo permissível para cada classe de água. Esse limite é denominado de padrão de qualidade (ANA, 2005).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) apresenta três resoluções, as quais estão relacionadas aos recursos hídricos naturais (BRASIL, 2005):

- RESOLUÇÃO Nº 357: trata da classificação e dos critérios ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, além de estabelecer condições e padrões de lançamento de efluentes;
- RESOLUÇÃO Nº 396: classifica e estabelece diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas;

• RESOLUÇÃO Nº 430: altera parcialmente e complementa a Resolução nº 357, determinando condições e padrões de lançamento de efluentes sem comprometer a saúde e o bem-estar das pessoas e o equilíbrio ecológico aquático.

A classificação das águas pela Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, estabelece a qualidade em função de sua utilização: águas doces (com salinidade igual ou inferior a 0,5‰); águas salobras (salinidade entre 0,5 e 30‰) e de águas salinas (salinidade igual ou superior a 30‰). As águas são classificadas em classe especial, classe 1, classe 2, classe 3 e classe 4. Na classe especial são as águas com condições naturais, não sendo aceito o lançamento de efluentes, mesmo que tratados. Para as demais classes, crescentes níveis de poluição determinam a classificação do corpo de água. A classe 1 apresenta níveis mais baixos de poluição e a classe 4 com os níveis mais altos de poluição. Segundo a Resolução CONAMA nº 357, Art. 4º as águas doces são classificadas conforme pode ser verificado no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação das águas doces.

CLASSE	ÁGUAS DESTINADAS
I - Classe especial	a) ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção; b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; c) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
II - Classe 1	a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.
III – Classe 2	a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e) à aquicultura e à atividade de pesca.
IV – Classe 3	a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; c) à pesca amadora; d) à recreação de contato secundário; e) à dessedentação de animais.
V – Classe 4	a) à navegação; b) à harmonia paisagística.

Fonte: Brasil, 2005.

Nos Estados Unidos, o monitoramento de qualidade das águas é realizado conforme a Lei de Água Limpa (*Clean Water Act*) e a Lei da Água Potável Segura (*Safe Drinking Water Act*), administrada pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA. Criada em 1948, a Lei de Controle da Poluição da Água sofreu alterações, sendo consideravelmente reorganizada e ampliada no ano de 1972, foi renomeada como a Lei de Água Limpa. Tal lei estabelece a estrutura básica para regular as descargas de poluentes nas águas dos Estados Unidos e regular os padrões de qualidade para as águas superficiais, tornando ilegais atos de descargas de poluentes em águas navegáveis. Essas ações estabeleceram dois padrões para águas potáveis: Normas primárias e secundárias de água potável (EPA, 1972) (POSUDIN, 2014).

Os padrões primários da qualidade da água potável incluem parâmetros como compostos inorgânicos e orgânicos, subprodutos de desinfetantes, radionuclídeos, microrganismos e compostos orgânicos voláteis e sintéticos. A USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) apresenta os padrões secundários como os níveis máximos de contaminantes não aplicáveis e que consideram critérios de bem-estar público, bem como, o sabor, cor, corrosividade, odor, e não os efeitos à saúde. No ano de 1998, as Normas da União Europeia incluíram parâmetros químicos e microbiológicos aos padrões e os Padrões da Organização Mundial da Saúde (1993) para água potável enfatizam a desmineralização da água potável, incluindo o processo de composição catiônica e aniônica, microbiológica e outros parâmetros (POSUDIN, 2014).

Os indicadores ou parâmetros de qualidade das águas, também conhecidos como variáveis de qualidade das águas são valores apresentados de forma numérica que fornecem informações sobre condições da qualidade da água (POSUDIN, 2014). O Quadro 2 a seguir mostra as variáveis da qualidade da Água Potável, Água Superficial e Água Subterrânea, segundo Posudin (2014).

Quadro 2 – Classificação e variáveis das águas.

CLASSIFICAÇÃO	VARIÁVEIS DA QUALIDADE
Água Potável	• Variáveis físicas: Sólidos Suspensos Totais (SST), Turbidez e Cor; • Variáveis químicas: Produtos químicos inorgânicos (por exemplo, nitratos, metais pesados); produtos químicos orgânicos (por exemplo, inseticidas, herbicidas); solventes, desinfetantes e subprodutos de desinfecção; compostos orgânicos voláteis e sintéticos; • Radionuclídeos; • Microrganismos: Vírus; bactéria patogênica; protozoários; algas tóxicas.
Água Subterrânea	• Variáveis físicas: Sólidos dissolvidos totais (TDS);

	Turbidez; pH. • Variáveis Químicas: Dureza (Ca^{+2} e/ou Mg^{+2}); ferro (Fe^{+2}, Fe^{+3}); amônia (NH_3); nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-); sílica (SiO_2); sulfeto (S^{-2}) e sulfato (SO_4^{-2}) e pesticidas; • Radionuclídeos: Rádion e rádio; • Microrganismos: Bactérias.
Água Superficial	• Variáveis químicas: pH, Oxigênio Dissolvido (OD) e Potencial redox; • Variáveis físicas: Turvação, Condutividade elétrica, Temperatura e Fluxo de água.

Fonte: Adaptado de Posudin, 2014.

Segundo (ARTIOLA *et Al.*, 2004), a qualidade da água superficial deve ser avaliada diretamente *in situ* e em tempo real, permitindo assim a medição com precisão dos parâmetros de qualidade da água e caracterização de possíveis alterações de suas propriedades físicas e químicas.

A seguir será apresentada a descrição teórica sobre o Índice de Qualidade das Águas (IQA) e as descrições sobre as variáveis utilizadas pela CETESB para sua determinação. Em (POSUDIN, 2014), o Potencial Redox (ORP) é um parâmetro utilizado para determinar a qualidade da água em águas superficiais e devido sua importância e relação a outras variáveis, tal parâmetro também será apresentado.

2.1 IQA (Índice de Qualidade das Águas)

Em 1970, a *National Sanitation Foundation* (NSF) criou, nos Estados Unidos, o Índice de Qualidade das Águas, denominado IQA-NSF, utilizando a técnica Delphi, baseado na opinião de 142 especialistas para a definição dos parâmetros a serem utilizados. Para cada parâmetro que compõe o IQA, respectivos pesos (w , do inglês *weight*) foram atribuídos aos parâmetros, representando sua importância para a conformação global da qualidade das águas. Posteriormente, curvas que representassem a variação da qualidade produzida pelas várias possíveis medidas do parâmetro foram elaboradas (BROWN *et Al.*, 1970).

Ao longo do tempo, o IQA criado pela NSF vem sofrendo alterações. O IQA-NSF foi modificado e foram incluídos parâmetros como sólidos dissolvidos, amônia, cloreto, ferro, manganês, condutividade, dureza, alcalinidade e cor. Posteriormente, foram desenvolvidos índices direcionados para uso predefinido da água (ABBASI, 2011). Com o objetivo de tornar os índices de qualidade de água universais, foram desenvolvidos os índices: Índice Universal de Qualidade da Água (UWQI), baseado na utilização de água para o consumo humano e normas europeias (BOYACIOGLU, 2007); o Índice Global de Qualidade da Água, desenvolvido pela *United Nations Environment Programme Global, Environment Monitoring System* (UNEP-

GEMS), uma associação de três índices: *Drinking Water Quality Index* (DWQI), *Source Water Quality Index* (SWQI) e *Acceptability Water Quality Index* (AWQI), baseado nos critérios legais da Ásia, África, América, Europa e Oceania (OYEM, 2014).

Em 1975, a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), iniciou a utilização do IQA. Alguns anos depois, outros Estados brasileiros adotaram o IQA, que hoje é o principal índice de qualidade da água utilizado no Brasil. Segundo (ZAVALA et Al., 2010), o IQA contempla um número muito limitado de parâmetros biológicos e físico-químicos. O IQA estabelecido pela CETESB é uma modificação do IQA-NSF, havendo alteração do parâmetro nitrato para nitrogênio total. O IQA apresenta limitações sobre avaliações da qualidade da água, as quais parâmetros como o de substâncias tóxicas (metais pesados, compostos orgânicos) não são analisados e são de suma importância para o abastecimento público. Os parâmetros utilizados no cálculo do IQA são em sua maioria indicadores de contaminação causada pelo lançamento de esgotos domésticos (CETESB, 2017).

A criação do IQA realizada pela CETESB baseou-se na opinião de especialistas, quais indicaram as variáveis considerando o peso relativo e a condição com que se apresenta cada um dos parâmetros. O IQA foi desenvolvido para avaliar a qualidade das águas para abastecimento público, determinado por nove parâmetros. De 35 variáveis inicialmente propostas, na criação do IQA, apenas nove foram selecionadas para incorporar o índice. Cada parâmetro constitui uma curva de variação da qualidade das águas de acordo com sua condição. Os nove parâmetros que o compõem e seus respectivos pesos (w) são: oxigênio dissolvido (OD) (17%), coliformes termo tolerantes (15%), pH (12%), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (10%), fosfato total (10%), nitrato (10%), temperatura (10%), turbidez (8%) e sólidos totais (8%). O IQA utilizado pela CETESB, mesmo fornecendo uma avaliação integrada, não substitui uma avaliação detalhada da qualidade das águas de uma determinada bacia hidrográfica (CETESB, 2017).

O cálculo do IQA é realizado por meio do produto ponderado das qualidades de água correspondentes às variáveis que o constitui. O índice (IQA) é estabelecido por um número de 0 a 100, onde 0 corresponde a uma categoria “péssima” e 100 a uma categoria “ótima” na qualidade da água. A qualidade do parâmetro (q_i) é obtida por meio da “curva média de variação de qualidade”, em função de sua concentração ou medida, o peso (w_i) corresponde à importância do parâmetro na obtenção da qualidade da água e n representa o número de variáveis presentes do cálculo (CETESB, 2017). A Equação 1 a seguir mostra a fórmula utilizada para o cálculo do IQA.

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

A análise das características determinantes da qualidade de um corpo d'água é definida a partir de:

- i) análise física, o qual indica propriedades detectáveis pelos sentidos, bem como a turbidez e temperatura;
- ii) análise química, determinante de substâncias minerais e orgânicas que afetam a qualidade das águas; e
- iii) análise microbiológica, envolvendo características de contaminação por presença de bactérias e microrganismos (BRASIL, 2014).

2.2 IAP (Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público)

O IAP (Índice de Qualidade da Água Bruta para fins de Abastecimento Público) é um índice, criado por um Grupo Técnico composto por integrantes da CETESB, SABESP, institutos de pesquisa e

universidades, que complementa o IQA (CETESB, 2017). Esse índice é o produto da ponderação dos resultados do IQA (Índice de Qualidade de Águas) e do ISTO (Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas), que é composto pelo grupo de substâncias tóxicas que afetam a qualidade organoléptica da água. Segundo a CETESB, o índice é composto por três grupos principais de variáveis (CETESB, 2017):

- IQA – Temperatura da Água, pH, Oxigênio Dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Coliformes Termotolerantes, Nitrogênio Total, Fósforo Total, Resíduo Total e Turbidez;
- ISTO – Substâncias tóxicas (Potencial de Formação de Trihalometanos - PFTHM, Número de Células de Cianobactérias, Cádmio, Chumbo, Cromo Total, Mercúrio e Níquel); e a qualidade organoléptica (Ferro Dissolvido, Manganês, Alumínio Dissolvido, Cobre Dissolvido e Zinco).

2.3 Portaria de Consolidação nº 5

No Brasil, a atual legislação vigente dos padrões de potabilidade é a Portaria de Consolidação Nº5, anexo XX de 20 de setembro de 2017, a qual “Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo e seu padrão de potabilidade.” (BRASIL, 2017). Nela estão estabelecidos os valores máximos permitidos dos parâmetros que devem ser monitorados periodicamente e as competências do Ministério da Saúde e entidades ligadas a ela, bem como competências dos estados, municípios e responsáveis por sistemas de abastecimento de água para o consumo humano (BRASIL, 2017).

2.4 Variáveis Físicas da Qualidade das Águas

A seguir serão apresentadas as variáveis físicas de qualidade das águas envolvendo parâmetros, como temperatura, turbidez e resíduo total (sólidos em suspensão, sedimentáveis, não sedimentáveis e dissolvidos). Alguns outros parâmetros, como condutividade, cor e transparência podem ser considerados variáveis de qualidade das águas, mas não são utilizados para determinação do IQA (CETESB, 2017).

2.4.1 Temperatura

A temperatura desempenha um papel importante às influências de parâmetros de caráter físico-químicos para a qualidade das águas. É definida como uma medida de energia térmica média de uma substância. A temperatura indica a energia cinética (energia térmica) das moléculas e átomos de um corpo, sendo seu gradiente o fenômeno responsável pela transferência de energia (calor) entre substâncias ou em um meio. O aumento da temperatura em um corpo aquático geralmente é provocado por despejos industriais e águas de resfriamento de máquinas ou causado por energia solar (BRASIL, 2014).

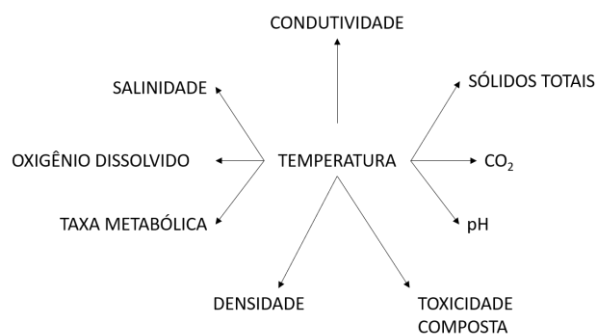
A elevação da temperatura, de 0 a 30 °C, em um corpo d'água é capaz de provocar o aumento da condutividade térmica e da pressão de vapor do corpo, e diminuição da viscosidade, da tensão superficial e do calor específico, influenciando em reações químicas e nas atividades metabólicas dos organismos (CETESB, 2017) (POSUDIN, 2014). As águas brasileiras apresentam uma temperatura na faixa de 20 °C a 30°C. Porém, sofre variações regionais, como por exemplo, no sul do país, onde a temperatura das águas pode atingir valores em 5 °C e 15 °C, no inverno (BRASIL, 2014).

A elevação da temperatura da água influencia diretamente sobre a variedade de vida aquática, no caso de rios, afetando taxas metabólicas e a atividade biológica de organismos aquáticos. Um aumento da temperatura da água em 10 °C, praticamente dobrará a taxa de função fisiológica e metabólica para a maioria dos peixes, como por exemplo, as taxas de respirações (FONDRIEST, 2014). Em lagos e rios de baixo fluxo

de água, as camadas superficiais da água são aquecidas por meio da radiação solar e sua temperatura é elevada de forma mais rápida em comparação as águas mais profundas (POSUDIN, 2014).

Com o aumento das taxas de respiração, o consumo de oxigênio é elevado, podendo ser prejudicial em longo prazo. Tais alterações metabólicas ocorrem, pois a maioria das enzimas celulares são ativadas em temperaturas elevadas e os reagentes na célula têm maior energia térmica. Temperaturas acima de 35 °C poderão degradar as enzimas celulares, causando uma redução da função metabólica. Na vida aquática, a medição da temperatura deve estar presente quando forem medidas taxas metabólicas e produção de fotossíntese, toxicidade composta, concentrações de oxigênio dissolvido e outros gases dissolvidos, condutividade elétrica e salinidade, Potencial de Oxidação ou *Oxidation Reduction Potencial* (ORP), pH e densidade da água (FONDRIEST, 2014). A Figura 1 a seguir ilustra a influência da temperatura em outros parâmetros de qualidade das águas.

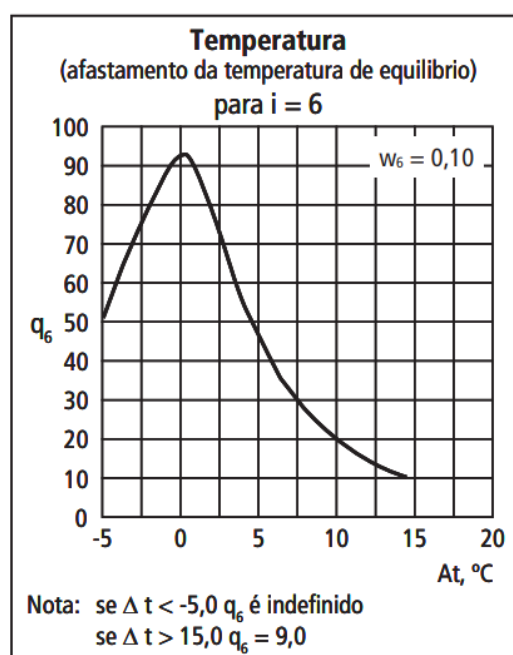
Figura 1 – Influência da temperatura nos parâmetros de qualidade das águas.



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 2 ilustra a curva média de variação correspondente à qualidade do parâmetro em função de sua medida, segundo a CETESB (2017).

Figura 2 – Curva média de qualidade do parâmetro temperatura.



Fonte: CETESB, 2017.

Para a medição de temperatura são utilizados Termômetros de Líquido em Vidro (TLV), termômetros bi metálicos, termopares, termômetros infravermelhos, pirômetros ópticos e termômetros de resistência, conhecidos como termistores. Métodos tradicionais e sistemas de monitoramento remotos utilizam a medição de temperatura por meio de um termistor já embutido em alguns sensores. Porém, podem ser utilizados transdutores independentes para seu monitoramento, os quais são utilizados em sistemas automatizados (POSUDIN, 2014).

2.4.2 Turbidez

A turbidez de um corpo d'água é definida como o grau de interferência da intensidade que a luz sofre ao atravessá-lo, ou seja, a turbidez determina, de forma óptica, a claridade da água. A atenuação da incidência de luz sobre o meio aquoso é causada devido à presença de sólidos suspensos, como partículas inorgânicas e detritos orgânicos. Os sólidos suspensos, em sua maioria, são compostos por materiais inorgânicos, como areia, fragmentos de rocha e argila. A quantidade de sólidos suspensos na água determina sua claridade; quanto maior a quantidade de sólidos presentes no corpo d'água, menos claro o meio aquoso será (CETESB, 2017). A claridade da água não pode ser comparada a cor de um meio aquoso, pois a coloração de um corpo d'água deve-se às substâncias dissolvidas, e a turbidez é provocada por partículas suspensas, podendo ser reduzida pelo processo de sedimentação (processo de separação sólido-líquido por ação do campo gravitacional) (BRASIL, 2014).

Os sólidos suspensos tornam a aparência da água opaca, turva ou lamacenta. No Brasil, por exemplo, corpos d'água de rios são naturalmente turvos devido às características geológicas das bacias de drenagem e alto índice pluviométrico. A turbidez da água também pode ser causada devido a diversos efluentes industriais e esgotos domésticos (BRASIL, 2014). As águas superficiais apresentam a desvantagem de ser contaminada por emissões industriais e municipais e escoamento superficial (erosão do solo). O suprimento excessivo de nutrientes provoca surtos de algas, levando à eutrofização dos corpos d'água. Turbidez e poluição excessivas causam inúmeros sabores, odores e cores da água indesejada (POSUDIN, 2014).

A turbidez pode indicar o potencial de poluição de um corpo d'água apresentando contaminantes, como bactérias, protozoários, nutrientes (por exemplo, nitratos e fósforo), pesticidas, mercúrio, chumbo e outros metais. Sólidos em suspensão orgânicos, como matéria em decomposição ou efluente de esgoto, incluem altos níveis de microrganismos (protozoários, bactérias e vírus), contribuindo para doenças transmitidas pela água. Em processos industriais, a turbidez pode influenciar para o entupimento de tanques e tubulações (FONDRIEST, 2014).

A turbidez é medida em unidades denominadas Unidades Nefelométricas de Turbidez, do inglês *Nephelometric Turbidity Units* (NTU), semelhante a unidade FTU (Unidade de Turbidez Formazina), utilizadas como unidades internacionais no tratamento de água. Nefelometria é a medida estimada do número e tamanho de partículas em suspensão em um corpo d'água. Amostras de turbidez abaixo de 5 NTU a água apresenta-se clara, enquanto uma leitura de 55 NTU irá começar a apresentar ser turva e uma leitura acima de 500 NTU apresentará ser completamente opaca. Tipicamente, a água potável apresenta valores de -0,02 a 0,5 NTU (POSUDIN, 2014). Para esse parâmetro de padrão organoléptico, a Portaria da Consolidação nº 5, anexo XX, de 28/09/2017, estabelece que o valor máximo permitido seja de 5,0 UNT (Unidade Nefelométrica de Turbidez) em qualquer ponto da rede (BRASIL, 2017). A Figura 3 a seguir mostra os níveis de turbidez de 5, 55 e 515 NTU.

Figura 3 – Níveis de turbidez.



Fonte: Fondriest, 2014.

A Tabela 1 abaixo apresenta os níveis recomendados de turbidez para alguns usos da água.

Tabela 1 – Níveis de turbidez recomendados.

Utilização	NTU
Água Potável	< 0,5 a 5,0
Água subterrânea típica	< 1,0
Piscicultura	10 a 40

Fonte: Couto, 2014.

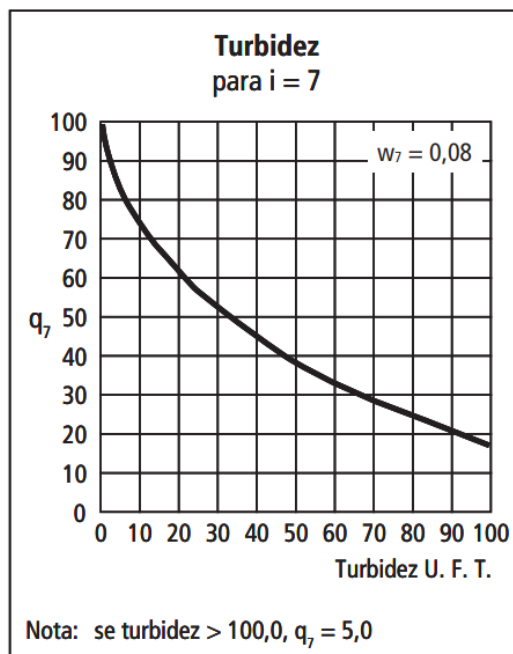
A medição da turbidez é realizada pela medição de dispersão de luz por material particulado suspenso e, como propriedade óptica da água, pode ser medida diretamente com um medidor, com sensor de turbidez ou indiretamente com um disco ou tubo de Secchi. A turbidez pode ser medida também por meio de um nefelômetro, método *GLI-2*, sensor óptico de retrodispersão, sensor de retro espalhamento acústico, difratometria a laser e entre outros. Cada método e sensor apresentam vantagens e desvantagens perante a medição das partículas em suspensão (POSUDIN, 2014).

A medição direta é realizada por meio de um instrumento de turbidez, chamado turbidímetro. O turbidímetro mede a intensidade e dispersão da luz transmitida através de um corpo d'água com partículas em suspensão. Esse equipamento apresenta grande acurácia e habilidade de medição de baixos valores de turbidez (<5 NTU), porém é de alto custo e são facilmente danificáveis (POSUDIN, 2014).

Os medidores de turbidez usam nefelometria (dispersão de 90 graus) ou outras técnicas de detecção óptica de dispersão para medições rápidas e precisas de turbidez em amostras de água. Uma luz infravermelha é emitida, capaz de detectar partículas que estejam em suspensão na água, fazendo a medição da luz transmitida e da taxa de dispersão, a qual varia conforme a quantidade de SST (Sólidos Suspensos Totais), aumentando a turbidez do meio aquático sempre que os níveis aumentam. Atualmente, existem sensores ópticos acessíveis no mercado, os quais permitem a integração individualizada em sistemas *online* e viabilizam sua implementação (POSUDIN, 2014) (FONDRIEST, 2014).

A Figura 4 ilustra a curva média de variação correspondente à qualidade do parâmetro Turbidez em função de sua medida, segundo a CETESB (2017).

Figura 4 – Curva média de qualidade do parâmetro turbidez.



Fonte: CETESB, 2017.

2.4.3 Resíduo Total

O resíduo total corresponde aos sólidos que permanecem (na forma de resíduo) após a evaporação, secagem ou calcinação da amostra de água durante um período e uma temperatura. Os processos de evaporação, secagem ou calcinação são os que definem os sólidos totais, em suspensão (sedimentáveis e não sedimentáveis) e dissolvidos (voláteis e fixos). Os métodos empregados para a determinação de sólidos são gravimétricos, ou seja, utilizando-se balança analítica ou de precisão. Os resíduos totais ou sólidos também podem estar associados a características químicas ou biológicas (CETESB, 2017).

Os sólidos totais dissolvidos (TDS) são um conjunto de substâncias orgânicas e inorgânicas contidas num corpo d'água sob formas moleculares, ionizadas ou micro granulares, formados por partículas de diâmetro de 3 μm a 10 μm e que permanecem em solução, bem como o carbonato, bicarbonato, cloreto, sulfato, fosfato, nitrato, cálcio, magnésio, sódio e íons orgânicos, mesmo após o processo de filtração. Processos naturais, como erosões ou a presença de organismos e detritos orgânicos podem influenciar a entrada de sólidos na água, bem como o despejo de lixo e esgotos (BRASIL, 2014).

Os sólidos em suspensão totais (SST) referem-se às partículas sólidas que se mantêm em suspensão em água, medida é dada pela quantidade total de material sólido por volume de água, sendo utilizada para determinar taxas de sedimentação. No âmbito de qualidade da água, altos níveis de sólidos suspensos, em rios ou lagos, são capazes de aumentar a temperatura da água e diminuir os níveis de oxigênio dissolvido (DO). Na vida subaquática, altos níveis de sólidos suspensos podem inibir a fotossíntese, bloqueando a luz solar e causar a queda dos níveis de oxigênio dissolvido para plantas que dependem do consumo de oxigênio (POSUDIN, 2014). Mesmo os parâmetros turbidez e sólidos totais se assemelharem, eles não são absolutamente equivalentes. Por exemplo, uma pedra colocada em um copo de água limpa, apresentará uma elevada concentração de sólidos totais, porém sua turbidez poderá ser praticamente nula (BRASIL, 2009).

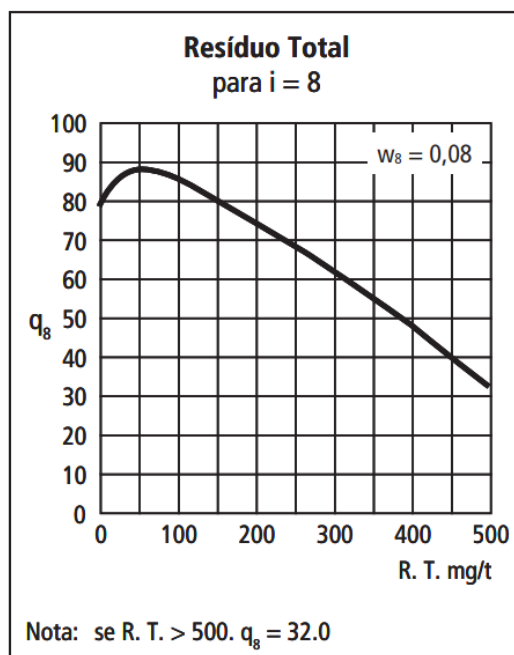
Os SST's são medidos em miligramas de sólidos por litro de água (mg/L). O sedimento em suspensão também é medido em mg/L. Para determinar o SST deve-se filtrar e pesar com precisão uma amostra de água, tornando o método demorado e dificultoso (FONDRIEST, 2014).

De forma empírica, a determinação de sólidos totais dissolvidos (TDS) pode ser realizada por meio da determinação da condutividade da água. A condutividade da água está relacionada com a concentração de sais dissolvidos na água. A condutividade elétrica da água indica a capacidade de um corpo d'água de transmitir a corrente elétrica em função da presença de substâncias dissolvidas, dependendo das concentrações iônicas e da temperatura, indicando a quantidade de sais presentes no corpo. As substâncias dissolvidas são sais e materiais inorgânicos. Os íons condutores, como álcalis, cloretos, sulfetos e compostos carbonatos vêm dos sais dissolvidos (BRASIL, 2014). Quanto mais íons presentes na água, maior será a condutividade e quanto maior a concentração iônica, maior é a ação eletrolítica. Portanto, a capacidade da água será maior em conduzir corrente elétrica. Em contrapartida, quanto menor a concentração de íons, menor será a capacidade da água de conduzir corrente elétrica. A eletricidade é conduzida devido às cargas positivas e negativas presentes nos íons (POSUDIN, 2014).

As unidades utilizadas para expressar a condutividade são de resistência em mho (inverso de ohm) ou Siemens (S) por unidade de comprimento, geralmente utilizada em centímetros (cm) ou em metros (m). Atualmente a unidade S (Siemens) é a mais utilizada. As águas naturais podem apresentar níveis de condutividade na faixa de 10 a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$; água do mar 5×10^5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 10^6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para ambientes concentrados em acidez e alcalinidade. Em ambientes poluídos por esgotos domésticos ou industriais, os níveis podem atingir 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (POSUDIN, 2014) (BRASIL, 2014). A condutividade também pode indicar sobre modificações na composição de um corpo d'água. Altos valores podem indicar características corrosivas da água (CETESB, 2017). De forma indireta, a alta concentração de sais presentes na água pode indicar possíveis níveis de poluição. De forma generalizada, resultados com valores superiores a 100 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ podem ser considerados como sendo ambientes comprometidos (CETESB, 2019).

Segundo Posudin (2014), existem dois métodos para medição de condutividade: Condutora (*Conductive conductivity*) e Indutiva (*Inductive conductivity*). O método Condutor é baseado na imersão de eletrodos de metal ou grafite na água, com distância entre os eletrodos é de 1,0 cm. Os eletrodos em imersão geram uma corrente elétrica que flui através da água devido a uma tensão elétrica aplicada. A corrente elétrica é proporcional à concentração de íons dissolvidos na água. A Figura 5 ilustra a curva média de variação correspondente à qualidade do parâmetro Resíduo Total em função de sua concentração, segundo a CETESB (2017).

Figura 5 – Curva média de qualidade do parâmetro resíduo total.



Fonte: CETESB, 2017.

Normalmente, analisadores de condutividade utilizam sensores de dois ou quatro eletrodos. A Condutividade Indutiva é medida por meio de uma bobina toroidal. O analisador de condutividade indutiva contém duas bobinas: uma qual recebe uma corrente induzindo-a através da água de interesse; e outra que recebe a corrente induzida. Essa metodologia não aplica o contato direto com a água (POSUDIN, 2014).

2.5 Variáveis Químicas da Qualidade das Águas

A seguir serão apresentados os parâmetros correspondentes as variáveis químicas utilizadas pela CETESB para determinação da qualidade das águas. A CETESB não utiliza o parâmetro ORP (*Oxidation Reduction Potential*) ou Potencial de Redução como variável no cálculo do IQA para o abastecimento público, porém em (POSUDIN, 2014) tal parâmetro é utilizado como determinação da qualidade de água potável. Dessa forma, a descrição do ORP torna-se interessante e de suma importância nessa seção.

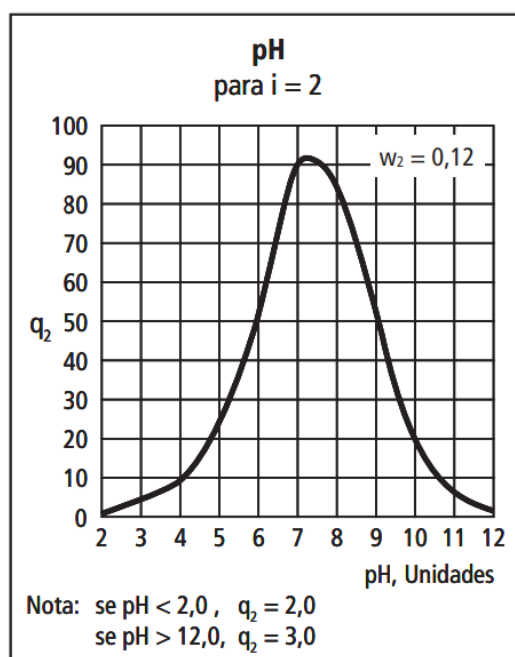
2.5.1 pH

O Potencial Hidrogeniônico ou pH, é o parâmetro que representa a concentração de íons hidrogênio ou íons hidróxido em uma solução, indicando a intensidade das condições ácidas ou alcalinas. O pH é uma medida quantitativa de acidez e alcalinidade da água. O valor do pH tem influência na distribuição das formas livre e ionizada de diversos compostos químicos, contribuindo para o grau de solubilidade e definição do potencial de toxicidade de diversas substâncias e elementos. O valor de pH varia de 0 a 14, o qual um valor abaixo de 7 caracteriza a água como ácida e acima de 7, como alcalina. A água com pH com valor 7 é caracterizada com neutra (BRASIL, 2009) (POSUDIN, 2014).

Na legislação do Estado de São Paulo, estabelece-se faixa de pH entre 5 e 9 para o lançamento direto nos corpos receptores (artigo 18 do Decreto 8.468/76) e entre 6 e 10 para o lançamento na rede pública seguida de estação de tratamento de esgotos (artigo 19-A). Por exercer influência em diversos compostos químicos, o pH é considerado um parâmetro importante em estudos e processos de tratamento no âmbito do

saneamento ambiental. Nas estações de tratamento o pH é medido e ajustado para melhorar o processo de coagulação e a floculação e controle de desinfecção da água (CETESB, 2016). O valor numérico do pH é determinado pela concentração molar de íons hidrogênio (H^+) e é determinada por meio da escala anti logarítmica (logaritmo negativo da concentração de H^+). Como o pH é afetado pelos produtos químicos na água, tal é um parâmetro importante para a qualidade das águas, determinando níveis de nutrientes e metais pesados. A chuva ácida, por exemplo, apresenta um nível de pH de 0 a 5; a chuva pura tem um pH de 5,6 (POSUDIN, 2014). A Figura 6 ilustra a curva média de variação correspondente a qualidade do parâmetro pH em função de sua medida, segundo a CETESB (2017).

Figura 6 – Curva média de qualidade do parâmetro pH.



Fonte: CETESB, 2017.

A Portaria da Consolidação nº 5, anexo XX, de 28/09/2017, recomenda que a faixa de pH deva se manter entre 6,0 e 9,5 em seu sistema de abastecimento (BRASIL, 2017).

A medição do pH pode ser realizada por meio equipamentos utilizados tanto em trabalhos de campo ou em laboratórios químicos. Esses equipamentos são chamados de pH-metros. Os sensores utilizados são chamados de sondas de pH. Tanto o pH-metro, como as sondas de pH são constituintes em um eletrodo qual é submerso no meio aquoso para determinar a acidez da água amostrada. A medição é realizada em função da leitura da tensão (milivolts) que o eletrodo é capaz de gerar quando submerso na amostra. Dessa forma, o pH é determinado pela transferência de íons hidrogênio entre espécies químicas e a intensidade da tensão medida é convertida para uma escala de pH. Existem diversas sondas disponíveis no mercado, as quais facilitam a implementação do monitoramento por meio da telemetria. Porém, na maioria dos casos, a sonda deve ser calibrada durante o uso com soluções padrão de pH (POSUDIN, 2014).

2.5.2 Oxigênio Dissolvido (OD)

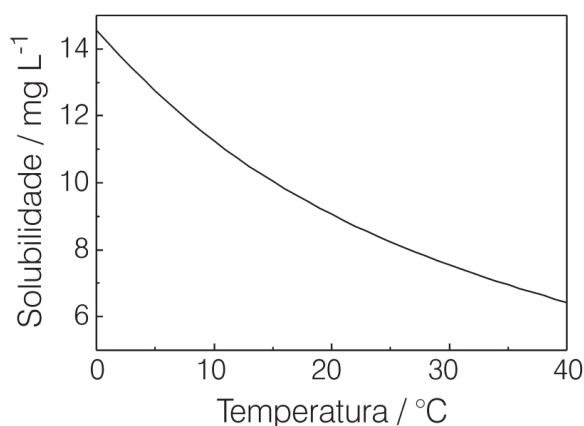
Oxigênio dissolvido é definido como o nível de concentração de oxigênio livre, ou não composto, dissolvido em um corpo d'água. O oxigênio livre é o oxigênio que não está ligado a nenhum outro elemento.

As moléculas de oxigênio livres se dissolvem na água da mesma forma que o sal ou o açúcar. O OD penetra a água por meio de processos de difusão, aeração e como produto da atividade de fotossíntese (POSUDIN, 2014) (FONDRIEST, 2013).

O parâmetro exerce influência nos organismos que habitam um corpo d'água, sendo de suma importância na avaliação da qualidade da água. Em limnologia, o oxigênio dissolvido é o parâmetro essencial para a análise e determinação da qualidade das águas. Um nível muito baixo ou muito alto desse parâmetro pode prejudicar a vida aquática e influenciar em sua qualidade (WETZEL, 2011).

Segundo (ESTEVES, 1998), as principais fontes de oxigênio para a água são a atmosfera e por meio de atividades de fotossínteses de plantas e algas. O oxigênio proveniente da atmosfera dissolve-se nas águas naturais devido à diferença de pressão parcial. O oxigênio, por ser um gás pouco solúvel, a quantidade presente na água depende da pressão atmosférica, da temperatura e de sais presentes no corpo (concentração de saturação de 8 mg/L a 25 °C entre 0 a 1.000 m de altitude) (VALENTE, 1997). Águas mais fria apresentam maior nível de concentração de oxigênio e águas salinas apresentam menor nível de concentração de oxigênio. A uma pressão de 760 mmHg, 100% de umidade relativa e a uma temperatura de 0°C, a concentração do oxigênio é de 14,60 mg/L. Em contrapartida, nas mesmas condições de umidade e pressão, mas com a temperatura em 30°C, a concentração do oxigênio é de 7,59 mg/L (ESTEVES, 1998). A Figura 7 a seguir ilustra a solubilidade do gás oxigênio em água a várias temperaturas, na pressão atmosféricas de 1 atm (670 mmHg).

Figura 7 – Solubilidade do gás oxigênio.

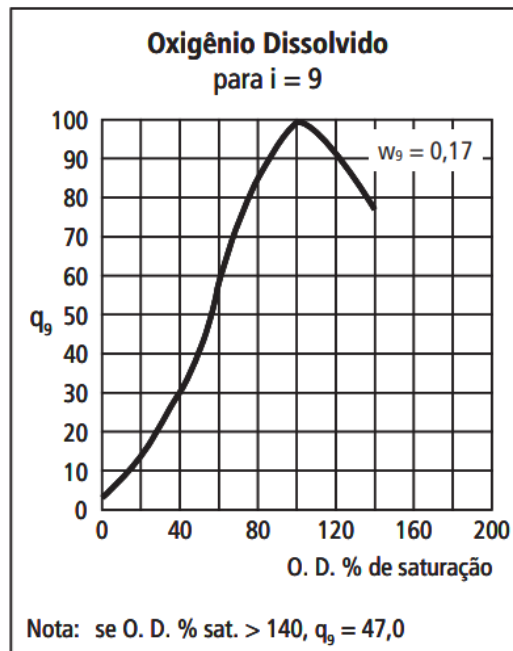


Fonte: Fiorucci e Filho, 2005.

No âmbito de qualidade das águas, águas poluídas são caracterizadas por baixa concentração de oxigênio dissolvido, devido ao seu consumo na decomposição de compostos orgânicos. Por outro lado, as águas limpas apresentam níveis elevados de concentrações de oxigênio dissolvido. A EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) diz que a concentração de OD deve ser determinada *in situ*, ou seja, deve ser determinada no local de análise. Porém, amostras coletadas podem ser analisadas no máximo em até 8 horas depois de realizada sua coleta. A quantidade de oxigênio dissolvido (OD) concentrado na água normalmente é expressa em mg/L ou pela porcentagem de saturação (% sat.), diante de uma determinada pressão, salinidade e temperatura. Por meio da medição da concentração de oxigênio dissolvido podem ser avaliados os efeitos de resíduos oxidáveis sobre águas receptoras e a eficiência do tratamento dos esgotos

(CETESB, 2016). A Figura 8 ilustra a curva média de variação correspondente à qualidade do parâmetro oxigênio dissolvido em função de sua medida, segundo a CETESB (2017).

Figura 8 – Curva média de qualidade do parâmetro oxigênio dissolvido.



Fonte: CETESB, 2017.

Dado que o oxigênio se dissolve nas águas devido ao diferencial de pressão parcial, segundo a (CETESB, 2016), a concentração de saturação de oxigênio de um corpo d'água é definida em função da temperatura, regido pela Lei de Henry. A Equação 2 a seguir mostra o cálculo da concentração de saturação do gás, em que α é a constante que varia inversamente proporcional a temperatura e $p_{gás}$ é a pressão que o gás exerce sobre a superfície do corpo líquido. Por exemplo, para 20 °C de temperatura, α é igual a 43,9 e a concentração de saturação de oxigênio em uma água superficial é igual a $43,9 \times 0,21 = 9,2$ mg/L. O valor 0,21 é a pressão em atm exercida pelo oxigênio na atmosfera (CETESB, 2016).

$$C_{SAT} = \alpha \cdot p_{gás} \quad (2)$$

A medição das concentrações de oxigênio dissolvido envolve técnicas com utilização de sensores eletroquímicos ou ópticos. Segundo (POSUDIN, 2014), a medição de OD é realizada comumente utilizando técnicas eletro métricas como o eletrodo de Clark. Quando imerso em um corpo d'água em que deve ser analisada sua qualidade, o oxigênio molecular difunde-se através de uma membrana de teflon e filme eletrolítico (POSUDIN, 2014).

O sensor de oxigênio dissolvido pode ser conectado a um medidor para amostragem pontual e laboratorial ou a um registrador de dados (*data logger*). O oxigênio dissolvido também pode ser medido por Colorimetria, sensor e medidor ou por titulação. A Colorimetria oferece uma aproximação básica das concentrações de oxigênio dissolvido em uma amostra. Esse método pode apresentar limitações e ser sujeito a erros devido a presente de agentes redoxantes. O método tradicional é a titulação de Winkler. As medições de oxigênio dissolvido, tipicamente, são realizadas por meio de um medidor e um sensor de oxigênio

dissolvido (ópticos e/ou eletroquímicas) utilizados em laboratório ou em campo, apresentando saída analógica padrão ou até mesmo saída digital. Os sensores ópticos de OD são ideais para monitoramento de longo prazo devido a seus requisitos mínimos de manutenção e são capazes de manter uma calibração por vários meses (FONDRIEST, 2014).

Em relação a esse parâmetro, a Portaria nº5 não estabelece uma quantidade de oxigênio dissolvido em água para consumo. O mercado apresenta diversas soluções para o monitoramento e análise do oxigênio dissolvido em tempo real, seja por meio de sensores, sondas simples ou por sondas multiparamétrica. Porém, tais soluções apresentam alto custo e podem inviabilizar específicas implementações.

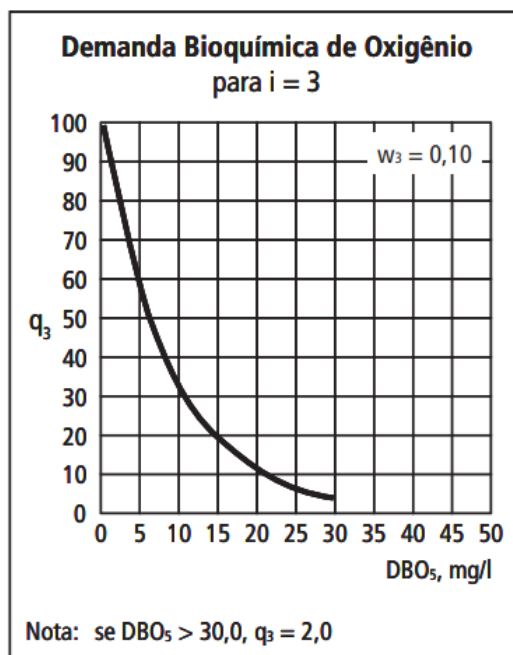
2.5.3 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Em geral, a poluição orgânica em um sistema aquático é medida e expressa em termos da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e do nível de oxigênio dissolvido (OD) diminuído. O DBO mede uma quantidade aproximada de matéria orgânica biodegradável presente no corpo d'água e é utilizado como um parâmetro indicador para a extensão da poluição da água. O DBO é utilizado para mensurar o consumo de oxigênio em um corpo d'água, ou seja, é a medição da quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica. O DBO de qualquer sistema aquático é o principal parâmetro necessário para avaliar a qualidade da água, bem como o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento para a proteção dos recursos hídricos (CETESB, 2017).

Como a DBO esta inversamente relacionada ao oxigênio dissolvido na água, os altos valores da DBO indicam um baixo nível de oxigênio dissolvido (OD). O nível de OD é uma medida da saúde do sistema aquático e um determinado nível é essencialmente necessário para a vida aquática sobreviver. Além disso, para a determinação da DBO, é essencial o pré-conhecimento da concentração de OD na água. Portanto, esses dois parâmetros (OD e DBO) são necessários serem determinados simultaneamente e é necessário criar algum método secundário (indireto) adequado para prever essas variáveis em um grande número de amostras para avaliação da qualidade da água (BRASIL, 2014). Os medidores e sensores utilizados para a determinação de oxigênio dissolvido podem ser utilizados para testes realizados de DBO (FONDRIEST, 2014).

Segundo a (CETESB, 2017), a DBO é considerada como a quantidade de oxigênio consumido durante um determinado período de tempo e a uma específica temperatura de incubação. A uma temperatura de incubação de 20 °C e um período definido de 5 dias, a DBO é referida como DBO_{5,20}. A Figura 9 ilustra a curva média de variação correspondente à qualidade do parâmetro DBO em função de sua medida, segundo a CETESB (2017). Os medidores e equipamentos aplicados a determinação de DBO utilizam o método respirométrico, fornecendo medições diretas do oxigênio consumido por microrganismos sob específicas condições. Além disso, a análise de DBO depende de matérias e reagentes específicos. Dessa forma, pode-se concluir que parâmetro DBO não é determinado de forma trivial, incapacitando-o para aplicações em telemetria (CETESB, 2017) (BRASIL, 2014).

Figura 9 – Curva média de qualidade do parâmetro DBO.



Fonte: CETESB, 2017.

2.5.4 Nitrogênio Total

O composto de nitrogênio é caracterizado como macro nutriente e é um dos principais nutrientes utilizados para processos biológicos, exigido em grande quantidade pelas células vivas, bem como as algas. O elemento nitrogênio pode ser encontrado em um corpo d'água em diferentes formas: i) nitrogênio molecular (N_2); ii) nitrogênio orgânico; iii) íon amônico (NH_4^+); iv) íon nitrito (NO_2^-); e v) íon nitrato (NO_3^-) (BRASIL, 2014).

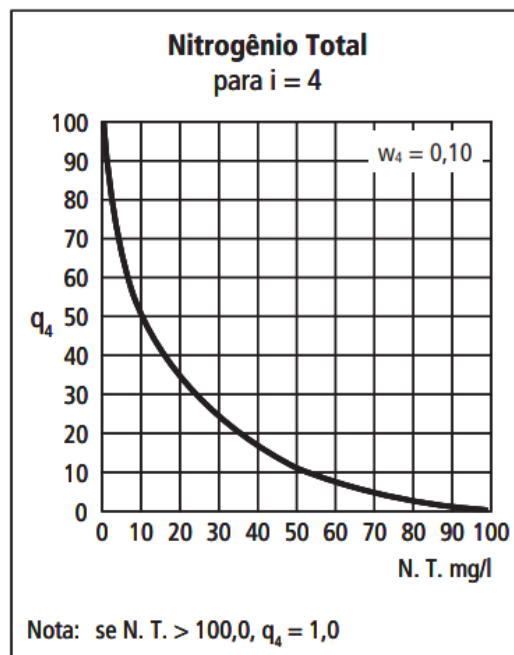
Em águas naturais, quando descarregado junto com o fósforo, o nitrogênio é capaz de provocar o enriquecimento do corpo d'água, diminuição do oxigênio e o tornar eutrofizado. Dessa forma, o crescimento de seres vivos, como as algas, é intensificado, podendo trazer prejuízos aos múltiplos usos dessas águas, prejudicando o abastecimento público ou causando poluição decorrente da morte e decomposição desses organismos. A proliferação de algas é causada pela grande quantidade de nutrientes disponível no meio, aumentando a produtividade biológica em um corpo d'água (BRAGA, B. et Al., 2005) (CETESB, 2016).

Segundo o (CETESB, 2016, pág. 31), ao qual estão descritos o significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas:

Pela legislação federal em vigor, o nitrogênio amoniacal é padrão de classificação das águas naturais e padrão de emissão de esgotos. A amônia é um tóxico bastante restritivo à vida dos peixes, sendo que muitas espécies não suportam concentrações acima de 5 mg/L. Além disso, a amônia provoca consumo de oxigênio dissolvido das águas naturais ao ser oxidada biologicamente, a chamada DBO de segundo estágio. Por estes motivos, a concentração de nitrogênio amoniacal é um importante parâmetro de classificação das águas naturais e é normalmente utilizado na constituição de índices de qualidade das águas. Os nitratos são tóxicos, causando uma doença chamada *metahemoglobinemia* infantil, que é letal para crianças (o nitrato reduz-se a nitrito na corrente sanguínea, competindo com o oxigênio livre, tornando o sangue azul). Por isso, o nitrato é padrão de potabilidade, sendo 10 mg/L o valor máximo permitido pela Portaria 518/04 do Ministério da Saúde.

A Figura 10 ilustra a curva média de variação correspondente à qualidade do parâmetro Nitrogênio total em função de sua medida, segundo a (CETESB, 2017).

Figura 10 – Curva média de qualidade do parâmetro nitrogênio total.



Fonte: CETESB, 2017.

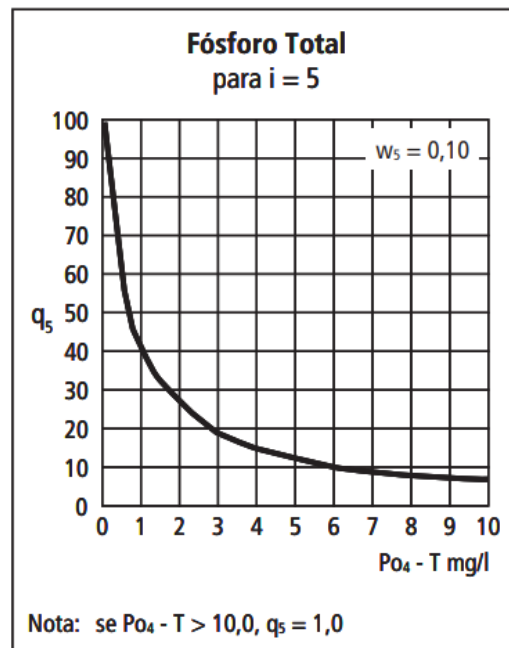
A concentração de nitrogênio em águas pode ser determinada por operação analítica utilizando equipamentos em laboratório, como o método de Kjeldahl e apresentam alto grau de complexidade. Dessa forma, inviabilizando a aplicação para o monitoramento remoto do parâmetro (CETESB, 2017) (LAMON, 2014).

2.5.5 Fósforo Total

O fósforo, assim como o nitrogênio, é um macro nutriente essencial para células vivas. Esse composto em abundância em um meio aquático pode causar a proliferação de algas. O fósforo total é um indicador do excesso de fósforo nas águas. A quantidade de fósforo está associada à poluição de sedimentos. A presença de fósforo em águas naturais está associada às descargas de esgotos sanitários, efluentes industriais (indústrias de fertilizantes, pesticidas, químicas em geral, conservas alimentícias e entre outros); processos naturais (dissolução de rochas, carreamento do solo, decomposição de matéria orgânica, chuva) ou antropogênicos (lançamento de esgotos, detergentes, fertilizantes, pesticidas). Em um corpo d'água, o fósforo pode ser encontrado de diferentes formas: i) orgânico e ii) inorgânico. Os fosfatos orgânicos são a forma em que o fósforo compõe moléculas orgânicas, como a de um detergente. A formação de sais inorgânicos se dá pela combinação dos radicais (ortofosfatos) com cátions (BRASIL, 2014) (CETESB, 2016).

Em programas de caracterização de efluentes industriais que utilizam tratamento por processo biológico, esse parâmetro é imprescindível para determinação da qualidade das águas. No Brasil, os esgotos sanitários apresentam concentração de fósforo total na faixa de 6 a 10 mg/L. Em águas naturais não poluídas, as concentrações de fósforo situam-se na faixa de 0,01 mg/L a 0,05 mg/L (BRASIL, 2014) (CETESB, 2016). A Figura 11 ilustra a curva média de variação correspondente à qualidade do parâmetro Nitrogênio total em função de sua medida, segundo a (CETESB, 2017).

Figura 11 – Curva média de qualidade do parâmetro fósforo total.



Fonte: CETESB, 2017.

Assim como o nitrogênio, a concentração de fósforo em águas é determinada utilizando equipamentos em laboratório, como o espectrofotômetro, e apresentam complexidade em aplicações de telemetria (LAMON, 2014).

2.5.6 Potencial Oxido-Redução (ORP)

O Potencial de Oxido-Redução (POR) ou *Oxidation-Reduction Potential* (ORP) é caracterizado como a tendência de espécies químicas presentes em um corpo d'água em ganhar ou perder elétrons, causando sua redução ou oxidação. A oxidação é quando a espécie química perde elétrons, ficando com mais carga positiva. Por outro lado, a redução é quando uma espécie química ganha elétrons. O ORP é medido pela diferença de potencial em milivolts (mV). No tratamento de água de piscina e em água potável o ORP é desejado como oxidante. Por exemplo, o cloro quando adicionado à água apresenta alto teor de ORP (oxidante) e, portanto, poder desinfetante, oxidando bactérias e as destruindo (POSUDIN, 2014) (LAMON, 2014).

O Potencial Redox de um corpo d'água é determinado pela medição da diferença de potencial entre dois eletrodos, medidor chamado de "sonda". A "sonda" é composta por um eletrodo feito de um metal nobre (Au, Pt, Hg) ou materiais inertes (grafite) e o outro eletrodo utilizado como referência, contendo AgCl (Cloreto de Prata) ou calomel saturado (mineral de Cloreto de Mercúrio) (POSUDIN, 2014). Sensores individuais podem ser encontrados no mercado e são aplicáveis a sistemas para monitoramento remoto, porém devido ao alto custo de aquisição, podem inviabilizar sua implementação ao sistema.

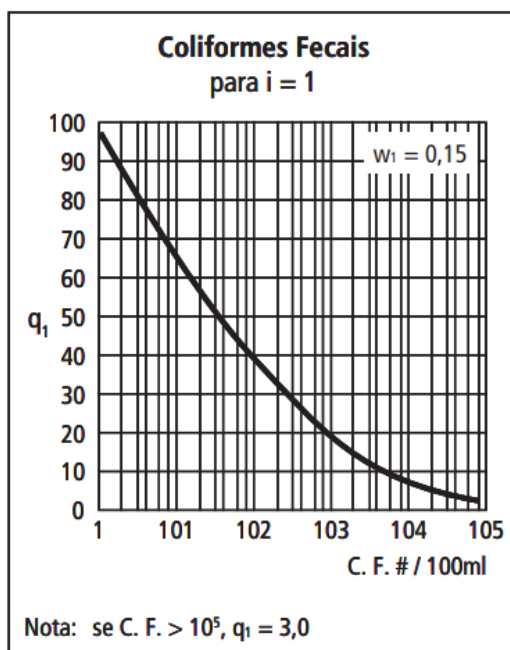
2.6 Variável Microbiológica de Qualidade das Águas

Analisar de forma microbiológica a água nos fornece características de sua qualidade atribuída à ausência de risco de ingestão de micro-organismos causadores de doenças, provenientes da contaminação pelas fezes humanas e outros animais. Quantificar e determinar todos os micro-organismos patogênicos potencialmente presentes na água é trabalhoso, demanda tempo, os custos são elevados. Os micro-organismos presentes nas águas naturais são, em sua maioria, inofensivos à saúde humana. Porém, à contaminação por esgoto sanitário estão presentes micro-organismos que poderão ser prejudiciais à saúde humana, incluindo vírus, bactérias, protozoários e helmintos. Como indicadores de contaminação fecal, são eleitas como bactérias de referência as do grupo coliforme: i) Coliformes totais (bactérias do grupo coliforme); ii) Coliformes termotolerantes e iii) *Escherichia coli* (*E. coli*) (BRASIL, 2014).

2.6.1 Coliformes termotolerantes

O grupo dos coliformes fecais compreende o gênero *Escherichia coli* (*E. coli*) e também representadas por espécies de *Klebsiella*, *Citrobacter* e *Enterobacter*. Apenas o microrganismo *E. coli* é de origem exclusivamente fecal, presentes nos esgotos sanitários, cerca de 106-108 Coliformes fecais/100 ml. Esses organismos são utilizados como indicadores de poluição de águas naturais. É pouco provável que os Coliformes fecais se desenvolvam em sistemas de distribuição, a menos que exista abundância de nutrientes (BRASIL, 2014) (CETESB, 2016). A Figura 12 ilustra a curva média de variação correspondente à qualidade do parâmetro Coliforme fecal em função de sua medida, segundo a (CETESB, 2017).

Figura 12 – Curva média de qualidade do parâmetro coliformes termotolerantes.



Fonte: CETESB, 2017.

Segundo o Manual Prático de Análise de Água (BRASIL, 2013), a análise realizada para quantificar todos os micro-organismos patogênicos é de alta complexidade, demandando tempo. Os custos são elevados e nem sempre se obtêm resultados positivos ou que confirmem a presença dos micro-organismos. A análise envolve material bacteriológico, como autoclave, estufa bacteriológica, tubos de ensaios, além de

preparações, processos específicos e coletas adequadas. Dessa forma, devem ser realizados em laboratórios (BRASIL, 2013).

2.7 Reservatórios de Água Potável

Os reservatórios de água são tanques ou caixas d'água, de grande ou pequeno porte, utilizados para o suprimento de água potável. Dos objetivos da utilização de reservatórios, destacam-se: i) a garantia do fornecimento de água (sistemas "indiretos" de distribuição de água); ii) a compensação de distribuição de água em horários de picos de consumo ao longo dos dias; iii) o suprimento de deficiências de pressão e vazão nos sistemas de abastecimento de companhias de água; e iv) a garantia estratégica de água para casos de incêndio. Um sistema "indireto" é a distribuição indireta de água, onde a água fornecida pela concessionária é armazenada em um reservatório, e assim consumida a partir mesmo. Os sistemas prediais e residenciais que utilizam caixa d'água, devem fornecer, quando necessária ao uso, água de boa qualidade (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011).

Segundo a Norma NBR 5626/98 (ABNT, 1998), as instalações prediais de água fria devem seguir padrões de dimensionamento de reservatórios e esperar requisitos de qualidade da água potável armazenada, evitando a transmissão de gosto, cor, odor ou toxicidade à água, nem promover ou estimular o crescimento de microrganismos. A Norma destaca também que um sistema de armazenamento de água potável utilizando caixa d'água deve conter uma reserva mínima de 24 horas de consumo e uma taxa de renovação de toda a água a cada 72 horas. Dessa forma, com a garantia de renovação da água nesse período de 72 horas, o sistema é capaz de evitar a estagnação da água e em temperaturas elevadas (entre 25 °C à 45 °C), pode acarretar na proliferação de bactérias e microrganismos patogênicos (ABNT, 1998).

A Vigilância Sanitária do Estado de São Paulo orienta a realização de inspeções, limpezas e desinfecções de reservatórios e caixas d'água periodicamente a cada 6 (seis) meses, sem prejudicar os padrões de potabilidade da água. A falta de manutenção e limpezas periódicas, é capaz de causar a degradação da água, bem como alterações nos parâmetros utilizados para a determinação de sua qualidade, levando o agravamento dos riscos à saúde dos usuários. Segundo a Resolução SS 65, da Secretaria de Estado da Saúde, em seu Artigo 5º são deveres dos usuários: "construir e/ou manter, as instalações hidráulicas e sanitárias de seu imóvel em condições que garantam a manutenção da qualidade da água fornecida, bem como evitar o comprometimento da qualidade da água na rede de distribuição do sistema" (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011).

A rede de distribuição de água pode por si própria trazer impurezas que podem sedimentar nas caixas d'água, causando alterações em parâmetros como, turbidez, pH, OD e entre outros, justificando a importância da limpeza dos reservatórios. Com tais impurezas e alterações nos parâmetros de qualidade da água reservada, o reservatório torna-se um foco de contaminação da água. A contaminação da água do reservatório provem de intermitência no abastecimento, baixa frequência de renovação de água e elevação e permanência da temperatura da água acima de 25 °C. A elevação da temperatura provoca a perda do cloro dissolvido na água, permitindo então a presença de microrganismos. A negligência à limpeza e manutenção periódica de reservatórios afeta diretamente o controle da qualidade da água e a segurança dos usuários. Dessa forma, a realização de inspeções, verificações, limpezas e desinfecções de caixas d'água é de suma importância. Mantendo a frequência de manutenção a cada 6 (seis) meses, o controle a qualidade da água

interior de reservatórios é mantido, bem como sua potabilidade e trazendo segurança aos usuários (BRASIL, 2006) (JULIÃO, 2011).

Por fim, deve-se observar todos os procedimentos apresentados para o monitoramento e análise de qualidade da água e sua potabilidade. Quanto aos procedimentos apresentados (da Vigilância Sanitária da Secretaria de Estado da Saúde e da Sabesp), deve-se observar que eles convergem com os procedimentos registrados por outras fontes, tais como a Norma NBR 5626:1998 (ABNT, 1998) e a Norma Técnica D3.855 (CETESB, 1979) (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011).

A Portaria do Ministério da Saúde MS nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011, que determina e estabelece padrões para o controle e vigilância da qualidade da água potável para o consumo humano foi revogada em 2017, onde houve uma consolidação conforme Lei Complementar nº95/1998 Art. 13, § 1º. Portanto, PRC (Portaria de Consolidação) nº 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX é utilizada (BRASIL, 2011). Dentre os parâmetros monitorados, a Tabela 2 mostra alguns parâmetros utilizados para a análise e qualidade da água de reservatórios, quais devem estar nos padrões conforme limpeza periódica de 6 (seis) meses.

Tabela 2 – Padrões de parâmetros de potabilidade de água.

Aspecto	Parâmetros
Físicos	• Gosto; • Odor; • Temperatura; • Turbidez.
Químicos	• Cloretos; • Cloro residual livre; • Ferro; • pH.
Microbiológicos	• Bactérias heterotróficas; • Coliformes termotolerantes; • Coliformes totais; • <i>Escherichia Coli</i>.

Fonte: Brasil, 2011.

2.8 Considerações Parciais

Por meio desse capítulo foi possível a contextualização e a caracterização da qualidade das águas, e dos parâmetros físico-químicos e biológicos que a compõem; parâmetros quais, dependendo dos valores apresentados, determinam a classificação e a finalidade de utilização das águas. Os parâmetros constituem índices utilizados pelo país para determinação e classificação das águas, bem como a caracterização de contaminação; índices utilizados por órgãos como a CETESB, SABESP e ANA. Além disso, podemos entender: sobre as exigências e critérios para a utilização das águas, as quais as mais relevantes são para a

água potável (por estarem diretamente relacionadas à saúde humana); sobre as metas e diretrizes políticas do país fundamentadas pela gestão dos recursos hídricos e o múltiplo uso das águas, apresentada por órgãos públicos e privados; e sobre os padrões de potabilidade e procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo e seu armazenamento. Com a contextualização da qualidade das águas e os parâmetros que a caracterizam, o próximo capítulo apresenta os métodos manuais e remotos para o seu monitoramento.

3 SISTEMAS TÍPICOS DE MONITORAMENTO DE ÁGUA

A seguir serão apresentados projetos e produtos de monitoramento da qualidade da água em tempo real. De forma resumida, serão apresentados procedimentos de análise laboratorial utilizados como base de comparação para o desenvolvimento do sistema proposto, aplicados ao âmbito de monitoramento de qualidade de água em tempo real.

3.1 Métodos de análise de Qualidade da Água em Laboratório

Existem vários métodos clássicos utilizados para a determinação e análise da qualidade das águas, tais como os métodos de análise de absorção atômica, eletroquímicas e análise gravimétrica. Existem também métodos recentes, tais como a cromatografia gasosa e a espectrometria de massa, que podem ser utilizados para a análise da poluição da água por compostos químicos e perigosos que apareceram nos últimos anos. Porém, tais métodos requerem mais tempo para a preparação de amostras e normalmente não podem ser automatizados, como o método *Purge-and-Trap* (cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa) (POSUDIN, 2014).

Os métodos de amostragem de um corpo d'água são de suma importância no desenvolvimento de um Programa de Controle da Qualidade da Água, devendo seguir de forma rigorosa a critérios técnicos adequados e exigir um pessoal treinado para tal atividade. A Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, anexo XX, estabelece recomendações para a determinação de pontos estratégicos de coleta e requisitos básicos para a amostragem em águas superficiais e em poços freáticos. As técnicas de amostragem variam de acordo com o tipo do corpo d'água e a finalidade das análises. As águas de sistema de abastecimento destinadas ao consumo humano são amostradas por meio da coleta manual de água tratada diretamente na torneira (BRASIL, 2014) (BRASIL, 2011).

A realização da análise da qualidade das águas pode variar de um simples teste em amostragem de campo de um único parâmetro até a análise de múltiplos parâmetros. Em laboratório, a análise da qualidade da água de uma amostra envolve ensaios, dos quais são utilizados equipamentos, como por exemplo, espectrômetro de absorção atômica, cromatógrafo, fluorímetro, turbidímetro, entre vários outros. A análise de amostras envolve várias etapas, como a amostragem, coleta, conservação e processamento das amostras, que normalmente são realizadas de forma manual (BRASIL, 2014).

3.2 Métodos de Monitoramento de Qualidade da Água em Tempo Real

O monitoramento de qualidade da água em tempo real é uma ferramenta de gestão de águas que possibilita uma avaliação remota das condições físicas e químicas dos recursos hídricos. O monitoramento contínuo da qualidade da água em lagos e reservatórios permite a redução de riscos de contaminação e o aumento da eficiência de órgãos públicos e privados na gestão das águas (POMPÊO *et. Al*, 2015).

Nesse contexto, no âmbito de Internet das Coisas (IoT) e das Cidades Inteligentes, em (PRASAD *et. Al*, 2015) foi apresentada a proposta de um sistema para o monitoramento das águas do Oceano Pacífico. O objetivo principal do sistema é conceder um método para o monitoramento de qualidade das águas, fornecendo amparo no controle à poluição das águas do mar em Fiji, utilizando conceitos de internet das coisas e sensoriamento remoto. O sistema é capaz de medir os parâmetros pH, Potencial Antioxidante, do inglês *Oxidation and Reduction Potential* (ORP), Condutividade e Temperatura. O projeto é composto por: i)

sensores Libelium; ii) conversor analógico-digital (ADC); iii) microcontrolador; iv) módulo cartão de memória (cartão SD); e v) módulo GSM. Os dados podem ser coletados e armazenados no cartão de memória, ou enviados a um servidor em nuvem via *File Transfer Protocol* (FTP) utilizando comunicação GSM. A implementação do sistema resultou na análise dos parâmetros no período de 12 horas, hora a hora, para validar a precisão da medição em quatro diferentes fontes de água. Os resultados mostram a relação do parâmetro Temperatura com os parâmetros pH e Condutividade.

Em (DAIGAVANE; VAISHNAVI, V. e GAIKWAD, M. A., 2017), um sistema de baixo custo para o monitoramento de qualidade das águas utilizando conceitos de IoT (*Internet of Things*) foi implementado. O sistema é composto por sensores para medição de parâmetros físicos e químicos da qualidade das águas, bem como temperatura, pH, turbidez e fluxo de água. Os sensores são conectados em um microcontrolador Arduino Atmega328, onde os dados são coletados e enviados via internet utilizando um módulo ESP8266 Wi-Fi por meio do protocolo TCP/IP.

Em (THIYAGARAJAN *et al.*, 2017) os autores implementaram um sistema inteligente utilizando conceitos de internet das coisas para o monitoramento de qualidade das águas, empregando a coleta de parâmetros de pH e Sólidos Dissolvidos Totais em tanques utilizando comunicação M2M (*machine-to-machine*). Os dados coletados são enviados para um Raspberry Pi 3 por meio de comunicação serial. O Raspberry Pi 3 utiliza um algoritmo *K-Means* para o agrupamento (*clustering*) dos parâmetros de qualidade das águas em diferentes clusters (grupos) baseado nos dados de pH e Sólidos Dissolvidos Totais, para a classificação da qualidade das águas como “boa” ou “ruim”. O sistema resultou em um completo e autônomo monitoramento de qualidade das águas sem envolvimento humano.

Em (SHANTHOSAM, K. P.; LAKSHMI, G. S. e REVATHI, T., 2018) foi proposto o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de qualidade das águas utilizando conceitos de Internet das Coisas, capaz de detectar contaminação da água na tubulação da rede de abastecimento por meio do monitoramento de parâmetros físico-químicos como pH, temperatura, condutividade, potencial antioxidante e turbidez. O sistema utiliza Lógica Fuzzy para o auxílio de tomada de decisão na avaliação do risco de contaminação da água. O objetivo do trabalho realizado é disponibilizar um sistema de monitoramento em tempo real, gerando alertas sobre contaminação da água. Com os sensores instalados na rede de abastecimento, qualquer avaria na qualidade da água na rede de abastecimento detectada, o sistema envia uma mensagem por meio do módulo Zigbee a um servidor e uma válvula solenoide é fechada, bloqueando a passagem de água contaminada. A contaminação da água potável na rede de abastecimento é classificada como, aceitável, rejeitada e desejável.

A Libelium realizou o lançamento de uma plataforma para o monitoramento de qualidade das águas para cidades inteligentes. A plataforma denominada *Waspmote Smart Water* foi projetada para utilização em locais de difícil acesso para detectar avarias e riscos potenciais à saúde pública em tempo real. O *Waspmote Smart Water* é um nó sensor com comunicação sem fio de ultrabaixa potência equipado com vários sensores que monitoram os parâmetros de qualidade da água, capaz de realizar o monitoramento de água potável, detecção de vazamentos de produtos químicos em rios, medição remota de piscinas e spas, e níveis de poluição da água do mar. Os parâmetros de qualidade da água medidos incluem pH, Oxigênio Dissolvido, Potencial Antioxidante (ORP ou POR), Condutividade (Salinidade), Turbidez, Temperatura e íons dissolvidos. Utilizando conectividade 3G/GPRS/WCDMA ou 802.15.4/ZigBee (868/900 MHz), a plataforma é capaz de enviar informações para a nuvem e pode acomodar painéis solares que carregam a bateria para manter a autonomia (LIBELIUM, 2014).

Segundo a (FONDRIEST, 2014), os sistemas de telemetria para o monitoramento de qualidade das águas utilizam comunicação via rádio ou via rede de celular, podendo em alguns casos específicos utilizar comunicação via satélite. A aplicação do monitoramento de qualidade das águas utilizando comunicação via rádio é recomendada quando todo o sistema de monitoramento (equipamentos) está próximo. A comunicação via rádio depende de rádios para a comunicação, armazenadores de dados (*data loggers*) e uma estação base de rádio. A estação base de rádio serve como um *hub* central, sendo capaz de enviar os dados coletados para um servidor em nuvem (FONDRIEST, 2014). Por outro lado, os sistemas de telemetria que utilizam a rede de celular para a comunicação, apresentam algumas vantagens, mesmo dependendo de um plano de dados celulares. Por oferecer uma flexibilidade geográfica, em comparação à comunicação via rádio, as redes de celulares permitem a transmissão de dados de qualquer lugar que recebe sinal de celular e todos os dados coletados podem ser acessados sem fio via Internet. Dessa forma, os equipamentos não precisam ficar próximos e não há necessidade de uma estação base; os dados dos sensores são coletados e armazenados localmente e enviados via rede de celular a uma nuvem. Tais dados podem ser visualizados em uma plataforma de monitoramento (FONDRIEST, 2014).

Em (FONDRIEST, 2014) um sistema baseado em boia é apresentado a ser utilizado para monitorar o oxigênio dissolvido (OD) e outros parâmetros de qualidade das águas em um reservatório. O sistema é composto por uma boia de fixação com ancoras. A boia é implementada em local onde há um alcance maior de profundidade, permitindo múltiplas profundidades de medições e melhores informações características do reservatório.

Um sistema genérico para o monitoramento de qualidade em tempo real é proposto em (GEETHA, S. e GOUTHAMI, S., 2017), constituído por sensores que realizam as leituras dos parâmetros condutividade, turbidez, nível de água e pH. As leituras realizadas são transmitidas a um controlador por meio de módulos de comunicação sem fio; o qual, os controladores realizam o armazenamento de dados que são disponibilizados em um aplicativo personalizado. Utilizando TI CC3200, um microcontrolador com módulo Wi-Fi integrado e núcleo ARM Cortex M4, que pode ser conectado ao ponto de acesso Wi-Fi para conectividade com a Internet, os dados são enviados para a nuvem para que sejam armazenados.

Em (CLOETE *et. Al*, 2017), é desenvolvido um nó entre os sensores de temperatura, condutividade, pH, ORP e fluxo de água, para o monitoramento em tempo real. A proposta do trabalho foi desenvolver um sistema de monitoramento de baixo custo, tornando o sistema mais econômico. Os sinais gerados pelos sensores utilizados passam por um circuito de condicionamento de sinal para poder fazer interface com o microcontrolador. Utilizando um módulo ZigBee, as informações dos sensores são transmitidas a um microcontrolador para notificar as medições, onde as medições são mostradas em um *display* de LCD. Além disso, o sistema contém um *buzzer* para realizar alarmes se alguma das medições exceder de seus limites pré-determinados.

Em (WONG, 2016), além da abordagem sobre a flexibilidade de utilização de plataformas de IoT e destacaram alguns pontos relevantes que evidenciam a importância do monitoramento em tempo real para a caracterização da qualidade das águas, o trabalho propõem um sistema de monitoramento de baixo custo com uma solução que utiliza amostragem adaptativa dos sensores dos parâmetros monitorados. Segundo os autores, a amostragem adaptativa realiza amostragem apenas quando um evento específico de interesse ocorre como, por exemplo, uma inundação. O sistema utiliza a plataforma sem fio NeoMote, composta por um microprocessador ARM-Cortex M3 para computação e plataforma Xively IoT, que é usada como interface

para os serviços. Para destacar a flexibilidade dos serviços das plataformas de IoT disponíveis na internet, os autores usaram três serviços distintos, cada um desenvolvido em uma linguagem de programação diferente.

No âmbito de monitoramento da qualidade da água em tanques de aquicultura, em (HUAN, 2020) é proposto de um sistema de monitoramento com base na tecnologia de banda estreita da Internet das coisas (NB-IoT). O sistema utiliza o monitoramento dos sensores de temperatura, pH, oxigênio dissolvido (DO) e outros parâmetros ambientais; os quais são realizadas leituras remotas por meio de um microcontrolador STM32L151C8 e armazenamento dos dados, destinadas ao controle inteligente e gerenciamento centralizado de viveiros de reprodução. Os dados são transmitidos a longa distância para a plataforma de nuvem de telecomunicações da Internet das coisas (IoT) por meio da tecnologia de NB-IoT.

Em (DAS, 2017) um sistema de medição da qualidade da água é implementado utilizando três sensores (pH, condutividade, temperatura), um microcontrolador LPC2148 para o processamento dos sinais e dois módulos de transmissão de dados: Zigbee: responsável por transferir os dados coletados pelos sensores para o microcontrolador sem fio; e o GSM: responsável por transferir os dados do microcontrolador para um celular e/ou um computador. Além disso, o sistema possui sensores de proximidade para alertar os funcionários, enviando uma mensagem SMS via módulo GSM, caso alguém tente poluir o corpo d'água. Também utilizando módulo com protocolo de comunicação Zigbee, em (RAUT, 2016) um sistema para o monitoramento dos parâmetros pH e turbidez de baixo custo é proposto. O projeto apresenta uma solução utilizando um microcontrolador PIC 18F4550, dispositivos para transmissor e recebimento das informações coletados por sensores, as quais os resultados são exibidos no LCD e também no PC em diferentes períodos de tempo.

A indústria de fabricação de sondas e sensores utilizados para a análise de monitoramento de água está emergindo. A In-Situ Brasil, oferece soluções de sondas multiparamétricas para o monitoramento de água; sondas quais podem realizar a análise de um único parâmetro ou de múltiplos parâmetros simultaneamente. Todas as sondas In-Situ podem ser conectadas a um aplicativo móvel Android chamado VuSitu Mobile App, capaz de coletar e armazenar os dados. Alguns dispositivos de sondas fornecem comunicação Bluetooth® entre o dispositivo móvel e as sondas, permitindo o envio de dados. Além do aplicativo, a empresa também oferece um *software* com interface com os instrumentos In-Situ e sistemas de telemetria (IN-SITU, 2020) (IN-SITU, 2020a).

Assim como a In-Situ Brasil, empresas como Ag Solve, AKSO e HANNA® *instruments* são especializadas em monitoramento ambiental e em soluções tecnológicas nas áreas, desenvolvendo sensores e sondas multiparamétricas para o monitoramento dos principais parâmetros para análise de qualidade da água por meio de medições simultâneas. Das soluções de sondas apresentadas, as diferenças estão em quesitos dimensionais de implantação e quanto a capacidade de leitura de determinados parâmetros, e também de custos. Comumente analisados são os parâmetros: temperatura, o pH, a turbidez, o oxigênio dissolvido na água, a condutividade elétrica, os sólidos totais dissolvidos e a salinidade. As sondas multiparamétricas apresentam além do alto custo de aquisição a dependência de calibrações e dificuldades práticas de instalações (AKSO, 2020) (AGSOLVE, 2017) (HANNA® INSTRUMENTS, 2017). O Quadro 3 a seguir mostra os valores relacionados as soluções de monitoramento em tempo real presentes no mercado.

Quadro 3 – Preços das soluções presentes no mercado.

EMPRESA	DESCRIÇÃO DO PRODUTO	PARÂMETROS MONITORADOS	PREÇO
In-Situ Brasil	SmartTroll RDO (sonda portátil)	• Oxigênio Dissolvido; • Temperatura; • Pressão barométrica; • Temperatura do ar.	R\$ 14.529,00
Acqua Nativa	AcquaProbe (sonda portátil)	• pH; • ORP; • Oxigênio dissolvido; • Temperatura; • Condutividade; • Salinidade; • TDS; • Gravidade específica.	R\$ 17.640,00
Akso	Medidor multiparâmetro (sonda portátil)	• pH; • Condutividade; • Oxigênio dissolvido; • Temperatura.	R\$ 3.161,40
Acqua Nativa	AcquaLogger (telemetria)	• pH; • ORP; • Oxigênio dissolvido; • Temperatura; • Condutividade; • Salinidade; • TDS; • Gravidade específica.	R\$ 28.950,00

Fonte: Autor, 2020.

A ATI – Analytical Technology desenvolveu um sistema para o monitoramento em tempo real da qualidade de água chamado MetriNet, que contém sensores de medição independentes capazes de analisar os parâmetros de qualidade da água. O sistema apresenta a análise de 8 (oito) parâmetros simultaneamente, dos mais básicos aos mais complexos, exigidos pela legislação de água potável. A análise do sistema é realizada por meio de sensores independentes e os dados podem ser transmitidos via modem celular, Wi-Fi, Modbus cabeado, Ethernet/IP e Profibus. Tal sistema depende de um controlador local para o armazenamento e transmissão dos dados, e para ajustes e calibrações dos sensores. O sistema é alimentado por energia fotovoltaica, bateria ou energia elétrica (NIVETEC, 2019).

No âmbito da implementação de sistemas embarcados, muitas empresas vêm desenvolvendo soluções de fácil aplicação e que podem ser utilizados na maioria dos microcontroladores encontrados no mercado. A empresa DFRobot é uma fornecedora de dispositivos e sensores inovadores de código aberto, apresentando soluções DIY (*Do It Yourself*) para diversas áreas. Para o âmbito de qualidade das águas, a

DFRobot oferece um guia sobre sensores selecionados que podem ser aplicados no desenvolvimento de sistemas embarcados, que vão do uso para prototipagem ao uso no âmbito industrial. Dos sensores disponíveis da DFRobot para a análise de qualidade das águas estão: sensor de pH; sonda de ORP; sonda de condutividade elétrica; sonda de Sólidos Dissolvidos Totais e sonda de turbidez. Além disso, a empresa fornece também sondas acompanhadas por kits com soluções para calibração (DFROBOT, 2018).

Nesse âmbito, a Atlas Scientific ® é outra fabricante de sondas e sensores para o monitoramento de qualidade das águas de simples utilização em sistemas embarcados, oferecendo soluções com precisão de nível laboratorial. Dos sensores e sondas disponíveis estão: pH, ORP, OD, condutividade, CO₂, temperatura, pressão, fluxo e cor da água. Além disso, a empresa também comercializa placas com circuitos integrados prontos para a utilização sistemas embarcados, permitindo leituras analógicos e comunicação por meio de protocolos UART e I²C. No Brasil, a comercialização dos produtos disponibilizados pela Atlas Scientific ® é realizada pela empresa Acqua Nativa. A Acqua Nativa, além de comercializar sensores e sondas da Atlas Scientific ®, desenvolve soluções de monitoramento para o meio ambiente, com aplicações em agricultura, aquicultura, hidroponia e qualidade da água (ATLAS SCIENTIFIC ®, 2015).

3.3 Considerações Parciais

Por meio desse capítulo, foi possível o entendimento sobre as tecnologias, pesquisas e discussões que estão sendo realizadas focadas no desenvolvimento de soluções de baixo custo com confiabilidade no âmbito de análise da qualidade das águas, uma vez que a maioria das soluções presentes no mercado são economicamente não viáveis por serem de alto custo. Podemos ver que o desenvolvimento de sistemas de monitoramento em tempo real, alinhados aos conceitos de Internet das Coisas (IoT) e cidades inteligentes, está em constante crescimento, apresentando soluções de monitoramento remoto que utilizam diversos sensores (pH, temperatura, turbidez, oxigênio dissolvido, condutividade e etc.) acoplados a microcontroladores (Atmega328, PIC18F, STM32 e etc.), capazes de transmitir as informações dos parâmetros através da internet (ZigBee, Wi-Fi, GPRS, SigFox, NB-IoT e etc.) e permitindo a visualização dos dados em tempo real, por meio de plataformas *online* e aplicativos de celular. Nesse aspecto, no próximo capítulo será abordado o desenvolvimento do sistema de qualidade da água em tempo real proposto, bem como sua arquitetura e especificação dos componentes utilizados no projeto.

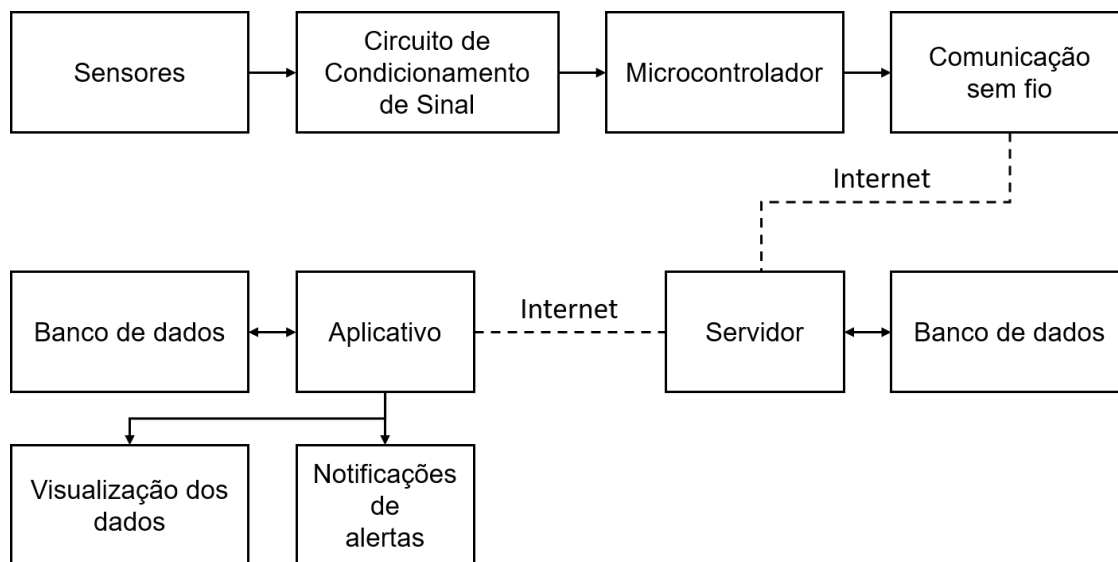
4 SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA PROPOSTO

A seguir serão apresentados os componentes que compõem a arquitetura do sistema de monitoramento da qualidade da água proposto.

Com base nas considerações anteriores sobre a qualidade das águas e seu impacto à saúde pública, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento capaz de coletar dados sobre os parâmetros de qualidade da água em tempo real, disponibilizando de forma *online* por meio de um aplicativo, todas as informações importantes de forma precisa e eficiente, otimizando ações e medidas de manutenções e evitando a distribuição de água contaminada aos usuários.

O sistema proposto utiliza sensores específicos para cada parâmetro monitorado e os dados gerados pelos sensores são aplicados a um condicionamento de sinal, que tem como finalidade adequar os sinais aquisitados para o processamento das informações no microcontrolador. O microcontrolador, por sua vez, exerce função de receber os dados condicionados, processá-los e enviá-los à um servidor por meio da internet, utilizando comunicação sem fio. O servidor armazena todas as informações recebidas em um banco de dados e as disponibiliza a um aplicativo quando necessária. Para a visualização dos dados, o aplicativo requisita as informações ao servidor utilizando a internet, as quais são armazenadas em um banco de dados presente no dispositivo móvel, gerando assim, gráficos e alertas em tempo real sobre a qualidade das águas. As notificações de alertas são geradas quando um parâmetro apresentar avaria, ou seja, quando apresentar valores diferentes dos padrões de qualidade estabelecidos. A Figura 13 ilustra a arquitetura do sistema proposto.

Figura 13 – Arquitetura do sistema proposto.



Fonte: Autor, 2020.

Os parâmetros físico-químicos da qualidade da água monitorados serão pH, Temperatura, Oxigênio Dissolvido, Sólidos Totais Dissolvidos e Turbidez. Os parâmetros e os sensores utilizados foram determinados por meio de estudos da viabilidade para a prototipagem do sistema, visando baixa complexidade de utilização dos sensores em sistemas embarcados, baixo custo e confiabilidade das informações. A seguir será

apresentada a contribuição de cada variável utilizada no sistema proposto para o monitoramento da qualidade das águas e seus respectivos sensores.

4.1 Variáveis da Qualidade de Água do Sistema Proposto

A definição dos sensores a serem utilizados no sistema partiu da análise da aplicabilidade dos mesmos para o desenvolvimento de sistemas embarcados. Por disponibilizar soluções *plug-and-play* inovadores e de código aberto aplicáveis ao âmbito de prototipagem, foram selecionados sensores de temperatura, sólidos dissolvidos totais (TDS) e turbidez. Para o parâmetro OD e pH, os sensores selecionados foram o da empresa Atlas Scientific ®.

4.1.1 Temperatura

No controle da solubilidade do oxigênio na água, a temperatura é o fator mais importante. A elevação da temperatura de um corpo d'água é capaz de diminuir a solubilidade dos gases e a quantidade de oxigênio que se dissolve a 0°C (14,60 mg/L) é mais que o dobro da que se dissolve a 35 graus (7,59 mg/L). A variação da temperatura também pode afetar outros parâmetros, como o pH, OD, ORP e entre outros (ESTEVES, 1998) (LAMON, 2014). Dessa forma, a medição de temperatura torna-se de suma importância.

O sensor de temperatura utilizado é o modelo DS18B20, o qual é um termômetro digital que fornece medições de temperatura em graus Celsius de 9 a 12 bits, apresentando precisão de até $\pm 0,5$ °C. Sua comunicação é realizada por meio de um barramento de 1 fio (1-Wire®) que, por definição, requer apenas uma linha de dados (e terra) para envio de medição para um microcontrolador. Uma grande vantagem é que por ser digital, a leitura do sensor não sofre interferência da distância. A Tabela 3 a seguir mostra algumas características básicas do termômetro digital (MAXIM, 2019).

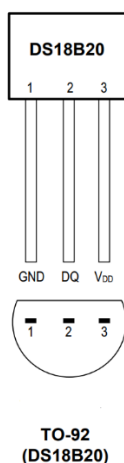
Tabela 3 – Características básicas do DS18B20.

Descrição	Faixa de Operação
Faixa de medição	-55°C – +125°C (-67°F a +257°F)
Erro	$\pm 0,5$ °C acurácia de -10°C a +85°C
Tensão de alimentação	3V – 5,5V
Corrente de consumo	2,7 μ A
Tempo de resposta	<750 ms
Tensão de Saída	5V (Máx.)

Fonte: MAXIM, 2019.

Normalmente o DS18B20 é encontrado no mercado com encapsulamento com IP65, ou seja, a prova d'água. A configuração dos pinos pode ser visualizada na Figura 14, onde VDD é pino de entrada de tensão de operação e DQ o pino para a aquisição de medição.

Figura 14 – Termômetro digital DS18B20.



Fonte: Adaptado MAXIM, 2018.

4.1.2 Turbidez

O parâmetro Turbidez é importante no processo de monitoramento de qualidade água, consistindo-se em apresentar o quão turva a água está. O monitoramento desse parâmetro é capaz de fornecer informações sobre partículas em suspensão na água, causadas por algas, sujeiras, minerais ou até mesmo bactérias. Em reservatórios, sujeiras oriundas da própria água que abastece o reservatório, como argilas, areias e matéria orgânica, podem ser detectadas por meio do monitoramento da cor e turbidez da água. Além disso, a turbidez é relacionada e complementada às exigências para a garantia da qualidade microbiológica das águas. Inúmeros sabores, odores e cores da água indesejada podem ser causadas por excesso de poluição e turbidez (POSUDIN, 2014) (BRASIL, 2011).

O sensor de turbidez a ser utilizado é o modelo SKU-SEN0189 da fabricante DFROBOT. O SKU-SEN0189 é um sensor capaz de detectar a qualidade da turbidez de um corpo d'água por meio de luz infravermelha. Por possuir um emissor e um receptor, com a emissão do infravermelho, o receptor realiza a medição do nível de feixe de luz recebido. O emissor e o receptor formam um ângulo de 180° entre si. Um corpo d'água que apresenta uma grande quantidade de partículas suspensas, apresenta maior absorção e reflexão da luz infravermelha por parte do líquido. Quanto mais escura a água, maior seu nível de turbidez. Com faixa de detecção de 0% a 3,5% (0 – 3050 NTU), esse sensor de turbidez apresenta duas configurações de saída: digital ou analógica. A Tabela 4 a seguir mostra as características básicas do sensor de turbidez SKU-SEN0189.

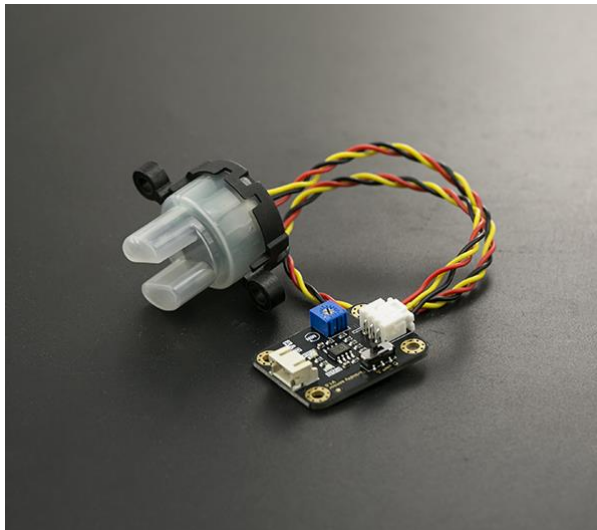
Tabela 4 – Características básicas do SKU-SEN0189.

Descrição	Faixa de Operação
Faixa de medição	0% – 3,5% (0 – 3050 NTU)
Erro	$\pm 0,5F \cdot S$
Tensão de alimentação	5V
Corrente de consumo	40mA (Máx.)
Temperatura de operação	-30°C – +80°C
Tensão de saída	0 – 5,0V

Fonte: Keyestudio, 2019.

O nível de feixe luz infravermelha recebida pelo receptor é convertida, com a configuração analógica, na forma de uma tensão de saída, variante de 0 a 5,0 V ou com a configuração digital, obtendo como sinal de saída *HIGH* ou *LOW*. A Figura 15 ilustra o sensor utilizado para a determinação do teor de turbidez na prototipagem do sistema.

Figura 15 – Sensor de Turbidez SKU-SEN0189.



Fonte: DFRobot, 2018.

A fabricante Keyestudio também possui uma linha de sensores de turbidez, utilizando o mesmo conceito e aplicabilidade. Segundo a fabricante DFROBOT, quando a turbidez do meio for próxima de zero, ou seja, quando não houver resíduos suspensos na água, a resposta em tensão do sensor será de 5,0 V. O sensor de turbidez já apresenta adequação para implementação em sistemas embarcados.

4.1.3 Sólidos Dissolvidos Totais (TDS)

Assim como a temperatura, a salinidade também exerce influência na capacidade de um corpo d'água em dissolver oxigênio. Em comparação à temperatura, a salinidade apresenta pequena influencia na dissolução de oxigênio na água. Porém, em atividades potencialmente poluidoras que apresentam elevadas concentrações de sais e minerais dissolvidos na água, o nível de OD pode sofrer influência (FIORUCCI, A. R e FILHO, E. B., 2005). A salinidade é determinada pela quantificação da concentração de sais e são determinadas por meio de salinômetros. Porém, também é possível determinar o teor de salinidade por meio da condutividade elétrica da água, aplicando-se fatores de correção (ESTEVES, 2011).

Um estudo realizado por Amorim *et. Al* (2012), avaliou a relação entre condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos (STD) em uma seção do Rio Catolé do município de Itapetininga-BA e observou que à medida que a quantidade de sólidos totais dissolvidos na água aumentava, a condutividade elétrica também aumentava. Por meio do comportamento relacional linear entre as variáveis, pôde-se concluir que quanto maior a quantidade de sólidos dissolvidos, maior a condutividade elétrica da água. Dessa forma, o monitoramento da condutividade elétrica pode fornecer informações empíricas relacionadas à salinidade e sólidos totais dissolvidos (STD).

Assim como o sensor de turbidez, o sensor utilizado para o monitoramento do total de sólidos dissolvidos na água é fabricado pela DFROBOT, por apresentar preço acessível e facilidade de utilização. O sensor SKU-SEN0244 possui eletrodo capaz de medir materiais condutores, como sólidos em suspensão,

metais pesados e íons condutores na água (DFROBOT, 2019). A Tabela 5 mostra as características básicas do sensor de Sólidos Dissolvidos Totais (TDS).

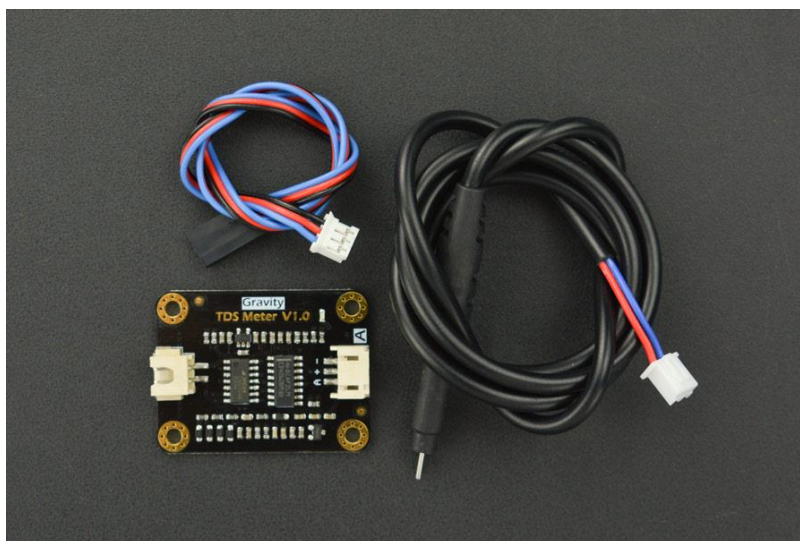
Tabela 5 – Características básicas do SKU-SEN0244.

Descrição	Faixa de Operação
Faixa de medição	0 – 1000 ppm
Erro	±10% F*S (25°C)
Tensão de Alimentação	3,3 – 5,5V
Corrente de consumo	6mA (Máx.)
Temperatura de operação	< 55°C
Tensão de Saída	0 – 2,3V

Fonte: DFRobot, 2018.

O sensor é capaz de medir a quantidade (em miligramas) dos sólidos solúveis que estão dissolvidos em um litro de água, medindo a quantidade total de substâncias orgânicas ou inorgânicas dissolvidas em água, na unidade de ppm (partes por milhão). A Figura 16 ilustra o sensor SKU-SEN0244.

Figura 16 – Sensor de Sólidos Dissolvidos Totais SKU-SEN0244.



Fonte: DFRobot, 2018.

4.1.4 pH

O pH é capaz de influenciar direta e indiretamente outros parâmetros. Por representar uma tendência de uma solução aquosa em ganhar ou perder elétrons, por exemplo, a medição de ORP possui considerável dependência em relação ao parâmetro pH. Quanto maior o valor de pH, menor será o valor de ORP. Se o pH é ácido, a água provocará corrosão no sistema de distribuição e nas tubulações das casas (LAMON, 2014). Além disso, o valor do pH tem influência na distribuição das formas livre e ionizada de diversos compostos químicos, contribuindo para um maior ou menor grau de solubilidade das substâncias e de definir o potencial de toxicidade de vários elementos (LAMON, 2014).

O sensor utilizado para o monitoramento do pH da água é a mini sonda pH da Atlas Scientific ® (ATLAS SCIENTIFIC ®, 2015). A Tabela 6 mostra as características básicas do sensor de pH.

Tabela 6 – Características básicas da mini sonda de pH.

Descrição	Faixa de Operação
Faixa de medição	0 – 14
Erro	$\pm 0,002\text{pH}$ (25 °C)
Tensão de alimentação	3,3 – 5V
Corrente de consumo	33mA
Tempo de resposta	95% em 1 segundo
Temperatura de operação	-5 – 99 °C
Tensão de saída	2,745 V (pH 0) – 265 mV (pH 14)

Fonte: Atlas Scientific ®, 2015.

Por oferecer facilidade para implementação em sistemas embarcados, o sensor possui um conector SMA macho e uma interface de sensor (Gravity ®), apresentando simplicidade e aplicabilidade à porta de entrada analógica de qualquer microcontrolador (ATLAS SCIENTIFIC ®, 2015). Porém, esse sensor apresenta a necessidade de recalibragem frequentes em soluções padrões, a fim de obter resultados mais precisos. A calibração é realizada para obter uma melhor precisão do sensor. Segundo a fabricante, não há um cronograma definido para calibração da sonda, depende de cada caso de utilização. Sem a utilização da sonda em processos que utilizando produtos abrasivos, a sonda deve ser calibrada uma vez ao ano, nos seus dois primeiros anos de utilização e a cada três meses, após passado esse período (após os dois primeiros anos) (ATLAS SCIENTIFIC ®, 2015). A Figura 17 ilustra a mini sonda de pH.

Figura 17 – Mini sonda de pH.



Fonte: Atlas Scientific ®, 2015.

4.1.5 Oxigênio Dissolvido (OD)

A variável OD é de suma importância para o ecossistema aquático, influenciando diretamente na preservação à sobrevivência dos seres aquáticos, como os peixes. Algumas espécies de peixes requerem concentrações mínimas de OD entre 10% a 60% de saturação. Porém, a importância do OD não se restringe

apenas à necessidade dos peixes. Os níveis de concentrações de OD em água potável ou em água utilizada como recreação, podem indicar a formação de substâncias com odores desagradáveis. Por o oxigênio se tratar de um poderoso oxidante, em águas tratadas os valores de OD são desejados com valores abaixo de 2,5 mg/L. A presença de altas concentrações de OD não é conveniente em água que percorrem tubulações de ferro e aço, por favorecer a corrosão (FIORUCCI, A. R e FILHO, E. B., 2005). O crescimento de bactérias resulta em um crescimento do consumo de oxigênio e, portanto, resulta em uma queda nos níveis de OD.

Por apresentar nível laboratorial, o sensor utilizado para o monitoramento do parâmetro de OD no sistema proposto é o da fabricante Atlas Scientific ®. O kit adquirido foi o KIT-105D, o qual é composto de uma sonda de OD, uma placa com circuito integrado para leituras analógicas em sistemas embarcados, membranas de substituição e uma solução para a calibração da sonda (ATLAS SCIENTIFIC ®, 2015). A Tabela 7 mostra as características básicas da sonda de OD.

Tabela 7 – Características básicas da sonda de OD.

Descrição	Faixa de Operação
Faixa de medição	1 – 50 mg/L
Erro	±0,2 mg/L
Tensão de alimentação	3,3V – 5V
Corrente de consumo	0,3 mA
Tempo de resposta	~ 0,5 mg/L/seg.
Temperatura de operação	1 – 50°C
Tensão de saída	0 – 500 mV

Fonte: Atlas Scientific ®, 2015.

A sonda de OD possui um eletrodo de oxigênio dissolvido construído com uma membrana de teflon ao qual pode ser submergido até 343 metros, com expectativa de funcionamento de 2,5 anos contínuos. Contudo, por depender de uma reação eletrolítica entre a solução presente na sonda e o oxigênio da água, a mesma depende de uma recalibragem. Normalmente, o período para recalibrar e substituir, tanto a solução de eletrólitos, como a membrana da sonda, é de 6 a 12 meses, dependendo de sua aplicação (ATLAS SCIENTIFIC ®, 2015).

Por meio do KIT-105D, o nível de oxigênio dissolvido na água é expresso na forma de porcentagem de saturação (% sat.). O método da porcentagem de saturação compara a pressão parcial de oxigênio na atmosfera com a pressão parcial de oxigênio da água, obtendo algumas informações sobre sua presença na água. Por levar em consideração a temperatura, a salinidade e a pressão, uma equação é utilizada para determinar o nível de saturação de OD na água (ATLAS SCIENTIFIC ®, 2015). A Equação 3 mostra a determinação da porcentagem de saturação de oxigênio dissolvido na água.

$$\%saturação = \frac{mV_{\text{água}}}{mV_{\text{ar}}} \times 100 \quad (3)$$

Ou seja, o valor de saturação (% sat.) é igual ao valor de tensão da sonda na água dividido pelo valor da mesma no ar. Segundo a Atlas Scientific ®, cada sonda apresenta uma saída de tensão levemente distinta, com variação de 40 a 60mV no ar. A recomendação do fabricante, para a calibração e ajustes de temperatura, salinidade e pressão, é realizar a leitura analógica da sonda no ar e armazenar esse valor na memória do

microcontrolador (ATLAS SCIENTIFIC ®, 2015). A Figura 18 a seguir mostra o KIT-105D da Atlas Scientific ®.

Figura 18 – KIT-105D para Oxigênio Dissolvido.



Fonte: Atlas Scientific ®, 2015.

Os limites utilizados para o desenvolvimento do sistema estão apresentados da Tabela 8 á seguir.

Tabela 8 – Limites dos parâmetros utilizados no sistema de monitoramento da água.

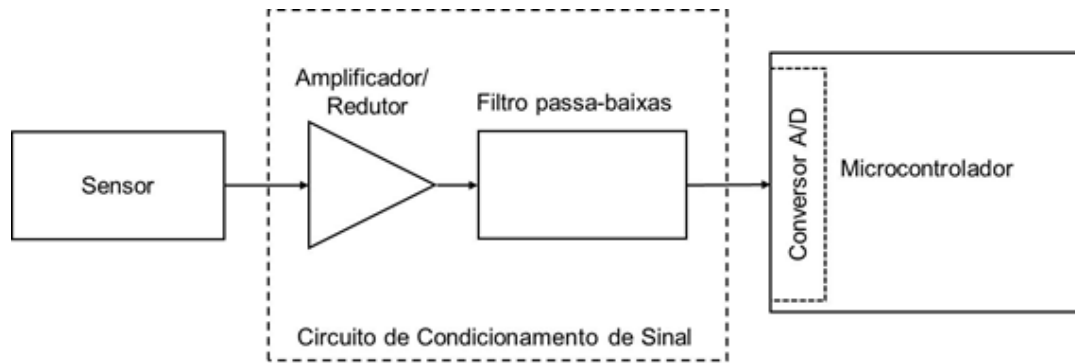
Parâmetros	Limites
Oxigênio Dissolvido (sat. %)	> 50%
pH	6.0 – 9.5
TDS (ppm)	< 1000
Temperatura (°C)	15 – 30
Turbidez (UNT)	< 5

Fonte: Autor, 2020.

4.2 Circuito de Condicionamento de Sinal

Os sensores são utilizados no sistema para obter os dados referente as grandezas dos parâmetros monitorados, porém os sinais gerados pelos mesmos apresentam diferentes níveis de tensão de saída, os quais precisam ser ajustados para faixa de operação do microcontrolador utilizado. Dessa forma, o sistema demanda um circuito para adequação dos sinais analógicos, chamado Circuito de Condicionamento de Sinal. A Figura 19 ilustra um diagrama de blocos de um circuito de condicionamento de sinal, de forma genérica.

Figura 19 – Diagrama de blocos de um circuito de condicionamento de sinal.



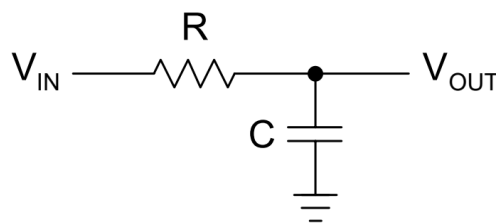
Fonte: Autor, 2020.

O circuito de condicionamento utiliza um divisor de tensão por meio de dois resistores e um amplificador operacional LM324, na configuração de seguidor de tensão. Também conhecido como amplificador de *buffer*, o amplificador seguidor de tensão tem função de garantir o ganho de tensão de 1 (CARTER, B e MANCINI, R. 2018). A Equação 4 a seguir mostra o cálculo do divisor de tensão.

$$V_{out} = \frac{R1}{R1 + R2} \times V_{in} \quad (4)$$

Nesse contexto, além da adequação dos níveis de tensão dos sensores, filtros são utilizados para evitar ruídos na entrada do conversor analógico-digital do microcontrolador. Os filtros são aplicados em diversas áreas, como sistemas de comunicação, sistemas de áudio e instrumentação industrial. De forma geral, um filtro é um dispositivo capaz de transmitir e/ou atenuar sinais elétricos em determinadas frequências ou faixas de frequências. Em sistemas de aquisição de sinais, geralmente são utilizados filtros passa-baixas, projetados para a eliminação de ruídos nos estágios de condicionamento de sinal (CARTER, B e MANCINI, R. 2018). A configuração mais simples é o filtro passa-baixa RC, contendo um resistor (R) e um capacitor (C). A Figura 20 ilustra a estrutura básica do filtro passa-baixa RC.

Figura 20 – Filtro passa-baixa RC.



Fonte: Carter, B e Mancini, R. 2018.

O filtro passa-baixa RC permite apenas a passagem de frequências abaixo de uma específica frequência de corte. A banda de corte corresponde à frequências do sinal de entrada que são rejeitadas pelo filtro. A frequência de corte é determinada por meio da Equação 5 mostrada à seguir.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5)$$

Cada sensor utilizado no sistema proposto depende de um circuito individual para o condicionamento do sinal, adequando níveis de tensão e aplicando filtros para a eliminação de ruídos indesejados. Com a aquisição dos sensores de pH, TDS, turbidez e OD, são adquiridos também placas de interfaces, as quais contêm um circuito de condicionamento específico para cada sensor.

4.3 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado para o desenvolvimento do sistema foi o ESP32. O ESP32, desenvolvido pela empresa Espressif, é o sucessor do Node MCU ESP8266. Além de possuir o módulo de comunicação Wi-Fi, o ESP32 apresenta um sistema com processador *Dual Core*, integrado com Bluetooth híbrido e múltiplos sensores embutidos, com características de baixo consumo de energia, alto desempenho de potência, amplificador de baixo ruído, robustez, versatilidade e confiabilidade. Por meio da programação utilizando a linguagem de programação C/C++ por meio do ambiente de desenvolvimento Arduino IDE, o ESP32 é empregado em muitos projetos no âmbito de Internet das Coisas e Indústria 4.0 (ESPRESSIF, 2019) (SANTOS e JUNIOR, 2019). A Tabela 9 mostra uma comparação entre o ESP32 e seu antecessor ESP8266.

Tabela 9 – Comparação ESP8266 e ESP32.

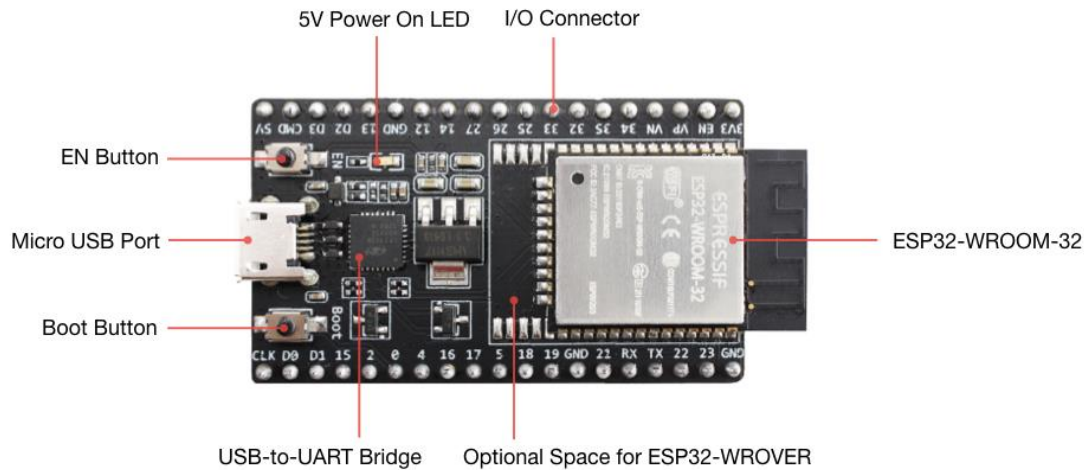
Especificações	ESP8266	ESP32
MCU	Xtensa single 32-bit l106	Xtensa dual-core 32-bit lx6 600 DMIPS
802.11 b/g/n Wi-Fi	HT20	HT40
Bluetooth	Não possui	Bluetooth 4.2 Le
Frequência	90 MHz	160 MHz
SRAM	160 Kb	512 Kb
Flash	SPI Flash, 16 Mb	SPI Flash, 16 Mb
GPIO	17	36
Hardware/ Software PWM	Não possui/ 8 canais	1/ 16 canais
SPI/ I2C/ I2S/ UART	2/ 1/ 2/ 2	4/ 2/ 2/ 2
ADC	1 de 10-bit	18 de 12-bit
CAN	Não possui	1
Sensor Capacitivo	Não possui	Possui
Sensor de Temperatura	Não possui	Possui
Tensão de Operação	3,3 V	3,3 V

Fonte: Autor, 2019.

Para o presente trabalho, a utilização do ESP32 apresenta vantagens em comparação ao seu antecessor ESP8266, apresentando 18 canais de entrada ADC de 18 x 12 bits (enquanto o ESP8266 possui apenas 1x 10 bits ADC). Os canais de entrada ADC têm uma resolução de 12 bits, possibilitando leituras

analógicas que variam de 0 a 4095, nas quais 0 corresponde a 0V e 4.095 a 3,3V (ESPRESSIF, 2019). A Figura 21 mostra a placa ESP32-DevKit utilizado no desenvolvimento do sistema.

Figura 21 – ESP32-DevKit.



Fonte: Espressif, 2019.

4.4 Comunicação sem Fio

Para a comunicação sem fio e envio de dados utilizando a internet, foi utilizado o módulo GPRS/GSM SIM800L. O módulo SIM800L é um dispositivo frequentemente utilizado em projetos no âmbito de Internet das Coisas. Tal módulo permite sua integração com diversas plataformas de prototipagem por meio da comunicação via interface serial (UART). O SIM800L é utilizado para a comunicação de voz, bem como ligações e envio de mensagens SMS e transmissão de dados por meio da conexão com rede de celular GSM/GPRS. Com configuração *quad-band*, o módulo está habilitado para quadro bandas de frequências: GSM 850 MHz, EGSM (*Extended GSM*) 900 MHz, DCS (*Digital Cellular System*) 1800 MHz utilizados na Europa, Ásia e África, e PCS (*Personal Communications Service*) 1900 MHz, utilizado na América. Dessa forma, o módulo se torna compatível com todas as redes GSM do mundo (RIÇATO, 2018) (SAMPAIO, 2018).

O SIM800L funciona com tensão mínima de 3,5V, com recomendação de utilização com alimentação entre 3,7 e 4,4 V. Durante a transmissão de dados, a *shield* SIM800L pode consumir uma corrente de até 2A. Além disso, para a comunicação de voz, o módulo possui pinos para a conexão de microfone e autofalante. O módulo apresenta também um LED indicador que pode funcionar como uma depuração, indicando se há falta ou presença de conexão com a rede de celular. A comunicação com o módulo é realizada utilizando comandos AT, apresentando comandos curtos em formato de texto que permitem operações como ligar, desligar ou mudar parâmetros de conexão, serviços de chamada, enviar e receber SMS, autorresposta e verificação de qualidade do sinal (MEDEIROS, 2018).

A placa do módulo do SIM800L possui pinos para chamadas de voz e pinos para envio de dados via comunicação serial UART. Os pinos utilizados para a comunicação para o envio de dados são os de alimentação (VCC e GND) e os de comunicação UART (TXD e RXD). A Figura 22 ilustra o módulo SIM800L e seus respectivos pinos.

Figura 22 – Módulo SIM800L GSM/GPRS.



Fonte: ADVICE, 2018.

Para o funcionamento do módulo há necessidade da utilização de um *chip* de celular, pois o mesmo depende de uma conexão com a rede de celular GSM/GPRS. Para o envio de dados, além da necessidade do *chip*, o mesmo deve possuir um plano de dados disponíveis para que a comunicação seja realizada com êxito.

GSM (*Global System for Mobile Communications*) é uma rede de comunicação móvel de segunda geração, conhecida como tecnologia 2G, desenvolvida pela *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI). A segunda geração da rede de comunicação móvel, diferentemente de seus antecessores, possui sinal e canais de voz digitais. O GSM é o antecessor das tecnologias GPRS e da tecnologia 3G. A tecnologia GSM/GPRS, também conhecida como geração 2.5G, é uma integração das redes *Global System for Mobile Communications* (GSM) e o serviço GPRS (*General Packet Radio Service*), sendo uma extensão da rede GSM. A cobrança pelo uso do GPRS é feita por quantidade de dados transmitidos (SAMPAIO, 2018).

4.5 Servidor

Para que a arquitetura do sistema de monitoramento de água em tempo real que utiliza comunicação via rede celular funcione com êxito, o sistema depende de locais e serviços para armazenamento dos dados, que demandam instalações, configurações e testes. Para o armazenamento dos dados, utiliza-se um servidor com um banco de dados. A plataforma de servidor a ser utilizada é a CentOS 7 Linux, qual oferece uma plataforma totalmente gratuita, estável e segura (CENTOS, 2015).

O servidor contém o banco de dados Firebird e o serviço de internet Apache, ambos necessários para o armazenamento dos dados e acesso remoto dos parâmetros monitorados, respectivamente. O HTTP (*HyperText Transfer Protocol*) é um protocolo de comunicação da camada de aplicação do modelo OSI, utilizado para a transferência de dados. Esse protocolo define a ação a ser executada a partir de um conjunto de métodos de requisições. O método GET é utilizado para requisição de dados no sistema proposto. As requisições por meio do método GET permitem o armazenamento dos dados enviados ao servidor em um banco de dados e a disposição dos dados para visualização em um aplicativo e web (MOZILLA, 2019).

4.5.1 Banco de Dados do Servidor

O sistema proposto irá utilizar de dois bancos de dados: um será utilizado para o armazenamento de dados no servidor e o outro será utilizado para o armazenamento de dados no celular, para a visualização dos dados via um aplicativo. Os bancos utilizados são o Firebird e SQLite, respectivamente. O Firebird ou FirebirdSQL, é um SGBD (Sistema Gerenciador de Banco de Dados) de código aberto, desenvolvido a partir do código-fonte do Interbase 6 (FIREBASE, 2019).

4.6 Aplicativo

O aplicativo para o sistema proposto foi desenvolvido para a plataforma Android utilizando o *software* Delphi. O Delphi é um compilador e uma IDE utilizada para o desenvolvimento de *softwares* multiplataformas, com *design* e desenvolvimento rápido e integrado para aplicativos modernos para dispositivos móveis, compatível com todos os principais bancos de dados do mercado. O Delphi 10.2 Tokyo, utilizado no desenvolvimento do sistema, apresenta SDK completo para desenvolvimento para Desktop, *Mobile*, *Web* e aplicações de console com capacidade multiplataforma, podendo criar aplicações para Windows (x86 e x64), OS X, iOS e Android, apresentando uma biblioteca de cliente HTTP e REST, disponível em todas as plataformas (EMBARCADERO, 2019).

4.6.1 Notificações de Alertas

As notificações de alertas de possíveis avarias na qualidade das águas em reservatórios são geradas por meio da plataforma Firebase. O Firebase é uma plataforma da Google que oferece diversas ferramentas para o desenvolvimento de aplicativos de alta qualidade, contendo quatro pilares de serviços: *Analytics*, *Develop*, *Grow* e *Earn*. Para a geração das notificações é utilizada a solução de mensagens Firebase Cloud Messaging (FCM). O pilar *Develop* oferece diversos recursos, como *Realtime Database*, que disponibiliza um banco de dados NoSQL hospedado em nuvem, *Cloud Messaging*, permitindo o envio de mensagens e notificações entre plataformas iOS, Android e *web*, e entre outros (FIREBASE, 2019). Quando o sistema de monitoramento detectar avarias presentes, por exemplo, em um reservatório, o mesmo é capaz de enviar notificações para o aplicativo.

4.6.2 Banco de Dados do Aplicativo

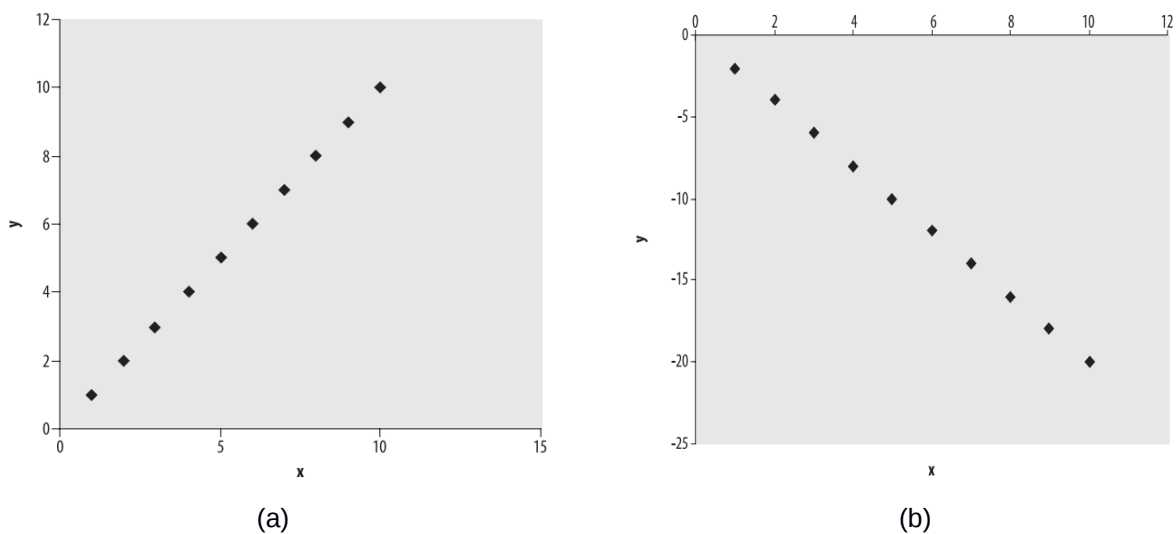
Para o armazenamento das informações requisitadas pelo aplicativo, um banco de dados é utilizado. O SQLite é um banco de dados pequeno que apresenta alta confiabilidade e autonomia e é incorporado em dispositivos móveis e vem se incluindo em diversas outras aplicações, fornecendo um sistema de gerenciamento de banco de dados relacional. Em termos de configuração, a administração de banco de dados e recursos necessários são básicos. O SQLite possui os seguintes recursos visíveis: independente, sem servidor, com configuração zero, transacional. Sem servidor, o SQLite é autônomo utilizável em qualquer ambiente, especialmente em dispositivos móveis que desejam acessar o servidor de banco de dados usam o protocolo TCP/IP para enviar e receber solicitações (arquitetura cliente/servidor) (SQLITE, 2019). Por tratar-se de um banco de dados leve com requisitos mínimos para funcionamento em dispositivos móveis, o SQLite é utilizado no projeto como banco de dados do aplicativo de visualização dos parâmetros monitorados pelo sistema.

4.7 Análise Correlacional das Variáveis Quantitativas

Em termos de análise comportamental de dados, no âmbito de ciência dos dados, uma das metodologias mais utilizadas para a investigação de pares de dados é a utilização de diagramas de dispersão Cartesianos. Um diagrama de dispersão é um conjunto de pontos em um plano cujas duas coordenadas Cartesianas (x e y) são os valores de cada membro do par de dados. Um gráfico de dispersão normalmente assume a forma de uma variável explicativa (no eixo horizontal x) plotada contra uma variável de resposta (no eixo vertical y), o qual permite uma análise dos dados no que se refere à ocorrência de possíveis tendências, sendo lineares ou não, possibilitando a identificação da relação linear entre duas variáveis; agrupamentos de uma ou mais variáveis; espalhamento de uma variável em relação à outra; e verificar a ocorrência de valores discrepantes (MOORE, 2007) (ASUERO *et Al.*, 2007). Contudo, mesmo com o gráfico de dispersão fornecendo evidências sobre uma relação linear entre duas variáveis, são necessários coeficientes para a quantificação do grau de relacionamento entre as variáveis analisadas, chamados de coeficientes de correlação. Em termos de álgebra linear, podemos pensar nesses relacionamentos como "fórmulas de linhas retas", uma vez que descrevem exatamente as características das linhas retas em um plano bidimensional que podem variar. Na forma geral do modelo $y = \pm ax \pm b$, y é a variável dependente; a é a inclinação (y quando $x = 0$); x é a variável independente; e b é a intercepção da reta (AKOGLU, H., 2018) (MUKAKA, M. M., 2012).

A utilização de um gráfico de dispersão é capaz de fornecer, de forma visual, a relação entre duas variáveis, apresentando tais de forma linear ou não. A Figura 23 (a) ilustra um gráfico de dispersão, a qual podemos notar uma associação entre duas variáveis (x e y) que estão fortemente associadas positivamente, uma vez que para cada conjunto de coordenadas (x e y), os valores são idênticos ($x = y$; modelo linear, onde $a = 1$, relação positiva; e $b = 0$, intercepção na origem $(0, 0)$). No entanto, a associação entre duas variáveis também podem ser negativas, como ilustra a Figura 23 (b) (BOSLAUGH, S. E WATTERS, P. A., 2012).

Figura 23 – Gráfico de dispersão (associação positiva e negativa).

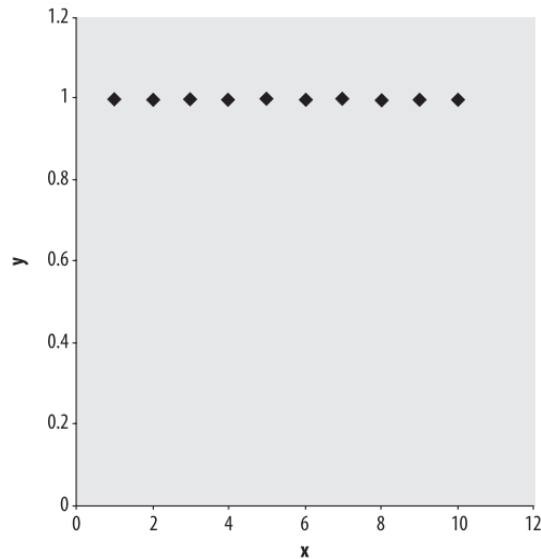


Fonte: Boslaugh, S. e Watters, P. A., 2012.

O comportamento linear em um gráfico de dispersão nem sempre representa uma analogia de relação associativa entre duas variáveis. Por exemplo, em uma situação em que um mesmo valor de y é relacionado

a cada valor possível de x (modelo linear; $\alpha = 0$), o gráfico de dispersão irá apresentar uma linha reta perfeita, porém sem representação nenhuma de associação entre as variáveis, como podemos observar na Figura 24 (BOSLAUGH, S. E WATTERS, P. A., 2012).

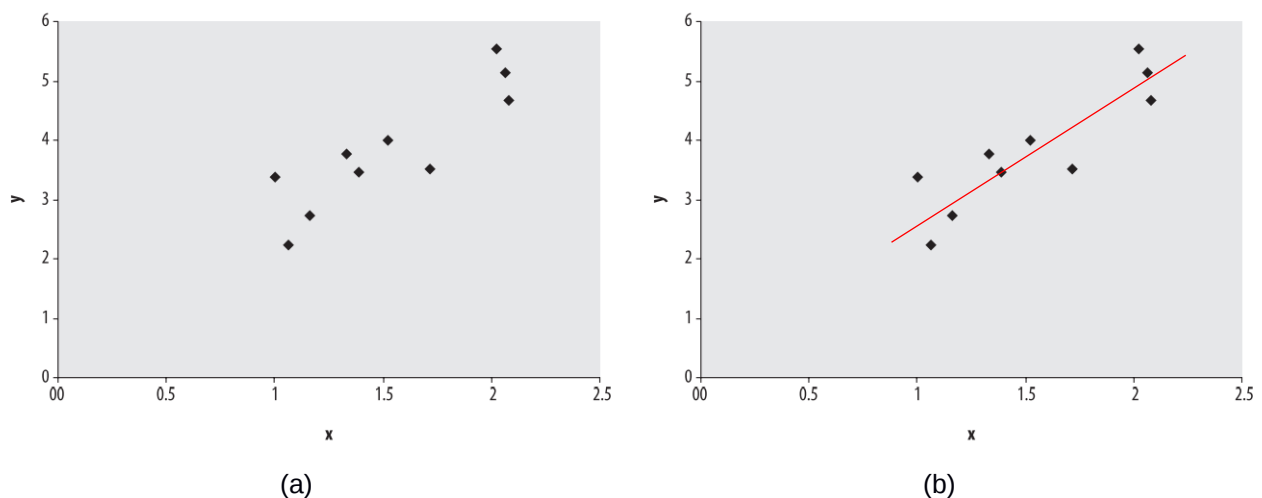
Figura 24 – Gráfico de dispersão $\alpha = 0$.



Fonte: Boslaugh, S. e Watters, P. A., 2012.

Em aplicações práticas, normalmente as medições realizadas apresentam informações as quais não apresentam um comportamento totalmente linear, podendo conter alguns erros aleatórios ou variações características do âmbito aquistado. Esses erros são capazes de ofuscar a força de associação entre as variáveis quando plotadas em um gráfico de dispersão, como ilustra a Figura 25 (a). Contudo, se uma linha reta for desenhada entre os dados do gráfico de dispersão com erros, pode-se perceber uma correlação entre as variáveis relacionadas, ilustrada na Figura 25 (b) (BOSLAUGH, S. E WATTERS, P. A., 2012).

Figura 25 – Gráfico de dispersão com erros aleatórios.



Fonte: Boslaugh, S. e Watters, P. A., 2012.

Correlação é a relação mútua, que em termos estatísticos, é um método de avaliação de uma possível associação linear bidirecional entre duas variáveis contínuas (correlação positiva ou negativa entre as variáveis). A correlação é medida por um coeficiente de correlação, o qual representa a força da associação linear entre as variáveis analisadas, assumindo valores entre -1 e +1. Um coeficiente de correlação que apresenta valor igual ou próximo de zero indica a não existência de qualquer relação linear entre as variáveis avaliadas, seja ela positiva ou negativa. Por outro lado, um coeficiente de correlação com valor próximo a -1, indica uma relação linear negativa. E um coeficiente de correlação com valores próximo a +1, indica uma relação linear positiva. Quanto mais forte for a correlação, mais próximo o coeficiente de correlação chega de ± 1 (BOSLAUGH, S. E WATTERS, P. A., 2012).

Em termos estatísticos, qualquer outra forma de relação entre duas variáveis contínuas que não é linear, não é correlação (ASUERO *et al*, 2007). Existem diversos critérios de avaliação desta relação entre variáveis, alguns próprios para que seguem distribuição normal e outros para variáveis que não seguem uma distribuição conhecida. Além disso, existem também várias técnicas utilizadas para quantificar o grau de associação entre variáveis de escalas diferentes (nominal, ordinal, intervalo e razão), incluindo os coeficientes: de correlação de Pearson (r de Pearson), o de correlação de postos de Spearman (ρ de Spearman), o de correlação ponto-bisserial e o de correlação de Phi. O método comumente utilizado é o coeficiente de correlação de Pearson (BOSLAUGH, S. E WATTERS, P. A., 2012) (MUKAKA, M. M., 2012) (AKOGLU, H., 2018).

O coeficiente de Pearson, também chamado de coeficiente de correlação produto-momento ou de “ r de Pearson” é utilizado para medir o grau de correlação entre duas variáveis quantitativas, representado por r valores entre -1 e 1 (em dados correlacionados, a mudança na magnitude de 1 variável está associada a uma mudança na magnitude de outra variável) e utilizado para dados normalmente distribuídos em conjunto de dados que seguem uma distribuição normal. A Equação 6 a seguir mostra a fórmula do coeficiente de correlação de r Pearson; para uma correlação entre variáveis, x_i e y_i são os valores de x e y para o i -ésimo valor (ASUERO *et al*, 2007) (SUBRAMANIAN, A.; SILVA, L. B. e COUTINHO, A. S., 2007) (MUKAKA, M. M., 2012).

$$r = \frac{\text{COV}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} =$$

$$r = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}} = \quad (6)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Sendo,

$\text{COV}(x, y)$ é a covariância

σ_x é o desvio padrão de x

σ_y é o desvio padrão de y

n é o número de observações da amostra

$\bar{x}$ é a média aritmética de x

$\bar{y}$ é a média aritmética de y

Segundo (ASUERO *et. Al*, 2007) e (SCHOBBER *et. Al*, 2018) um coeficiente satisfatório depende do propósito do qual deve ser utilizado e da natureza dos dados brutos. O coeficiente de correlação é interpretado conforme os seus valores entre -1 e +1; em (ASUERO *et. Al*, 2007), o coeficiente de correlação é descrita por “pouca ou nenhuma”, “baixa”, “moderada”, “alta” e “muito alta”. Enquanto em (SCHOBBER *et. Al*, 2018), o coeficiente recebe descrições como relacionamento apresentado na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10 – Interpretação convencional do coeficiente de correlação r .

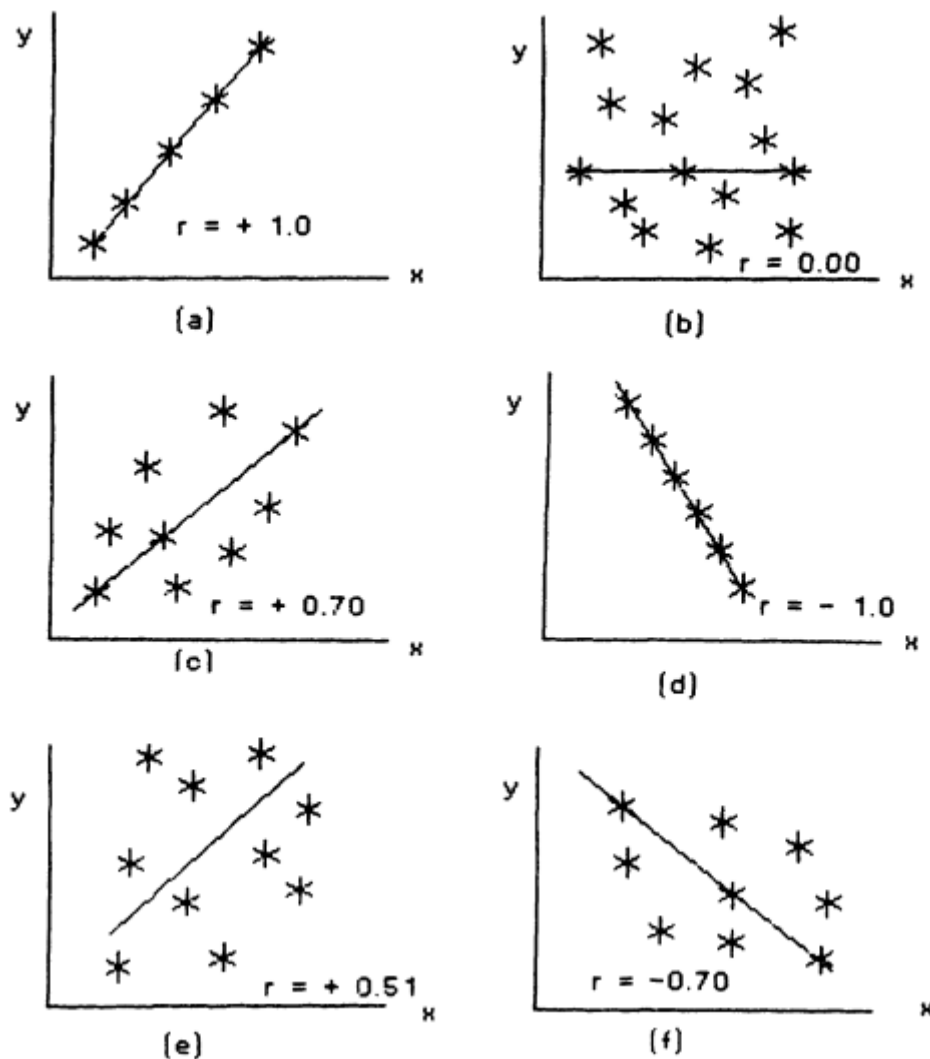
Força de associação	Coeficiente r	
	Positivo	Negativo
Correlação insignificante	0,00 a 0,10	0,00 a -0,10
Correlação fraca	0,10 a 0,39	-0,10 a -0,39
Correlação moderada	0,40 a 0,69	-0,40 a -0,69
Correlação forte	0,70 a 0,89	-0,70 a -0,89
Correlação muito forte	0,90 a 1,00	-0,9 a -1,00

Fonte: Schober *et. Al*, 2018.

A utilização de gráficos de dispersão na análise do coeficiente de correlação r torna-se uma ferramenta útil para a avaliação de uma existente associação entre as variáveis analisadas. A Figura 26 ilustra uma análise de correlação entre duas variáveis x e y utilizando um gráfico de dispersão. A Figura 26 (a) ilustra a dispersão de dados correspondente a uma correlação perfeitamente positiva com $r = 1$, a qual pode-se notar uma distribuição linear perfeita entre as variáveis. Em (d), pode-se notar o mesmo comportamento de correlação linear, porém na direção negativa ($r = -1$). No mundo real, a disposição dos dados não apresentam um comportamento estreitamente linear, como ilustra (c), (e) e (f), com respectivos coeficientes $r = 0,70$, $r = 0,51$ e $r = -0,70$. Um comportamento não linear entre as variáveis é ilustrado em (b), onde os dados são dispersos formando um círculo (TAYLOR, R., 1990).

O coeficiente de correlação r apenas fornece uma indicação sobre a direção (positiva ou negativa) e a força de relação entre as variáveis, não informando diretamente a proporção da variação em uma variável em relação a outra. Para a análise da proporção da variação de y , que é explicada pela variável x , é utilizado o coeficiente de determinação r^2 (BOSLAUGH, S. E WATTERS, P. A., 2012).

Figura 26 – Exemplo de valores do coeficiente de correlação de Pearson.



Fonte: Taylor, R., 1990.

O coeficiente de correlação r pode ser avaliado por meio do t estatístico (estatística de teste). Por exemplo, se houver uma relação entre duas variáveis em uma população (ρ), pode-se comprovar por meio de teste hipóteses: $H_0: \rho = 0$; $H_1: \rho \neq 0$, utilizando o t estatístico, estimando o r (dados amostrais). Obtendo a correlação entre as variáveis na população, utilizando um coeficiente amostral, devemos nos perguntar se o valor retornado pelo coeficiente de correlação de Pearson ocorreu por acaso ou por uma determinada probabilidade daquela associação. Dessa forma, deve-se testar se o coeficiente de correlação resultante é igual a zero ou diferente (OBILOR, E.I e AMADI, E., 2018). A Equação 7 a seguir mostra a estatística de teste, em que t é a distribuição t de Student (distribuição de probabilidade estatística) com $n - 2$ graus de liberdade (supondo que a distribuição dos dados é normal bivariada).

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \quad (7)$$

4.8 Considerações Parciais

Nesse capítulo foram apresentados os componentes do sistema proposto, abordando os sensores específicos utilizados, os quais envolvem circuitos de condicionamento de sinais para as sondas dos parâmetros pH, oxigênio dissolvido (OD), sólidos totais dissolvidos (TDS) e turbidez; microcontrolador, o qual é utilizado o ESP-32 para realizar as leituras analógicas dos sensores e módulo SIM800L GSM/GPRS, para realizar o envio das informações para um servidor através da internet, utilizando o método GET de requisições HTTP. Além de apresentar o coeficiente de correlação de Pearson, utilizado para a análise de associação entre variáveis.

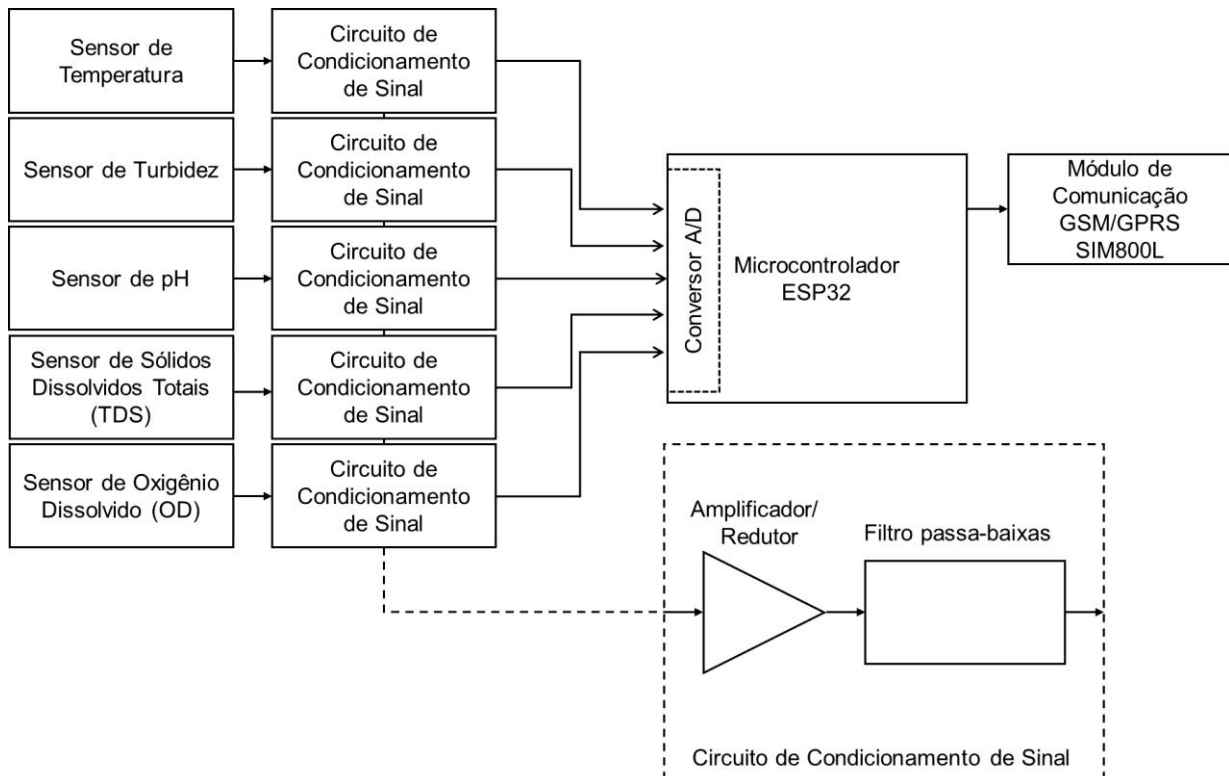
O conhecimento sobre as características de cada componente que compõem o sistema, desde a especificação dos sensores à técnica utilizada para a análise de correlação dos parâmetros monitorados, permite um melhor entendimento sobre qual circuito deve ser utilizado para adequação dos sinais provindos dos sensores e quais recursos são adequados (servidores e aplicações) podem ser utilizados para a realização das leituras, processamento, transmissão, armazenamento e visualização dos dados. Nesse contexto, o capítulo seguinte aborda a construção do protótipo experimental, detalhando cada aspecto que compõe o sistema de monitoramento proposto.

5 PROTÓTIPO EXPERIMENTAL

Nesse capítulo serão apresentadas as etapas experimentais realizadas no desenvolvimento do sistema proposto.

Cada sensor que compõem o sistema de monitoramento proposto possui um circuito para adequação dos sinais analógicos. A Figura 27 ilustra o diagrama de blocos do sistema para a aquisição dos sinais dos sensores.

Figura 27 – Diagrama de blocos do sistema de aquisição.



Fonte: Autor, 2020.

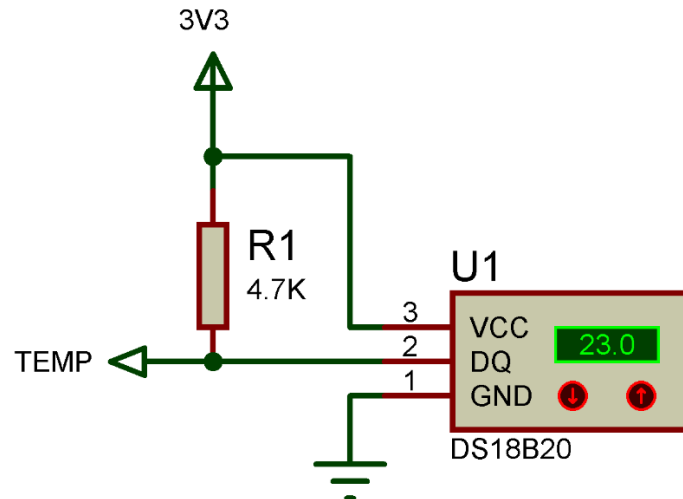
5.1 Circuitos Eletrônicos Implementados

Para a adequação dos sinais obtidos pelos sensores, o condicionamento de sinal é aplicado. O microcontrolador ESP32 tem tensão de trabalho de 3,3V e os sinais analógicos obtidos dos sensores terão variação de 0 a 5V (máximo). Cada sensor utilizado tem um circuito de adequação dos sinais, o qual são dispostas nas placas interfaces adquiridas junto aos sensores.

5.1.1 Adequação do Sensor de Temperatura

O sensor de temperatura DS18B20 utilizado requer um resistor de 4,7kΩ na configuração *pull-up*. A Figura 28 ilustra o circuito do sensor de temperatura digital DS18B20.

Figura 28 – Condicionamento do sinal do sensor de temperatura.



Fonte: Autor, 2020.

O TEMP indica a saída do sinal de temperatura, o qual é ligado ao microcontrolador.

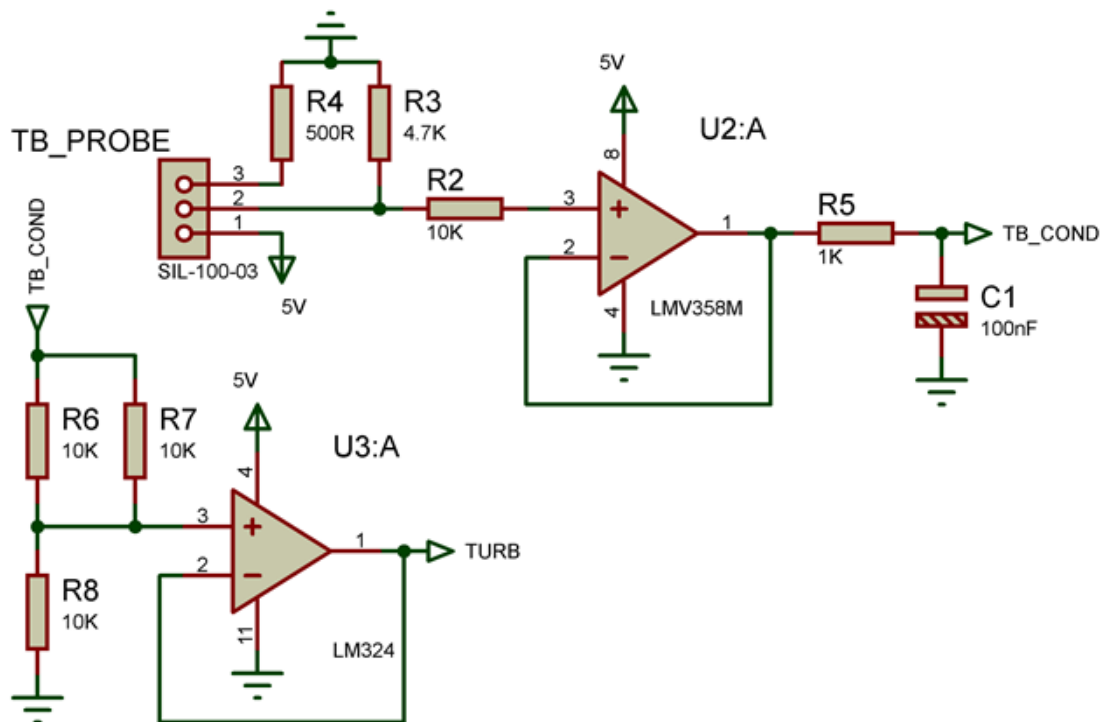
5.1.2 Adequação do Sensor de Turbidez

Antes do circuito de condicionamento de sinal proposto, o fabricante do sensor de turbidez apresenta um circuito para adequação da sonda óptica a leituras analógicas, contendo um amplificador operacional LMV358M como seguidor de tensão (*buffer*) e um filtro para ruídos.

No condicionamento proposto no trabalho, o amplificador LM324 na configuração *buffer*, fornece um circuito com uma impedância de entrada alta, garantindo tensão suficiente para a carga (microcontrolador), ocasionando em um ganho de potência. Os resistores R5 e R6 simulam um resistor com valor de 5k Ω , pois resistores de 10k Ω são facilmente encontrados no mercado atual.

Na Figura 29 a seguir pode-se observar o circuito de adequação disponibilizado pelo fabricante e o circuito de condicionamento de sinal proposto para aquisição com o microcontrolador.

Figura 29 – Condicionamento do sinal do sensor de turbidez.



Fonte: Autor, 2020.

Conforme os esquemas, TB_PROBE indica a entrada do sensor óptico ao circuito de adequação do fabricante, TB_COND indica a entrada e o TURB indica a saída do circuito de condicionamento de sinal proposto, o qual é ligado ao microcontrolador. De acordo com o circuito do fabricante, o fluxo de corrente presente no receptor do sensor óptico causará uma queda de tensão no resistor R3, proporcionalmente à intensidade de luz recebida, e então é ligada a entrada não inversora do amplificador operacional LMV358M. Ao sinal de saída do amplificador operacional, um filtro passa-baixa RC é utilizado para frequência de corte à 1,6kHz.

O sensor de turbidez SKU-SEN0189 apresenta tensão de saída de 0 à 5,0 V e para que a aquisição seja efetuada pelo microcontrolador, a adequação do sinal deve ser aplicada utilizando o condicionamento de sinal. A Equação 8 mostra o cálculo utilizado para adequação do sinal do sensor.

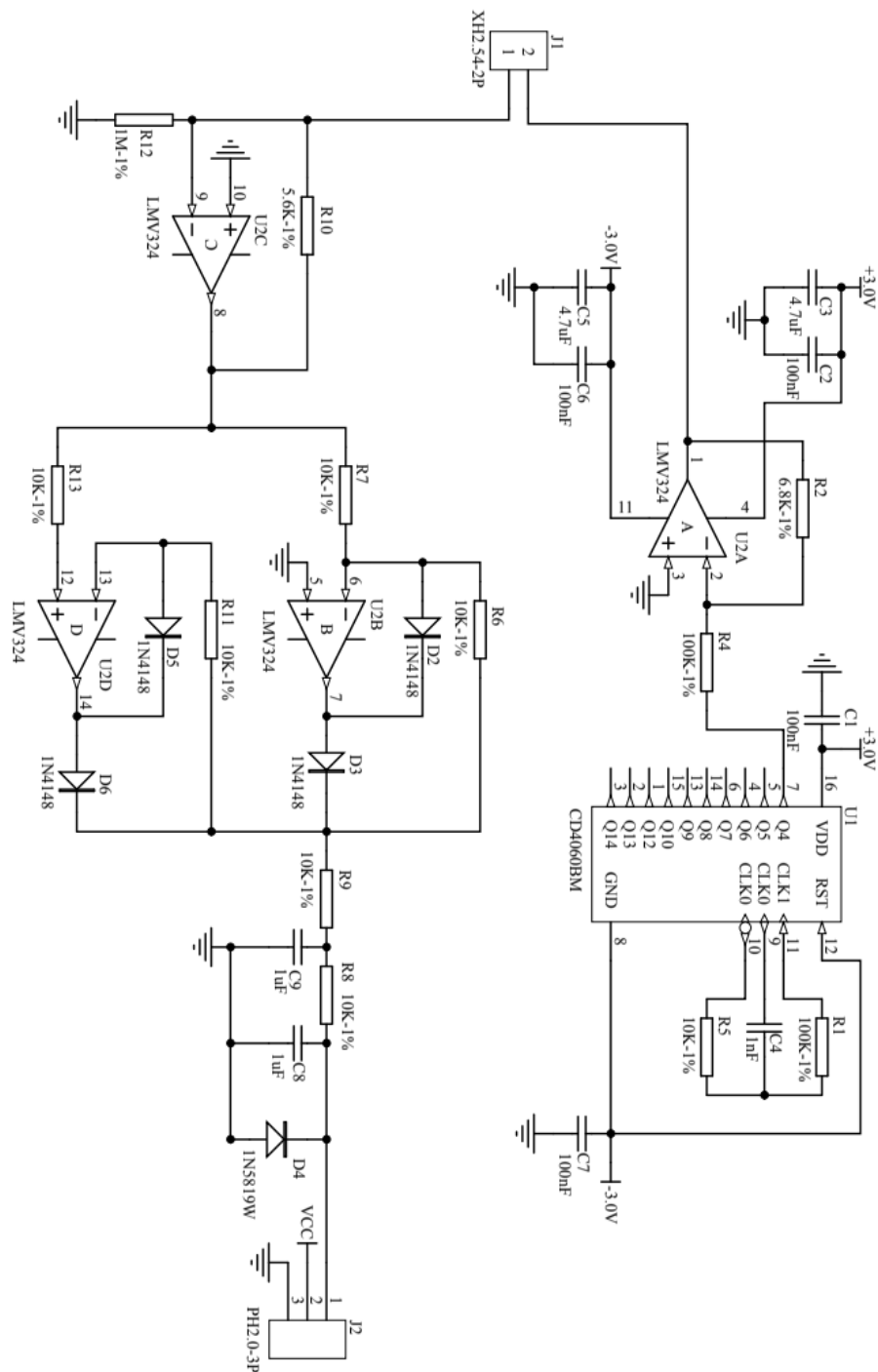
$$V_{out} = \frac{R7}{R7 + ((R5 + R6)/2)} \times V_{in} = \frac{10 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-3} + 5 \times 10^{-3}} \times 5 = 3,33V \quad (8)$$

5.1.3 Adequação do Sensor de Sólidos Totais Dissolvidos (TDS)

Na aquisição do sensor de Sólidos Dissolvidos Totais (TDS) são adquiridos também conectores e uma placa para interface para sistemas embarcados, contendo um circuito para adequação do sinal para saída analógica de 0 a 2,3V. A Figura 30 ilustra o circuito de adequação do sinal do sensor de TDS, presente na placa de interface. Dessa forma, com a sonda de TDS adequada por meio do circuito, o sinal é diretamente

conectado ao microcontrolador. A entrada da sonda é indicada pela conexão J1 e a saída para o microcontrolador é indica pela conexão J2 do circuito.

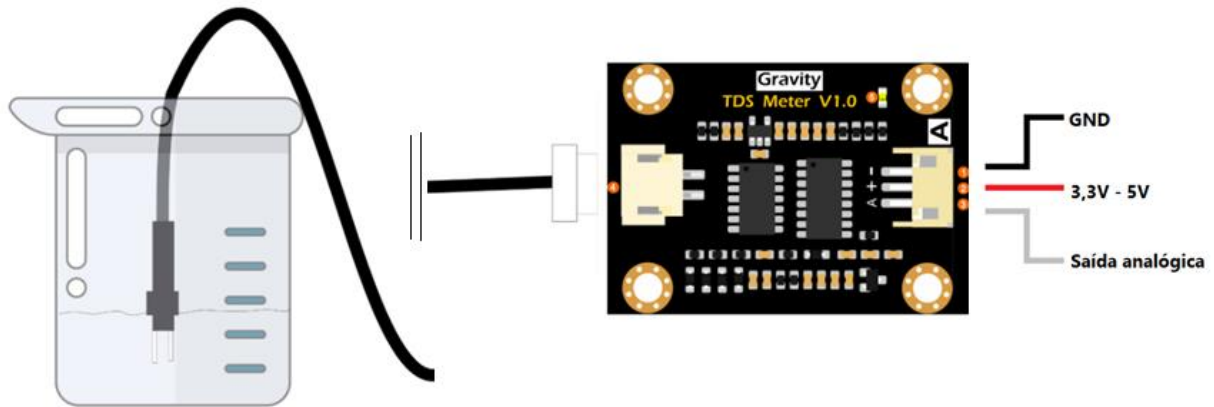
Figura 30 – Condicionamento do sinal do sensor de Sólidos Totais Dissolvidos (TDS).



Fonte: DFRobot, 2019.

A Figura 31 ilustra a placa com circuito impresso para interface com sistemas embarcados da sonda de TDS.

Figura 31 – Placa com circuito impresso da sonda de TDS.

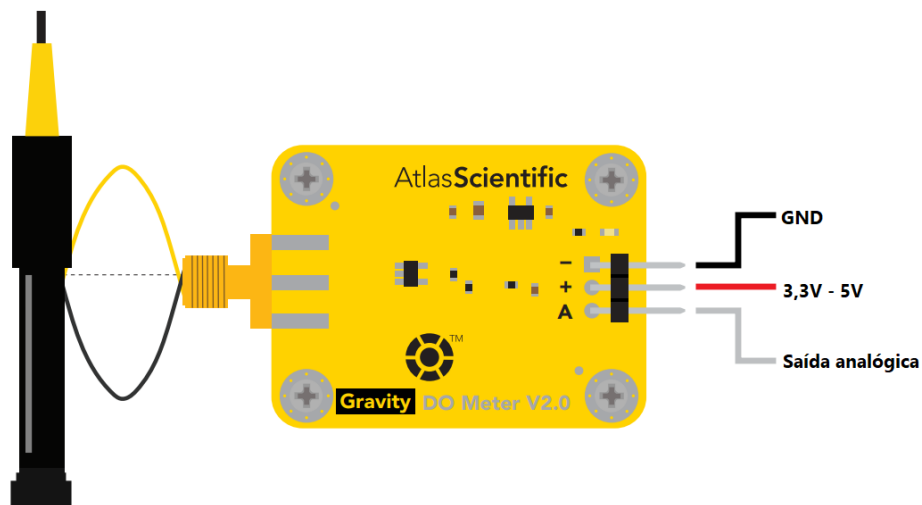


Fonte: DFRobot, 2019.

5.1.4 Adequação do Sensor de Oxigênio Dissolvido (OD)

Assim como o sensor de TDS, o sensor de OD também contém uma placa de interface com um circuito de adequação do sinal. Porém, o esquema do circuito não foi disponibilizado pelo fabricante. A Atlas Scientific® apresenta uma tecnologia com patente, utilizando as placas Gravity® de interface com seus sensores. A Figura 32 a seguir ilustra a placa com o circuito de adequação do sinal do sensor de OD.

Figura 32 – Placa com circuito impresso do sensor de OD.

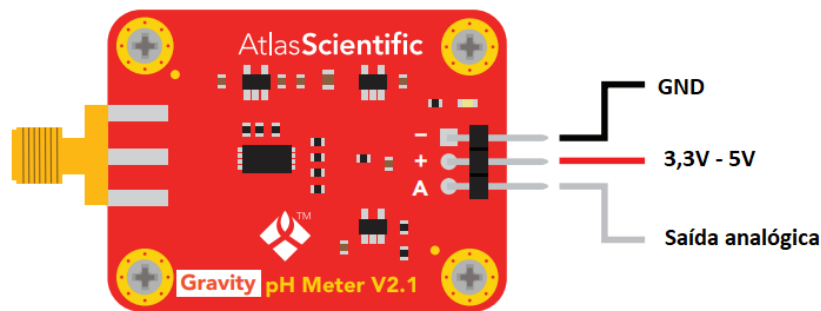


Fonte: Modificado de Atlas Scientific®, 2015.

5.1.5 Adequação do Sensor de pH

Assim como o sensor de OD, o sensor de pH também contém uma placa de interface com um circuito de adequação do sinal (placa Gravity®), também com o esquema do circuito não disponibilizado pelo fabricante. A Figura 33 a seguir ilustra a placa com o circuito de adequação do sinal do sensor de OD.

Figura 33 – Placa com circuito impresso da mini sonda de pH.



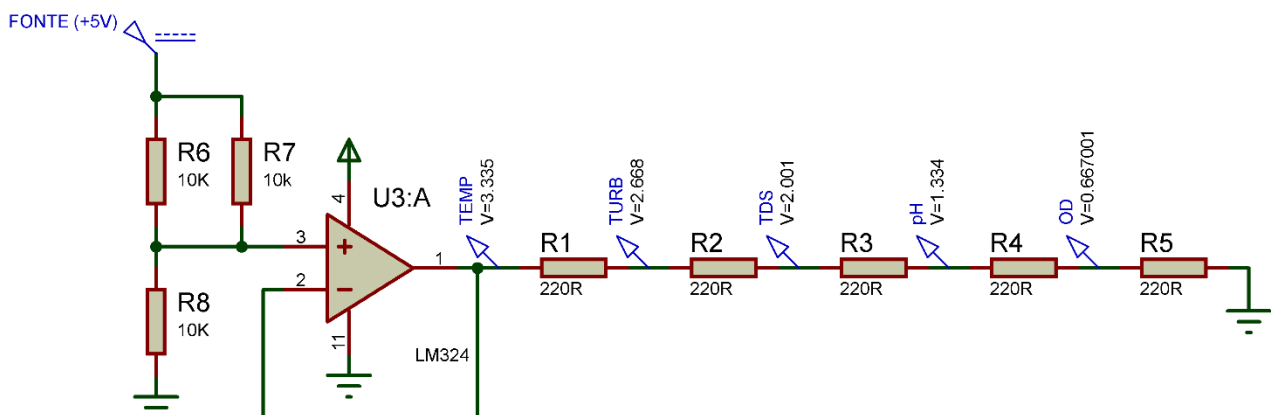
Fonte: Modificado de Atlas Scientific ®, 2015.

5.1.6 Microcontrolador ESP32

O microcontrolador ESP32 possui dois canais com conversores analógico-digital (ADC), quais utilizam os seguintes periféricos: i) ADC1: pinos 36, 39, 34, 35, 32 e 33 e ii) ADC2: pinos 25, 26, 27 e 15. Para o sistema proposto foram utilizados, para aquisição dos sinais dos sensores, os pinos P36, P39, P34, P35 e P32, aos quais foram conectados, respectivamente, os sensores de TDS, turbidez, pH, temperatura e OD.

Para a validação da adequação e aquisição dos sinais, um circuito é proposto para a simulação no *software* Proteus ®. De uma forma genérica, a simulação apresenta um circuito com uma fonte de 5V, ao qual passa por uma adequação do sinal para a tensão de 3,3V (tensão máximo suportada pelo microcontrolador). Dessa forma, podemos simular os possíveis valores aquisitados pelo microcontrolador de cada sonda ou sensor. A Figura 34 a seguir mostra a simulação dos valores para aquisição dos sinais, a qual podemos observar que, para cada sensor específico, um valor de tensão é gerado, simulando assim seu sinal.

Figura 34 – Simulação dos sinais dos sensores.



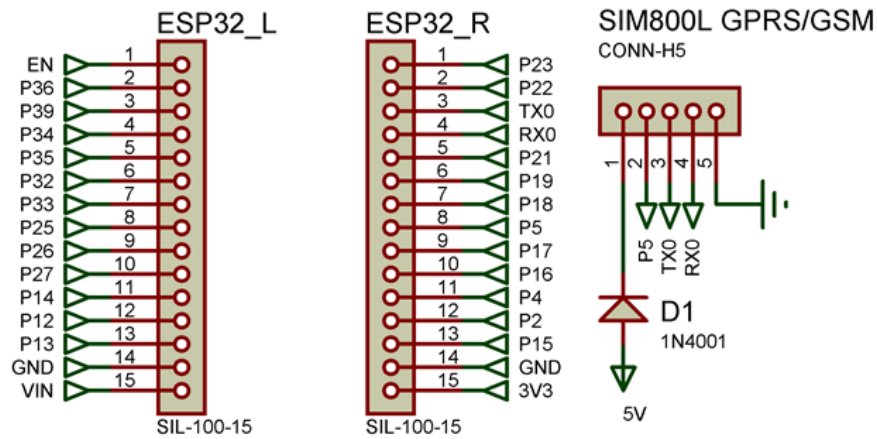
Fonte: Autor, 2019.

5.1.7 Módulo de Comunicação

O módulo SIM 800L GPRS/GSM utiliza a comunicação Serial por meio dos pinos TX (Transmissão) e RX (Recepção). Para a alimentação correta do módulo, que trabalha com tensão de 4,7V, um diodo é utilizado

para promover uma queda de tensão quando polarizado no sentido direto. Esta queda que varia entre 0,6 e 0,75 V, a qual depende da corrente. A Figura 35 ilustra o circuito de conexão do ESP32 com o módulo GPRS/GSM.

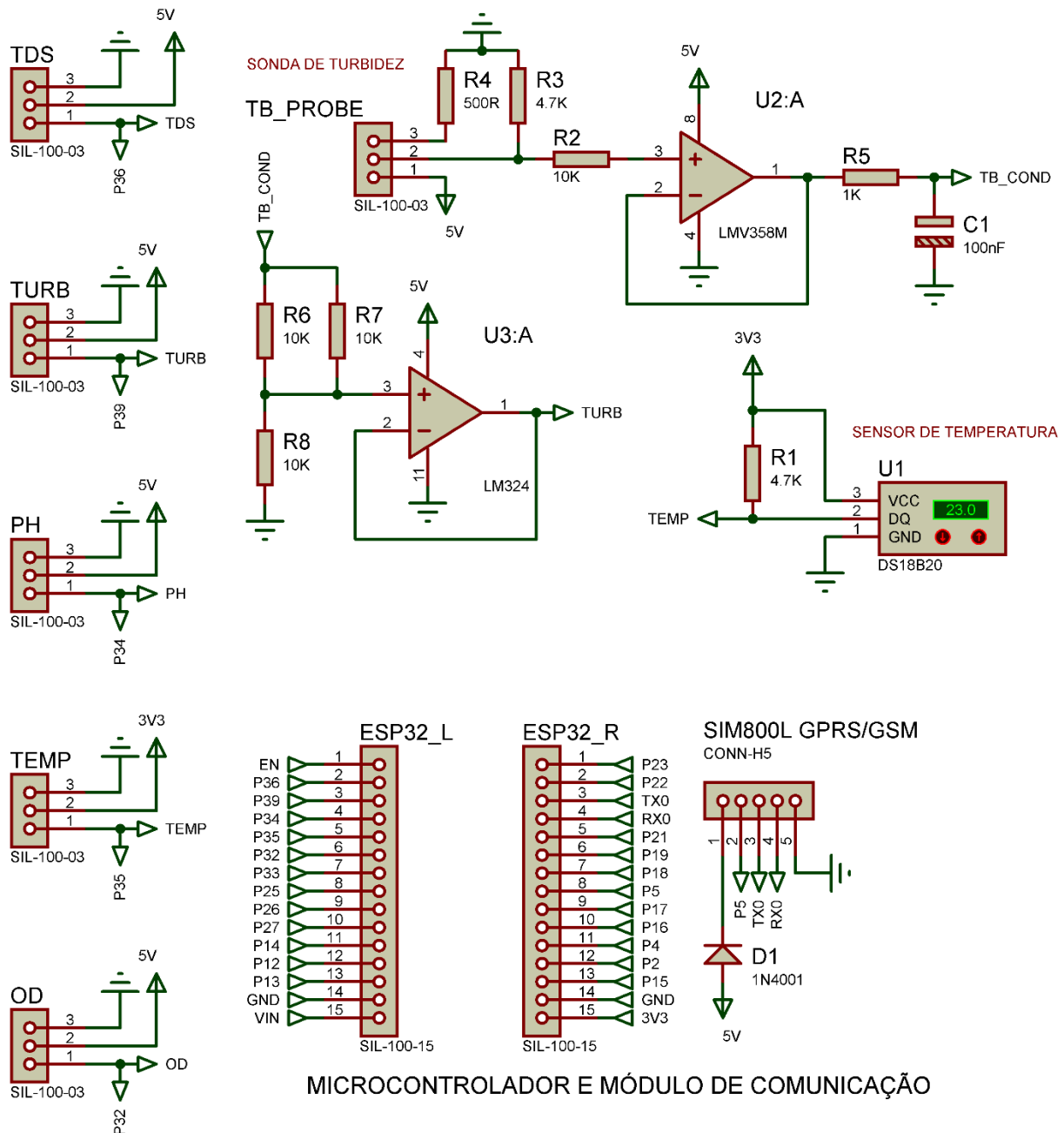
Figura 35 – Circuito ESP32 com módulo SIM800L GPRS/GSM.



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 36 a seguir ilustra o esquema do sistema proposto, apresentando conexões para sondas, placas de circuito integrado dos fabricantes, microcontrolador e módulo de comunicação.

Figura 36 – Esquema do sistema eletrônico proposto.



Fonte: Autor, 2019.

5.2 Sistema de Processamento implementado

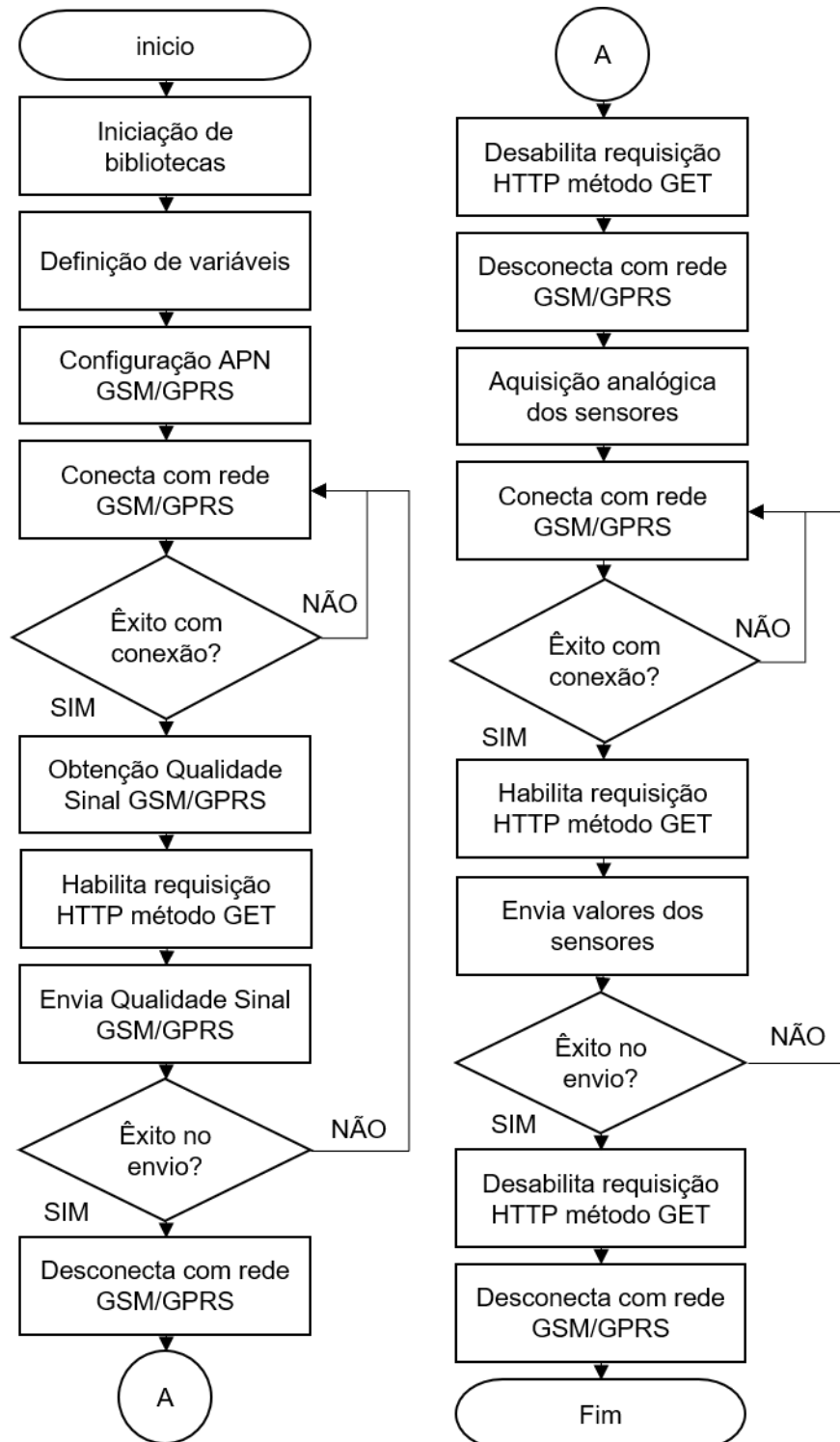
O microcontrolador ESP32, utilizando os dois canais com os conversores (ADC1 e ADC2), realiza leituras analógicas dos parâmetros e sensores definidos para o monitoramento. Após a realização das leituras, o microcontrolador utiliza uma URL com as informações dos sensores e as envia via Internet, por meio do protocolo HTTP e do método GET. A conexão com a Internet é possível utilizando o módulo SIM800L GPRS/GSM e um *chip* com disponibilidade de pacote de dados. O *firmware* utiliza a interface de desenvolvimento IDE Arduino. Para que o microcontrolador se conecte a rede GSM/GPRS, o mesmo depende de bibliotecas específicas. A biblioteca utilizada no desenvolvimento do sistema é a TinyGSM. A

TinyGSM é uma biblioteca de módulos GSM de código aberto, disponível no Github. Nesse trabalho, o sistema utiliza o módulo HTTP Client fornecido pela biblioteca. O HTTP Client é utilizado para enviar e receber mensagens HTTP, bem como requisições (*HTTP Request Message*) e respostas (*HTTP Response Message*).

Para a conexão com a Internet, o módulo SIM800L requer um *chip* com disponibilidade de pacotes de dados para o envio de requisições via protocolo HTTP. Na configuração das variáveis do microcontrolador ESP32, devem ser definidas a APN de acesso, usuário (USER) e senha, pré-requisitos para funcionalidade da rede GPRS/GSM. A APN é a configuração para acesso à internet, funcionando como uma chave de segurança para o dispositivo coletar as informações da rede de dados. Sem tal configuração, o dispositivo não é capaz de se conectar à Internet. Cada operadora de celular fornece uma APN, usuário (USER) e uma senha de acesso diferente. Dessa forma, com a APN configurada, o dispositivo é capaz de se conectar à Internet de prover de requisições via HTTP.

Além disso, a biblioteca TinyGSM fornece comandos pré-definidos e úteis, como a função `getSignalQuality`. Tal função disponibiliza a qualidade de intensidade do sinal GSM/GPRS. A Figura 37 ilustra o fluxograma da rotina de execução do programa (*firmware*), desenvolvido para o ESP32.

Figura 37 – Fluxograma da rotina de execução ESP32.

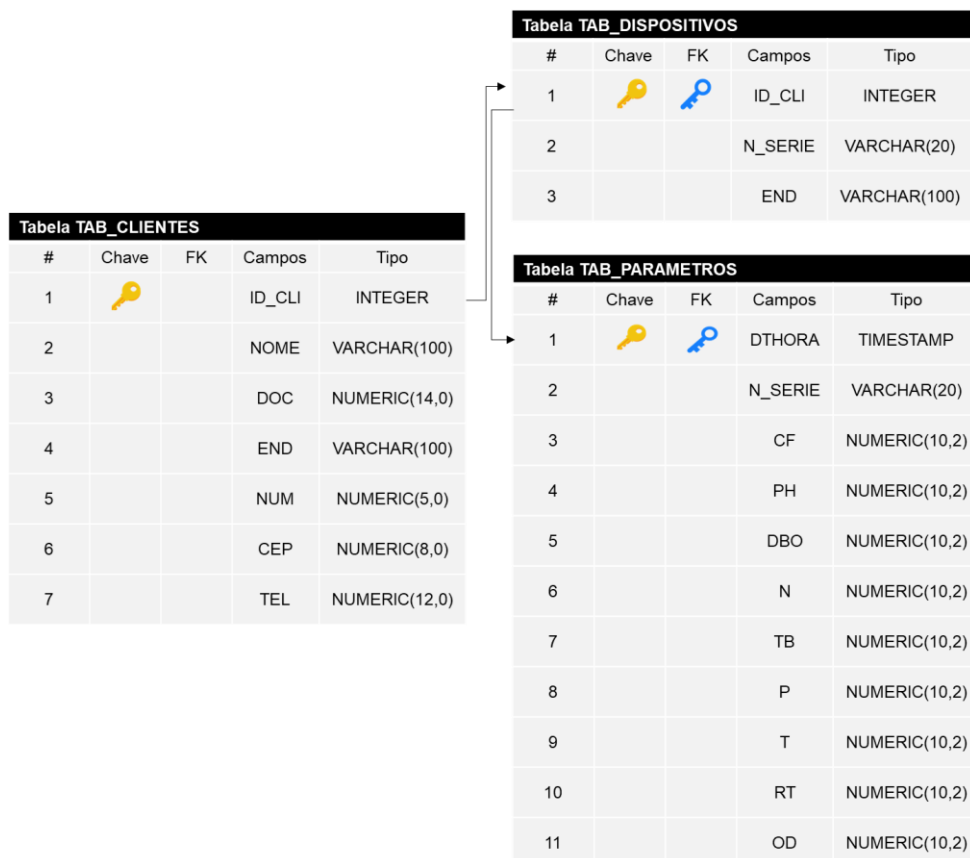


Fonte: Autor, 2019.

5.3 Desenvolvimento dos Bancos de Dados

Os bancos de dados de ambas aplicações apresentam a mesma estrutura, compostos por três tabelas: Tabela para cadastro de usuários (TAB_CLIENTES); Tabela para cadastro dos dispositivos (TAB_DISPOSITIVOS) e uma tabela para as informações dos parâmetros monitorados (TAB_PARAMETROS). A tabela TAB_CLIENTES apresenta campos relacionados às informações pessoais do usuário (cliente) do sistema, como nome, documento, endereço e etc. Cada usuário cadastrado possui uma identificação (ID_CLI), utilizado no banco como chave primária. Ou seja, com a chave primária, cada usuário possui um único ID e nunca é repetido. A tabela TAB_DISPOSITIVOS possui as informações dos dispositivos (*hardware*). Possui campo N_SERIE (Número de Série) para a identificação do dispositivo; Campo para a identificação do local de instalação do sistema (END) e campo utilizado para identificar a qual cliente tal dispositivo pertence (ID_CLI). O campo ID_CLI é utilizado como chave estrangeira (FK), uma vez que é utilizada na tabela TAB_CLIENTES. Dessa forma, com o uso na chave estrangeira, é possível o vínculo das informações contidas na tabela TAB_CLIENTES com a tabela TAB_DISPOSITIVOS. Por fim, a tabela TAB_PARAMETROS contém os campos relacionados aos parâmetros monitorados, data e hora (DTHORA) e o número de série do dispositivo (E_SERIE). O campo DTHORA é utilizado como chave primária, tendo em vista que nunca uma informação deve ser armazenada no banco com mesma data e hora. Da mesma forma que o campo ID_CLI foi utilizado como chave estrangeira, o campo N_SERIE é utilizado na tabela TAB_PARAMETROS, criando um vínculo com as informações contidas em TAB_DISPOSTIVOS. A Figura 38 ilustra a arquitetura do banco de dados Firebird.

Figura 38 – Arquitetura banco de dados Firebird.



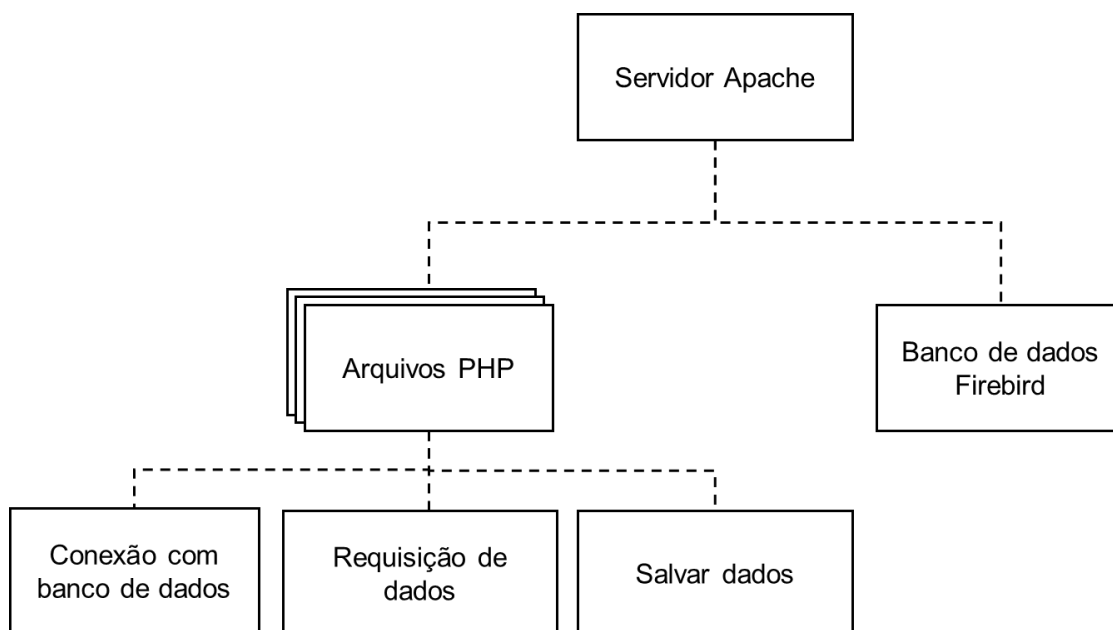
Fonte: Autor, 2019.

5.4 Desenvolvimento do Servidor

Para o envio de dados da arquitetura de coleta (sensores) para o servidor, são utilizadas requisições por meio do método GET, através de arquivos desenvolvidos em linguagem de programação PHP. Os arquivos em PHP utilizados apresentam as seguintes funcionalidades: i) Conexão com o banco de dados local (Firebird); ii) Busca no banco de dados e iii) Gravação no banco de dados. A conexão com o banco de dados Firebird permite a manipulação de tais informações no banco de dados, o funcionamento da busca e gravação dos dados no mesmo.

Para o funcionamento da transmissão de dados ao servidor e armazenamento dos mesmos ao banco de dados, um servidor HTTP deve ser instalado. O servidor Apache (servidor HTTP) é um servidor de Internet, tendo como funcionalidade manter conteúdos na Internet, sendo imprescindível sua utilização. Neste trabalho, a função do Apache é manter os conteúdos localmente e remotamente disponíveis, permitindo o armazenamento, requisições por meio do protocolo HTTP e a visualização dos dados. O servidor Apache é instalado no servidor CentOS. A Figura 39 ilustra a estrutura do servidor CentOS, com seus respectivos serviços de *web* (Apache), arquivos do PHP e banco de dados Firebird.

Figura 39 – Estrutura dos arquivos PHP.



Fonte: Autor, 2020.

5.5 Desenvolvimento do Aplicativo

O objetivo do aplicativo é fornecer uma plataforma simples e eficaz para o monitoramento dos parâmetros de qualidade das águas. O aplicativo é composto por duas telas: i) tela principal: são mostrados os últimos dados coletados pelo sistema, apresentando os valores dos parâmetros monitorados; ii) tela de gráfico: é possível a visualização do comportamento do parâmetro escolhido, na última hora e histórico.

O aplicativo além de permitir a visualização dos dados dos parâmetros monitorados, é capaz de gerar notificações aos usuários quando os parâmetros apresentarem valores fora dos padrões. Ou seja, quando os parâmetros monitorados apresentarem valores que indicam uma má qualidade da água, o sistema gerará

notificações de alertas no aplicativo. Os valores que indicam os níveis ideais para cada parâmetro são estabelecidos pela CETESB e pela Portaria do Ministério da Saúde MS nº 2914, de 12 de dezembro de 2011; padrões para o controle e vigilância da qualidade da água de distribuição pública para o consumo humano. A tela principal do aplicativo mostra os valores dos parâmetros pH, TDS, Temperatura e Turbidez e suas respectivas unidades de medida. A Figura 40 ilustra a tela principal do aplicativo idealizado.

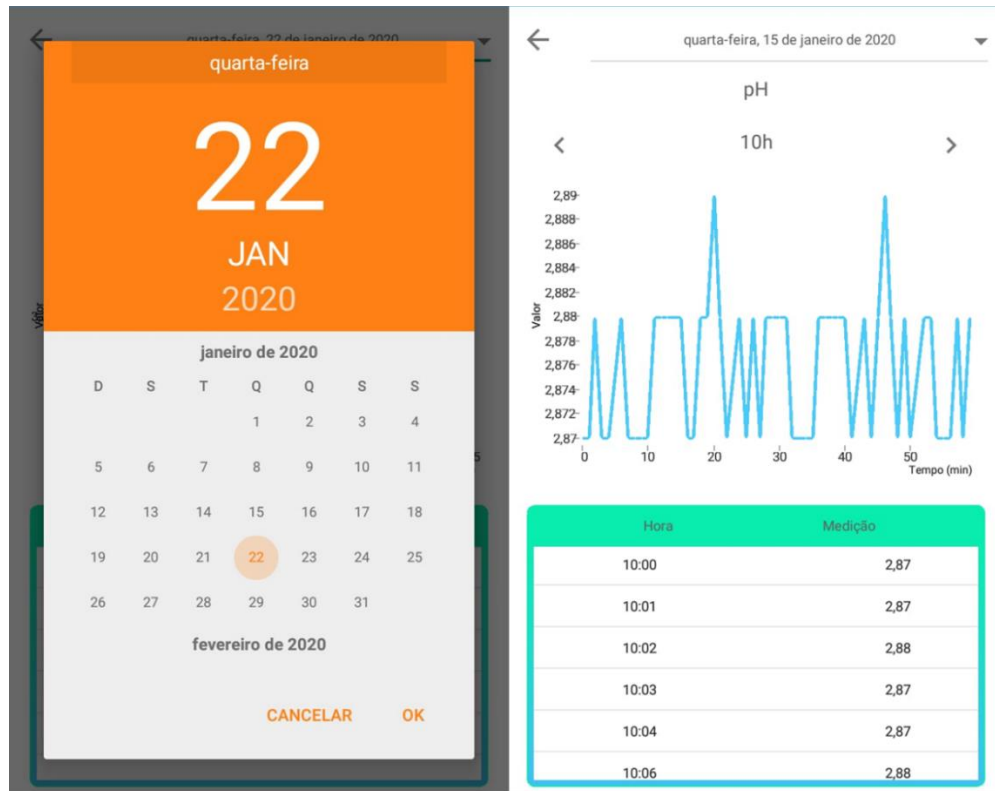
Figura 40 – Tela principal do aplicativo idealizado.



Fonte: Autor, 2020.

A tela do gráfico do aplicativo apresenta de forma gráfica, o parâmetro escolhido para visualização na tela principal, o comportamento do mesmo ao longo da última hora de coleta. Além do gráfico, são listados todos os dados coletados no dia. Na parte superior da tela de gráfico há a opção para visualização do histórico do monitoramento, a qual possui uma barra para escolha da data desejada a ser visualizada. A Figura 41 a seguir ilustra a tela de gráfico no aplicativo.

Figura 41 – Tela do gráfico do aplicativo.



Fonte: Autor, 2020.

5.6 Desenvolvimento do Sistema de Notificações

Para o encaminhamento das mensagens de notificações (*push notifications*) aos usuários por meio Firebase, uma aplicação é desenvolvida para a análise dos dados e envio das mensagens. Para que as notificações sejam geradas no aplicativo, deve-se gerar um registro no Google dos dispositivos com a aplicação instalada. Cada dispositivo móvel celular contém um token de identificação. Quando o aplicativo é instalado no dispositivo móvel, automaticamente o mesmo é submetido a um registro no Google, gerando o *token* de identificação. A Figura 42 ilustra a arquitetura do processo de registro e geração do *token*.

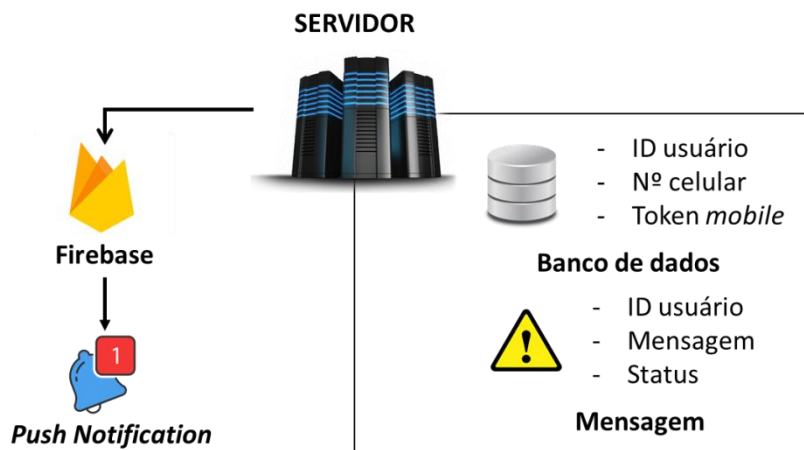
Figura 42 – Arquitetura do serviço de notificação.



Fonte: Autor, 2019.

As notificações geradas no dispositivo são apenas possíveis quando o *token* for identificado. Dessa forma, o *token* mesmo é armazenado no banco de dados junto às informações do *hardware* de monitoramento. A Figura 43 ilustra o processo de notificações do sistema.

Figura 43 – Serviço de notificação no servidor.



Fonte: Autor, 2019.

5.7 Considerações Parciais

As etapas experimentais realizadas no desenvolvimento do sistema proposto dividiram-se em: i) circuitos eletrônicos implementados; ii) sistema de processamento implementado; iii) desenvolvimento do banco de dados; iv) desenvolvimento do servidor; v) desenvolvimento do aplicativo; e vi) desenvolvimento do sistema de notificações.

Nesse capítulo foi realizado o acoplamento de cada placa de interface ao microcontrolador, o qual podemos concluir que cada sensor utilizado no sistema demanda de um circuito de adequação de sinal específico, sendo que cada parâmetro possui uma resposta em tensão individual. Todos os sinais provindos dos sensores foram adequados e condicionados para a tensão de trabalho do microcontrolador por meio das placas dos fabricantes, eliminando ruídos e permitindo as leituras analógicas e transmissão dos dados. Sem a presença desses circuitos, o microcontrolador poderia ser danificado (com tensões acima de 3,3V) ou não conseguir realizar as leituras de forma adequada, sem a utilização de amplificadores e filtros de sinais.

Além disso, podemos concluir que para o funcionamento correto, o sistema depende de recursos como servidores de *web*, bancos de dados (servidor e aplicativo), aplicativos e serviços de notificações.

Dessa forma, com as etapas experimentais concluídas, é possível a realização da análise dos resultados obtidos por meio de tais.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio dos processos experimentais realizados, bem como a análise comportamental dos sensores de cada parâmetro e do sistema de monitoramento de qualidade da água proposto como um todo.

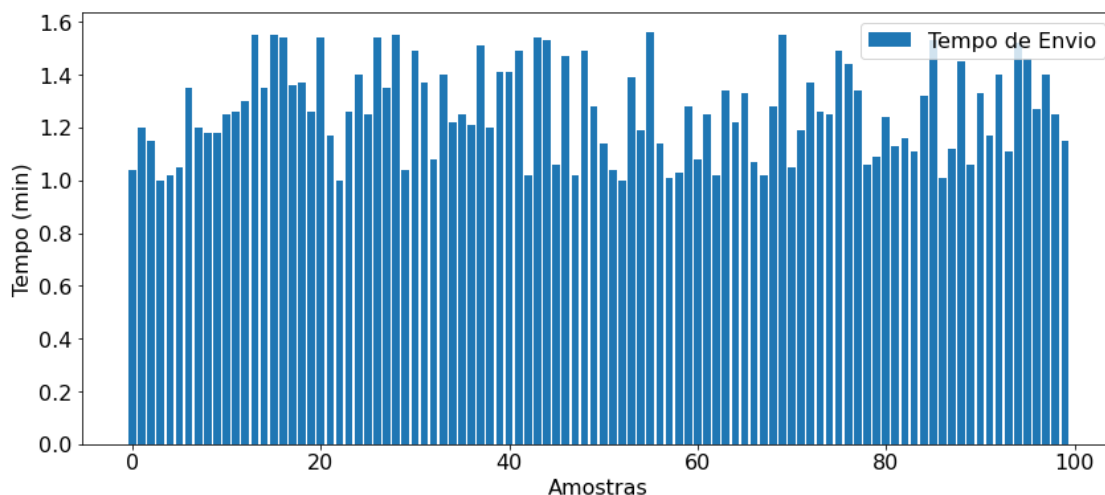
6.1 Armazenamento e Visualização dos Dados

O ESP32 possui 18 pinos, sendo 2 canais com conversores analógico-digital (ADC1 e ADC2) que possibilitam a aquisição das grandezas das sondas e sensores. Por meio das aquisições analógicas no ESP32 (ADC1 e ADC2) pudemos validar a coleta de dados com o microcontrolador.

Com a validação da aquisição dos sinais dos sensores, o envio dos dados ao servidor é realizado e consequentemente seu armazenamento no banco de dados Firebird. Com o funcionamento do servidor de internet Apache e do banco de dados Firebird, utilizamos o microcontrolador ESP32 realizando o envio dos dados coletados via rede Wi-Fi em bancada, utilizando o método de requisição GET. Porém, o ESP32 apresenta uma particularidade ao ser utilizado junto a configuração Wi-Fi. O microcontrolador quando iniciado para a configuração que utiliza o W-iFi, seu canal 2 de conversores analógico-digital (ADC2) é utilizado para a alimentação do módulo Wi-Fi, impossibilitando sua parametrização e leitura analógica. Portanto, em primeira instância, a validação do envio de dados ao servidor e armazenamento dos mesmos é realizada utilizando valores simulados pelo microcontrolador. Dessa forma, para a validação da rede R/2R e o envio dos dados para o servidor, o módulo GSM/GPRS é utilizado.

Para a validação da comunicação GPRS o microcontrolador ESP32 com o módulo GSM/GPRS utiliza leituras analógicas e envio dos mesmos de minuto em minuto ao servidor. Porém, tal validação também apresentou uma particularidade: por depender de uma APN para a conexão com a internet, o envio dos dados demandou mais de um minuto para ser realizado; período hábil à APN para permitir, enviar as informações e desabilitar a conexão. Dessa forma, os dados são armazenados com um período maior de um minuto. A Figura 44 mostra o gráfico do tempo para a realização do envio dos dados ao servidor de 100 amostras utilizando conexão GPRS. Os dados de tempo de envio foram analisados utilizando a linguagem de programação Python.

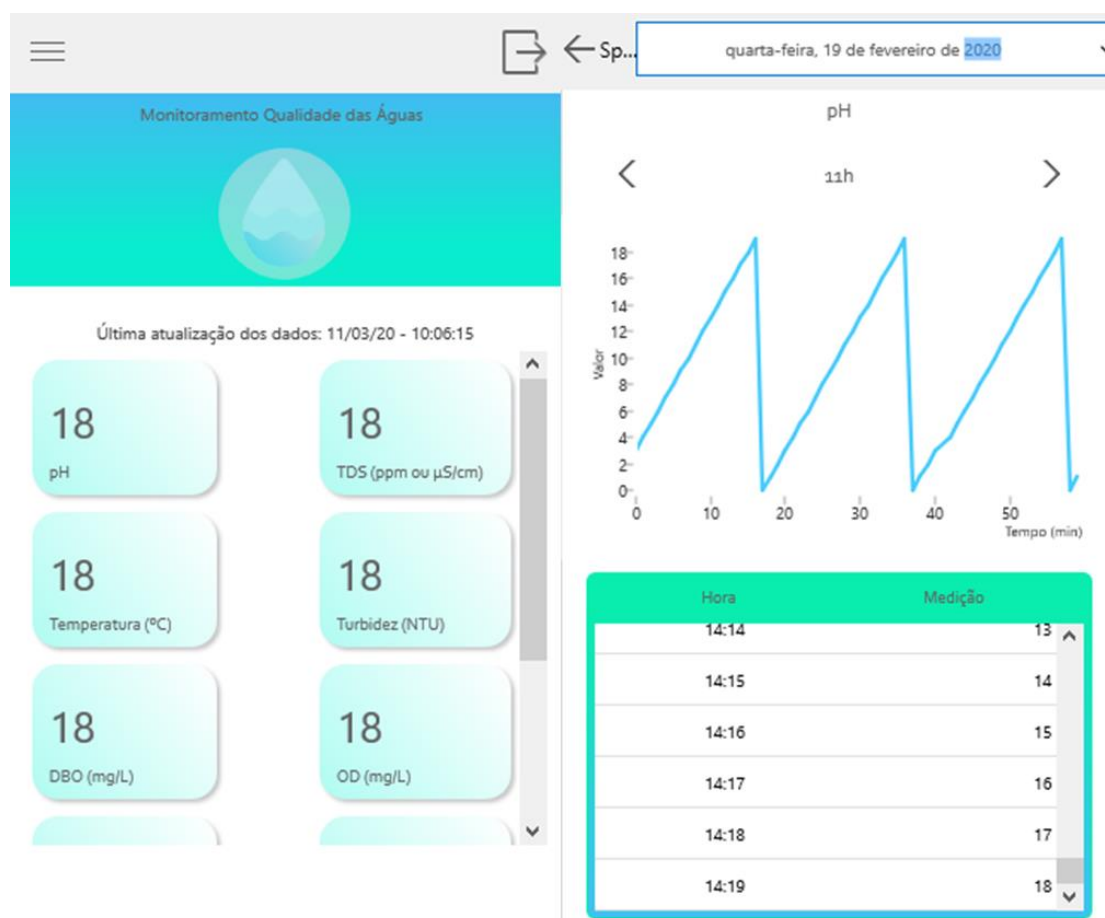
Figura 44 – Tempo para o envio dos dados utilizando conexão GPRS.



Fonte: Autor, 2020.

Para a validação do aplicativo, todos os dados enviados ao servidor foram acessados utilizando uma simulação da aplicação. Por se tratar de um ambiente de desenvolvimento de multiplataformas, o Delphi permite a simulação das aplicações desenvolvidas no ambiente do Windows. Dessa forma, o aplicativo foi simulado no Windows para a visualização das informações presentes no servidor e as apresentando de forma gráfica. Os dados simulados foram valores de 0 a 18 (escolhido de forma aleatória para a validação do sistema). A Figura 45 ilustra as telas idealizadas do aplicativo em simulação no Windows, compostas por i) a tela principal do aplicativo simulada com a aplicação no Windows, apresentando os últimos valores simulados presentes no banco de dados e ii) a tela do gráfico, que possibilita a visualização do comportamento dos valores simulados ao longo do período de 60 minutos.

Figura 45 – Simulação das telas do aplicativo idealizado.



Fonte: Autor, 2020.

6.2 Comportamento dos Sensores dos Parâmetros Monitorados

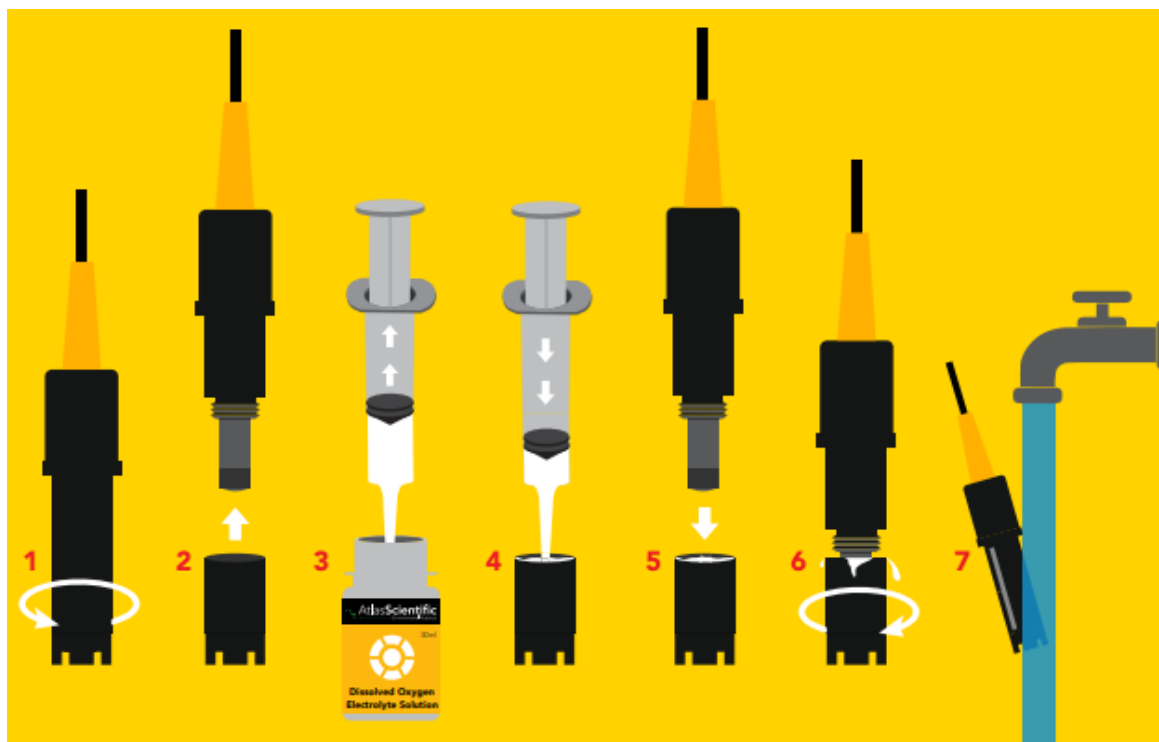
Para a análise dos parâmetros propostos, primeiramente os sensores utilizados foram submetidos a testes em bancada, bem como submetidos a calibrações. Ainda em bancada, dados dos sensores foram coletados sob condições de alteração da água amostrada, simulando possíveis alterações na qualidade da água.

6.2.1 Calibração do Sensor de Oxigênio Dissolvido (OD)

O sensor de OD é uma sonda galvânica composta por uma membrana de PTFE (Politetrafluoretileno), um ânodo banhado em um eletrólito e um cátodo. Uma vez que as moléculas de oxigênio cruzam a membrana, elas são reduzidas no cátodo e uma pequena tensão elétrica (mV) é gerada. Se nenhuma molécula de oxigênio estiver presente na sonda, a resposta em tensão da sonda será de 0 mV. Conforme a quantidade de moléculas de oxigênio aumenta, a resposta em tensão em mV da sonda também aumenta (ATLAS SCIENTIFIC®, 2015).

Para a calibração da sonda de OD é utilizada a solução eletrolítica da Atlas Scientific. A solução é composta por 70% de água (H₂O), 15% de Tetraborato de Sódio (Na₂[B₄O₅(OH)₄]·8H₂O) e 15% de Cloreto de Sódio (NaCl). Para a calibração da sonda de OD, são utilizados de 2 ml a 5 ml da solução eletrolítica. Utilizando a seringa fornecida pelo fabricante, a solução é injetada á tampa da membrana até que esteja preenchida ao topo (~ 5 ml). Após a solução ser injetada, a sonda deve ser enxaguada. A Figura 46 a seguir ilustra o processo de calibração da sonda de oxigênio dissolvido (OD).

Figura 46 – Calibração da sonda de oxigênio dissolvido (OD).



Fonte: Atlas Scientific®, 2015.

Com a realização da calibração utilizando a solução, a análise da resposta em tensão da sonda é realizada. Segundo a Atlas Scientific (2015), toda a sonda galvânica de oxigênio dissolvido irá apresentar uma resposta em tensão levemente diferente, com variação de 40 a 60 mV na atmosfera (ATLAS SCIENTIFIC®, 2015). A placa de interface Gravity™ possui um circuito amplificador, o qual apresenta um ganho de 11 vezes o valor da sonda. A Tabela 11 a seguir amostras da resposta em tensão (mV) da placa de interface Gravity™ do sensor de OD na atmosfera.

Tabela 11 – Resposta em tensão (mV) do sensor de OD.

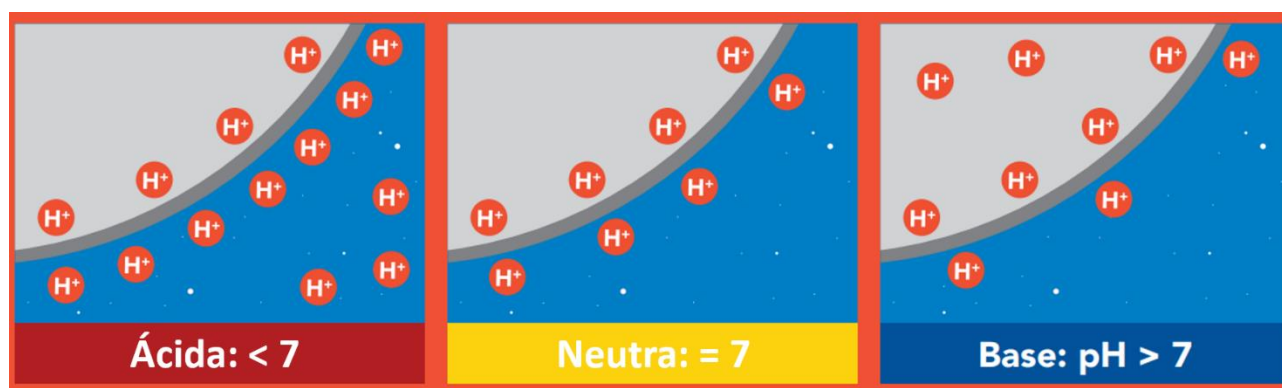
Amostra (segundos)	Tensão de aquisição (mV)	Tensão esperada (mV)
1	532	440 – 660
2	532	440 – 660
3	532	440 – 660
4	532	440 – 660
5	533	440 – 660
6	533	440 – 660
7	533	440 – 660
8	534	440 – 660
9	535	440 – 660
10	535	440 – 660

Fonte: Autor, 2020.

6.2.2 Calibração do Sensor de pH

O Sensor de pH é composto por uma membrana de vidro que permite que os íons de hidrogênio do líquido sendo medido se difundam na camada externa da membrana, enquanto os íons maiores permanecem na solução. Dessa forma, uma pequena corrente é criada com as diferenças entre a concentração de íons de hidrogênio contidas dentro da sonda e fora da sonda (ATLAS SCIENTIFIC®, 2015). Tal corrente é proporcionalmente relacionada com a concentração de íons de hidrogênio no líquido em análise (ATLAS SCIENTIFIC®, 2015). A Figura 47 a seguir ilustra as concentrações de íons de hidrogênio dentro e fora da sonda.

Figura 47 – Comportamento dos íons de hidrogênio dentro e fora da sonda de pH.



Fonte: Atlas Scientific®, 2015.

A corrente que é gerada da atividade do íon de hidrogênio pode ser prevista utilizando a Equação 9 a seguir, onde R representa a constante de gás ideal, T a temperatura em Kelvin e F é a constante de Faraday (ATLAS SCIENTIFIC, 2015®).

$$E = E^0 + \frac{RT}{F} \ln(a_{H^+}) = E^0 - \frac{2.303RT}{F} pH \quad (9)$$

Na prática, a placa de interface Gravity™ da mini sonda de pH utiliza a seguinte Equação 10 para converter o sinal de tensão em pH.

$$pH = (-5,6548 * tensão) + 15,509 \quad (10)$$

A mini sonda de pH irá medir valores de 3,00 V a 265 mV. O fabricante disponibiliza uma tabela com os valores de pH e sua resposta em tensão (V). A Tabela 12 a seguir mostra a resposta em tensão (V) e seu respectivo valor em pH.

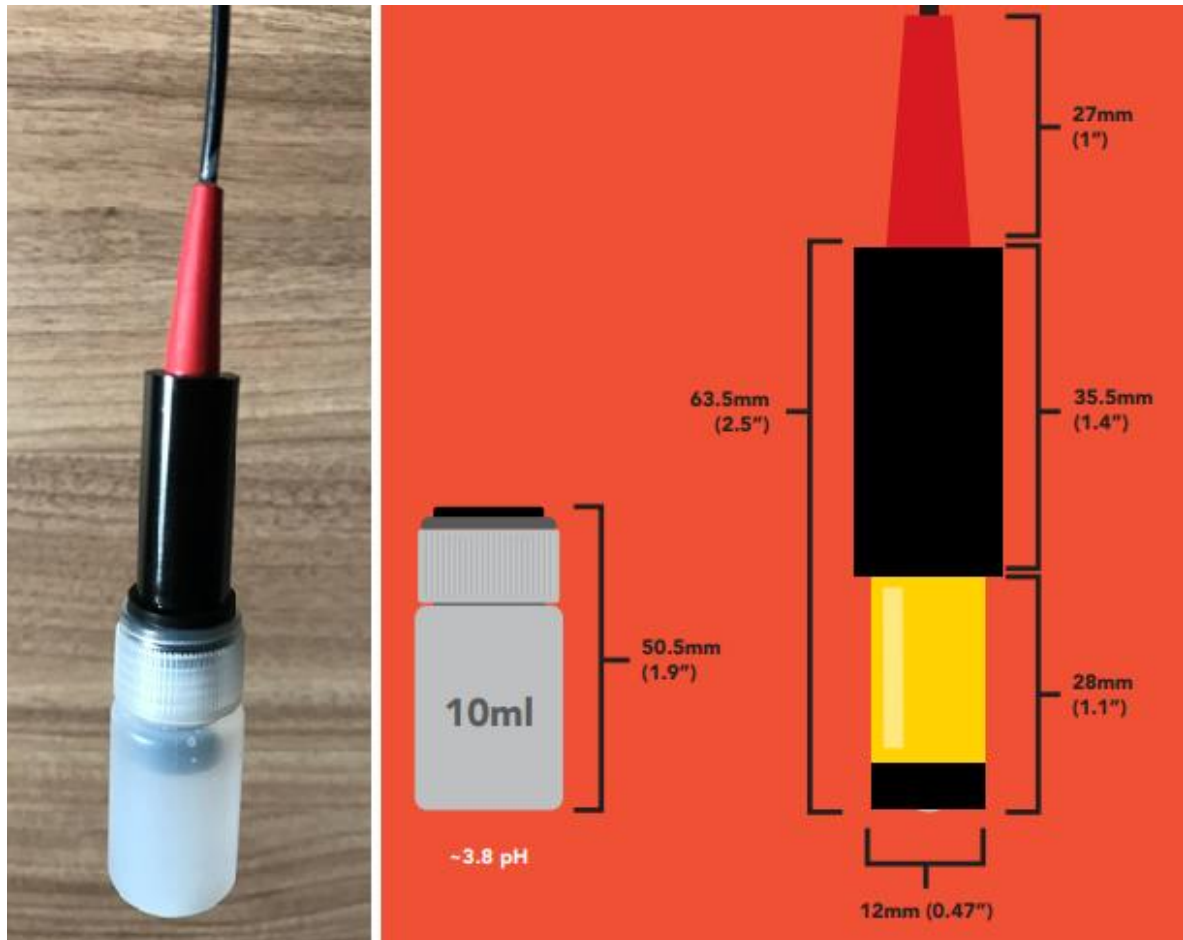
Tabela 12 – Resposta em tensão (V) da mini sonda de pH.

Ph	Tensão (V)
0	2,745
1	2,570
2	2,390
3	2,210
4	2,030
5	1,855
6	1,680
7	1,500
8	1,330
9	1,155
10	0,975
11	0,800
12	0,620
13	0,445
14	0,265

Fonte: Atlas Scientific®, 2015.

A mini sonda de pH é transportada imersa em uma solução de 3,8 de pH. A Figura 48 ilustra a mini sonda e a solução de transporte.

Figura 48 – Mini sonda de pH imersa da solução de transporte.



Fonte: Autor, 2020.

Antes da utilização da aquisição com o microcontrolador, a mini sonda de pH deve ser calibrado com soluções padrões de pH, com respectivos valores de 4,0, 7,0 e 10,0. Para a calibração são utilizadas soluções padrões da Atlas Scientific ®. A Figura 49 a seguir ilustra as soluções padrões utilizadas para calibração da mini sonda de pH.

Figura 49 – Soluções padrões de calibração de pH.



Fonte: Atlas Scientific®, 2015.

Com as soluções padrões de calibração, a resposta em tensão (V) para cada solução é realizada. A Tabela 13 a seguir mostra os resultados da resposta em tensão (V) para as soluções padrões 3,8 (solução de transporte), 4,0, 7,0 e 10,0.

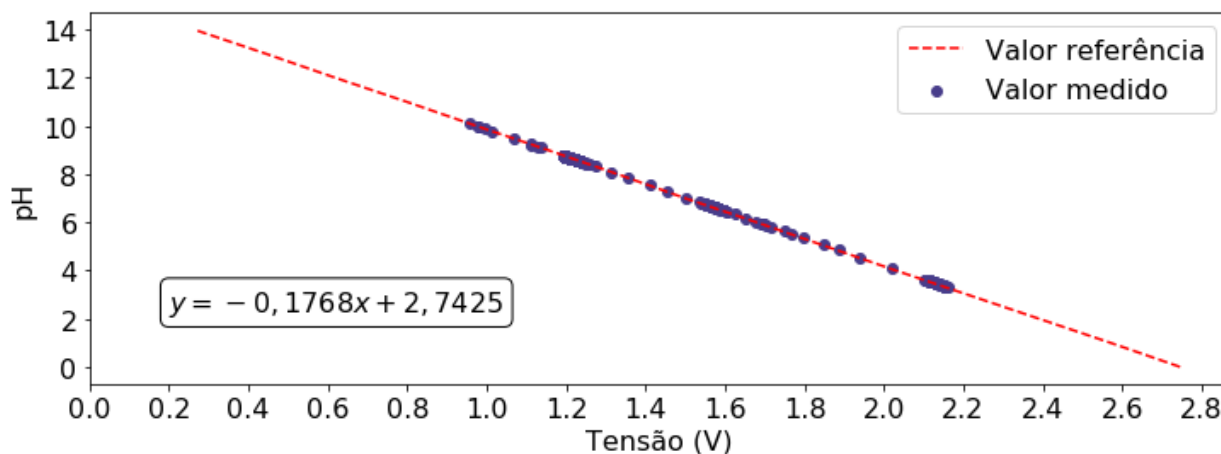
Tabela 13 – Resposta em tensão (V) na calibração.

pH	Tensão de aquisição (V)	Tensão esperada (V)
3,8	2,180	2,030 – 2,210
4,0	2,029	2,030
7,0	1,501	1,500
10,0	0,974	0,975

Fonte: Autor, 2020.

A Figura 50 ilustra o comportamento do parâmetro pH, a qual é possível comparar os valores disponibilizados do fabricante, com os dados coletados.

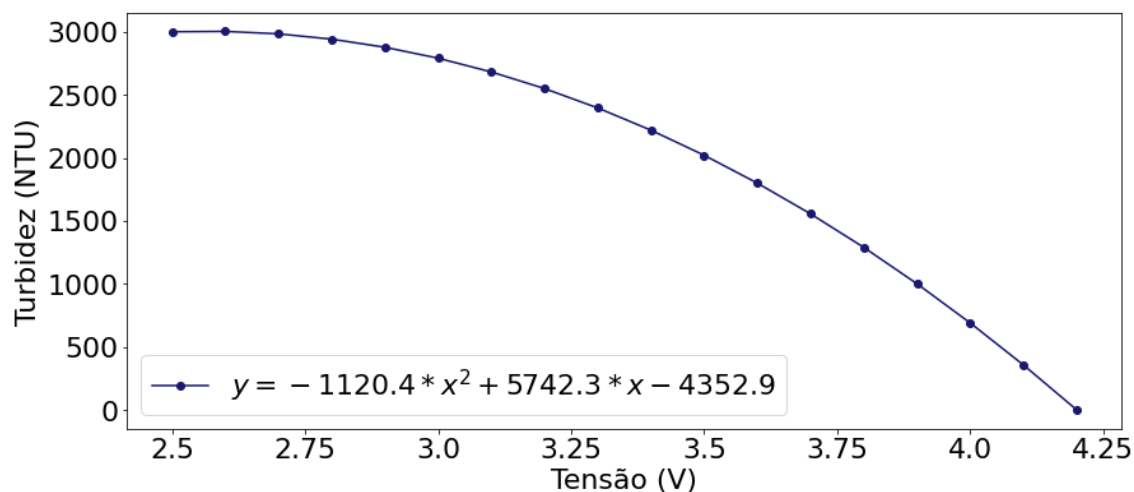
Figura 50 – Comparação pH medido x pH referência.



Fonte: Autor, 2020.

Os parâmetros de turbidez, temperatura e de TDS não apresentam possibilidade de calibração das sondas. Porém, o sensor de turbidez apresenta uma curva com sua resposta em tensão (V), disponibilizada pelo fabricante. A Figura 51 ilustra o comportamento do sensor de turbidez e sua resposta em tensão (V), e seu equacionamento, conforme atenuação sofrida. Quanto menor a quantidade de partículas em suspensão da água, maior a resposta em tensão (V) do sensor.

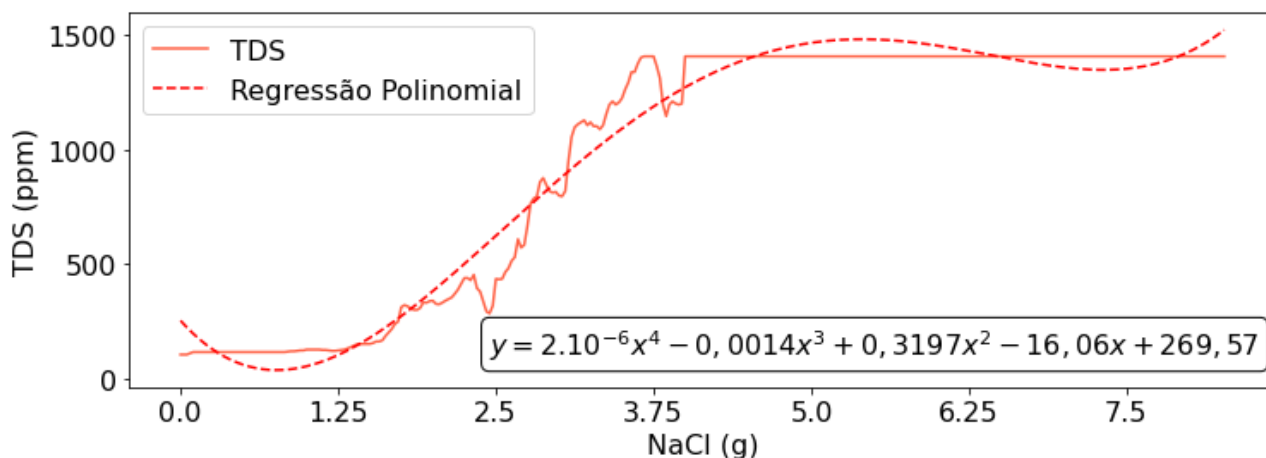
Figura 51 – Resposta em tensão (V) do sensor de turbidez.



Fonte: DFRobot, 2019.

Mesmo não apresentando nenhuma calibração, o sensor de TDS é submetido a uma análise com a finalidade de entendimento comportamental sob condições diferentes de NaCl (sal de cozinha), dissolvidos na água. Para a análise comportamental do sensor de TDS são inseridos em 100 ml de água potável diferentes pesos de NaCl, a qual são devidamente pesados por meio de uma balança de precisão e inseridas gradualmente na água. A Figura 52 a seguir ilustra o comportamento do sensor de TDS, o qual apresenta a regressão polinomial e seu equacionamento.

Figura 52 – Comportamento do sensor de TDS.



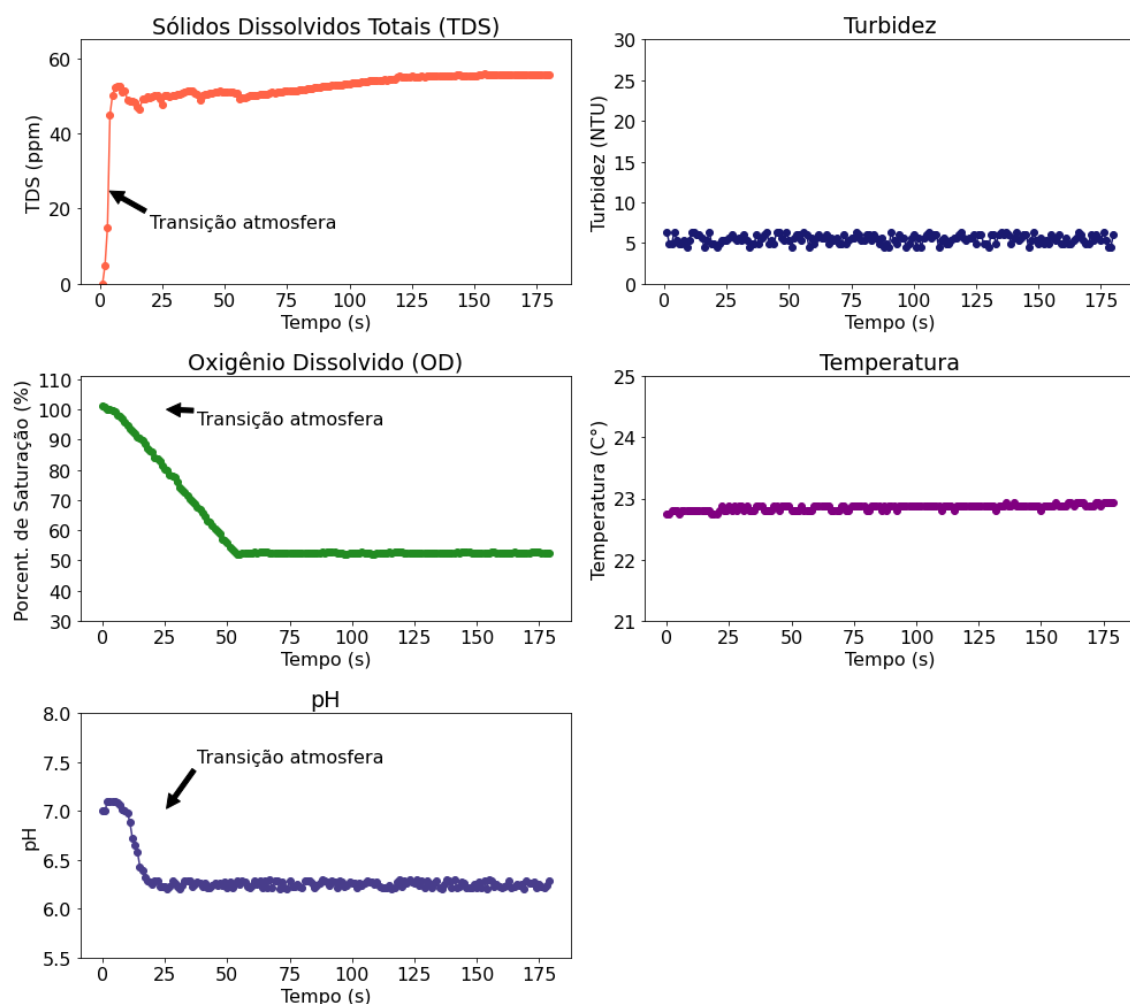
Fonte: Autor, 2020.

6.2.3 Análise de Correlação de Dados dos Sensores Sob Simulação de Alteração da Água

Os primeiros testes realizados são utilizando água sem alterações em sua qualidade, e em seguida, utilizando alteração com o composto NaCl (cloreto de sódio), popularmente conhecido como sal de cozinha. No copo Becker de 1000 ml foram dissolvidas 30g e 60g, correspondendo à 3% e 6% do Becker. A água utilizada no copo Becker é de uma torneira (torneira higienizada com assepsia com álcool). Como o sensor de TDS será o mais afetado pela solução de NaCl, por possuir uma ponta de prova capaz de medir a condutividade elétrica, as análises realizadas se iniciam pelo mesmo, onde a sonda é submersa.

O sensor de TDS é composto por uma ponta de prova com uma resistência, a qual dependendo da sua resistência ôhmica, pode-se obter sua capacidade de conduzir energia elétrica, bem como obter o parâmetro TDS. Os dados coletados se iniciam com a análise dos dados da água sem nenhuma alteração. A Figura 53 ilustra o comportamento de todos os parâmetros monitorados na água sem alterações.

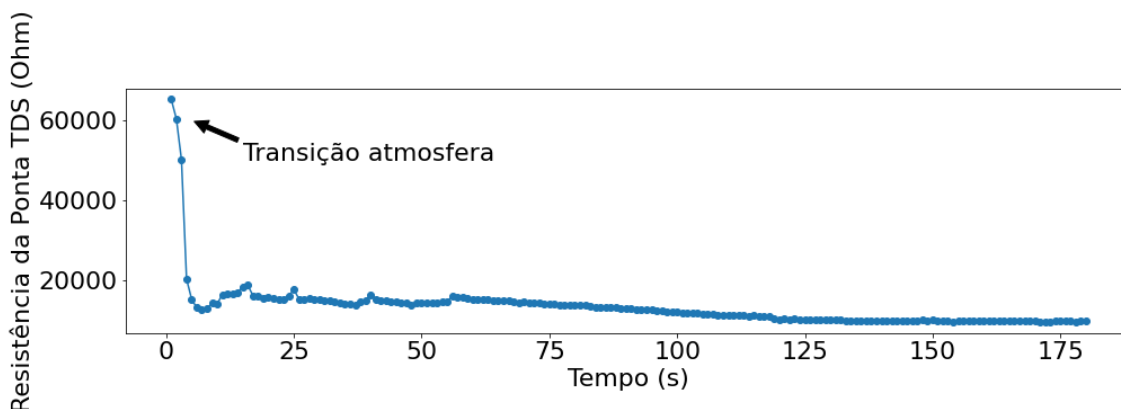
Figura 53 – Comportamento dos sensores dos parâmetros monitorados em água sem alterações.



Fonte: Autor, 2020.

A Figura 54 a seguir ilustra a representação da resistência ôhmica da ponta de prova do sensor do TDS, a qual podemos observar que a resistência tende ao infinito quando não está em contato com água da rede da tubulação (em contato com o ar atmosférico). Assim que o sensor é submerso, o mesmo é capaz de conduzir energia elétrica, e, portanto, apresentar alteração de sua resistência ôhmica.

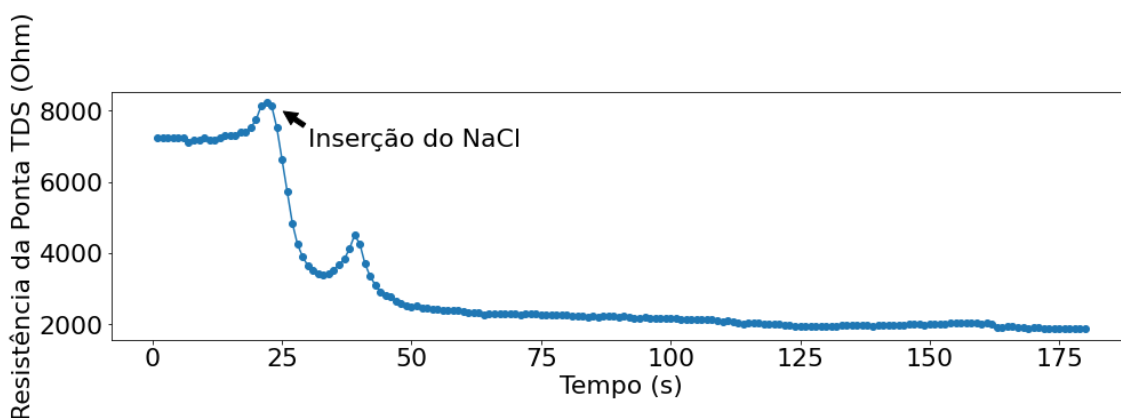
Figura 54 – Comportamento do TDS (ohm) sem alterações de parâmetros.



Fonte: Autor, 2020.

Com a coleta dos dados na água sem alterações previamente realizadas, 3% de NaCl (30g) são inseridas no 1000 ml de água. A Figura 55 ilustra o comportamento ôhmico da ponta de prova, a qual pode-se observar o momento que a dissolução é inserida na tubulação.

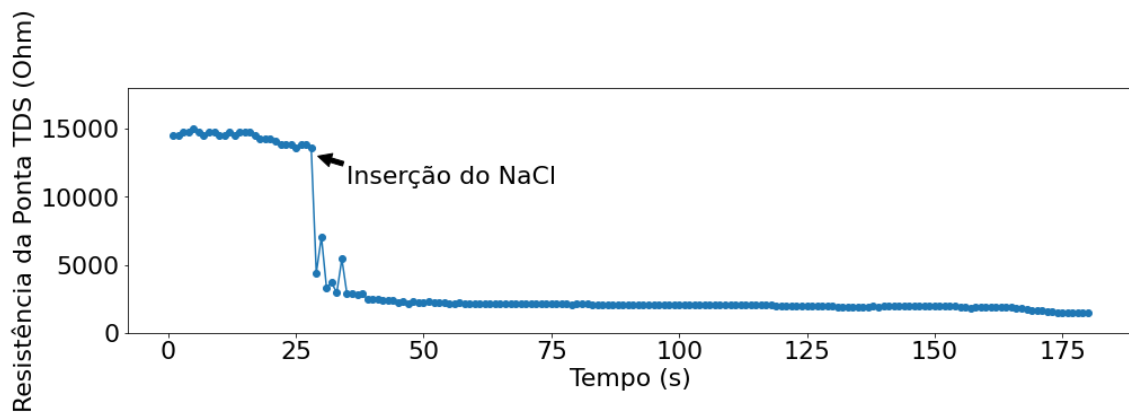
Figura 55 – Comportamento do TDS (ohm) em dissolução em 3% de NaCl.



Fonte: Autor, 2020.

Após a dissolução de 3%, a coleta dos dados é realizada com 6% de NaCl (60g) em 1000 ml de água. Substituindo a água com 3% de dissolução de NaCl por água limpa, os 60g de NaCl são inseridos na água. A Figura 56 ilustra o comportamento ôhmico da ponta de prova, na qual pode-se observar o momento que a o NaCl é detectado pela sonda.

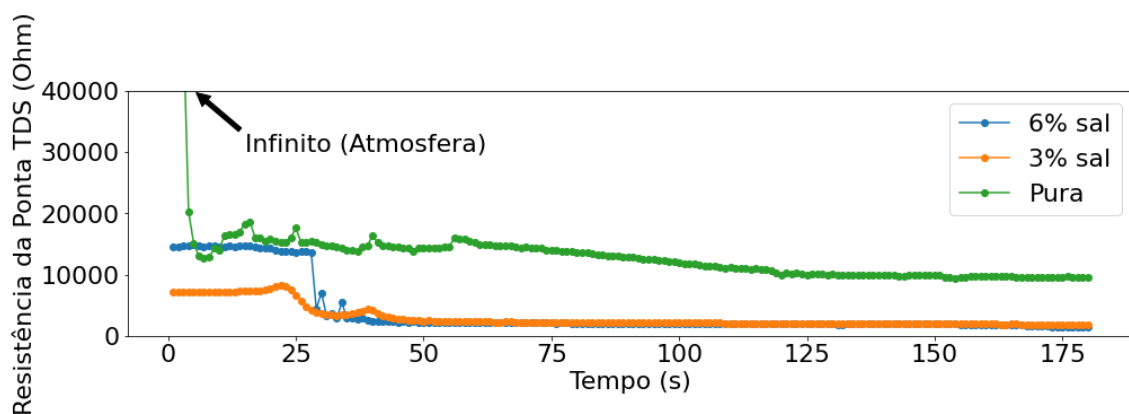
Figura 56 – Comportamento do TDS em dissolução em 6% de NaCl.



Fonte: Autor, 2020.

Com as alterações realizadas, pode-se observar que no momento que ambas as concentrações são inseridas na água limpa, a água torna-se uma melhor condutora de energia elétrica. Comprovando a primeira lei de Ohm: quanto maior a resistência, menor será a corrente elétrica, ou, quanto menor a resistência, maior a sua capacidade de conduzir energia elétrica. A Figura 57 ilustra a comparação entre as análises realizadas sem alteração, e com dissoluções em 3% e 6% de NaCl.

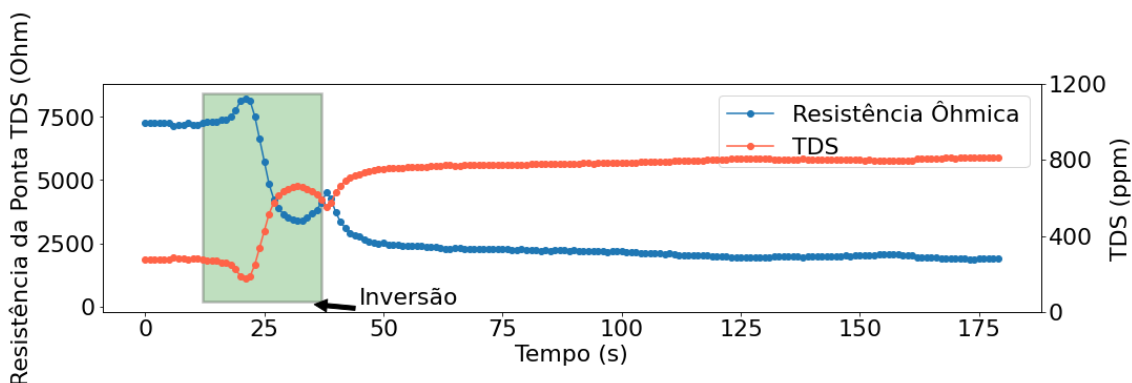
Figura 57 – Comparação dos comportamentos do sensor de TDS.



Fonte: Autor, 2020.

Dessa forma, pode-se concluir que os valores de TDS em ppm (partes por milhão) se comportam como a corrente que flui pela ponta de prova resistiva. Ou seja, quanto maior a corrente elétrica, menor será a resistência ôhmica do sensor e, portanto, maior será o valor de TDS em ppm (quantidade de sólidos em suspensão) na água. A Figura 58 ilustra o comportamento inversamente proporcional do valor de TDS (ppm) em relação a resistência ôhmica (ohm) do sensor.

Figura 58 – Relação entre resistência ôhmica e TDS.

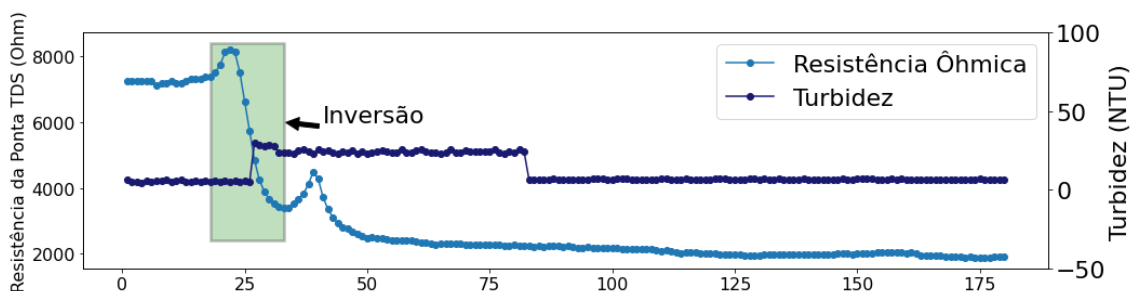


Fonte: Autor, 2020.

Com a análise do comportamento do sensor de TDS, o comportamento do sensor de turbidez é analisado e comparado com o comportamento do sensor TDS. O sensor de turbidez quando não detecta nenhuma partícula em suspensão que seja capaz de impedir ou atenuar a passagem de luz entre o emissor e coletor (por se tratar de um sensor óptico), não apresenta nenhuma alteração em seu comportamento. A partir do momento em que o sensor de turbidez detecta partículas em suspensão, o mesmo apresenta atenuação óptica entre o emissor e coletor, apresentando variações de seus valores coletados.

As alterações realizadas no copo Becker apresentam certa turbidez a olho nu. Dessa forma, com as mesmas dissoluções utilizadas, 3% e 6% respectivamente, o comportamento do sensor de turbidez é analisado e comparado com o sensor de TDS. Com a dissolução de 3% de NaCl, pode-se observar uma pequena alteração em sua turbidez no momento exato da inserção, a qual também é possível observar uma pequena inversão proporcional. A Figura 59 ilustra o comportamento do sensor de turbidez em comparação com a resistência ôhmica do sensor de TDS, com a dissolução de 3% de NaCl.

Figura 59 – Comportamento do sensor de turbidez em dissolução de 3% de NaCl.

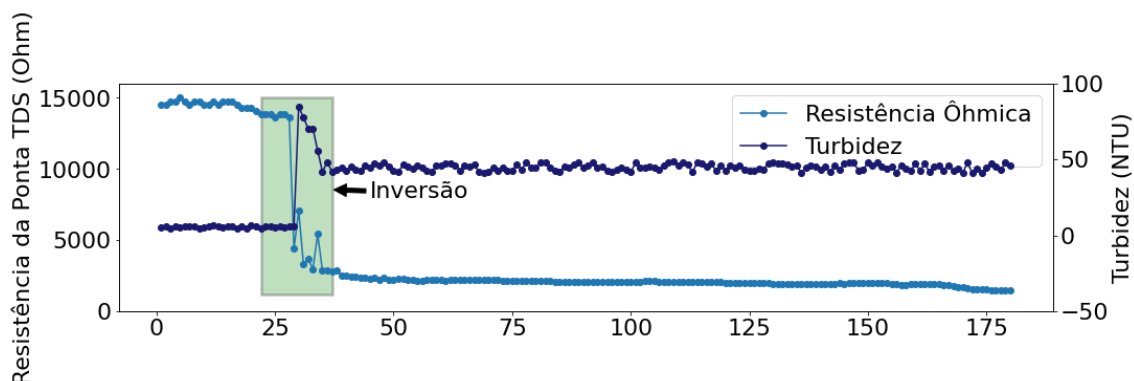


Fonte: Autor, 2020.

Como pode-se observar na figura anterior, após a dissolução de 3% fluir pelo sensor de turbidez, a detecção de partículas em suspensão é quase nula, mas o sensor de TDS mantém sua capacidade de conduzir energia elétrica e, portanto, mantém seus valores medidos.

Com a dissolução de 6% de NaCl, também pode-se observar uma alteração em sua turbidez no momento da inserção. A Figura 60 ilustra o comportamento inversamente proporcional e um comparativo do sensor de turbidez com o sensor de TDS, com a dissolução de 6% de NaCl.

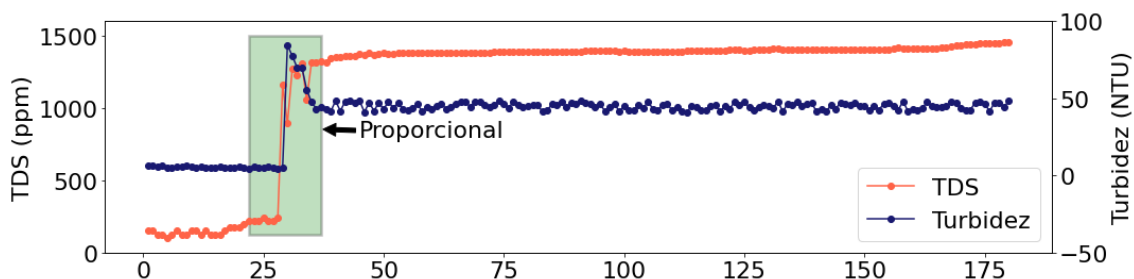
Figura 60 – Comportamento do sensor de turbidez em dissolução de 6% de NaCl.



Fonte: Autor, 2020.

Dessa forma, pode-se concluir que quanto maior for a quantidade de sólidos em suspensão (TDS) na água, menor será a resistência ôhmica da ponta do sensor de TDS e maior será o valor de TDS em ppm. Ou seja, quanto maior a quantidade de sólidos dissolvidos totais na água, maior será sua turbidez e TDS. A Figura 61 ilustra o comportamento proporcional em TDS e turbidez.

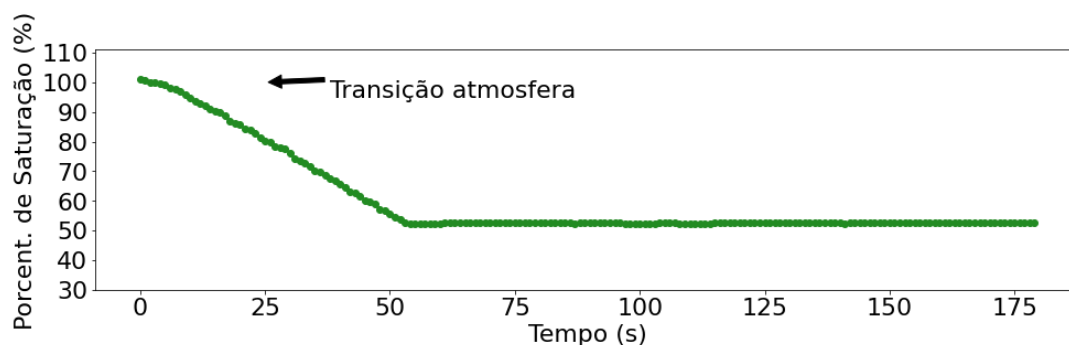
Figura 61 – Comportamento proporcional entre TDS e Turbidez em dissolução de 6% de NaCl.



Fonte: Autor, 2020.

Após os procedimentos de análise dos parâmetros de TDS e turbidez, com seus respectivos sensores, o comportamento do sensor de oxigênio dissolvido (OD) é analisado sob alterações das dissoluções de 3% e 6% de NaCl. O sensor de OD demanda um tempo de estabilização da medição. A Figura 62 ilustra o comportamento do sensor de OD na água do reservatório sem alterações.

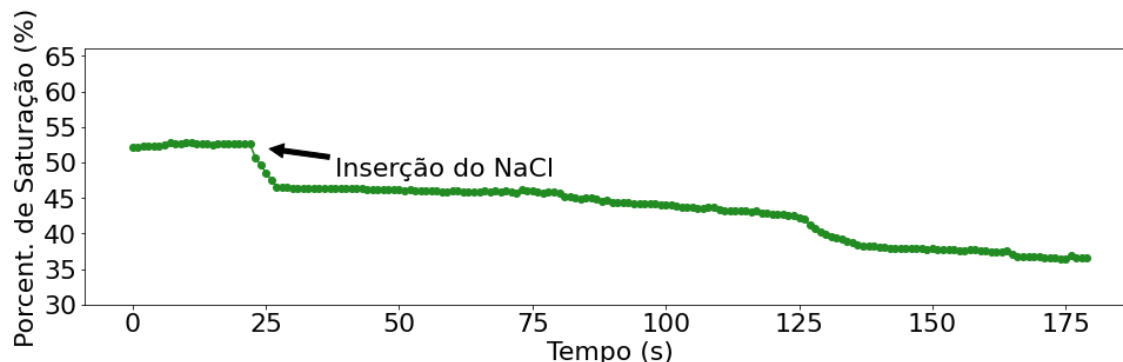
Figura 62 – Comportamento do sensor de OD sem alterações de parâmetros.



Fonte: Autor, 2020.

Com as mesmas dissoluções utilizadas, 3% e 6%, respectivamente, o comportamento do sensor de OD é analisado e comparado com o sensor de TDS. A Figura 63 ilustra o comportamento do sensor de OD sob análise da dissolução de NaCl de 3%.

Figura 63 – Comportamento do sensor de OD em dissolução de 3% de NaCl.

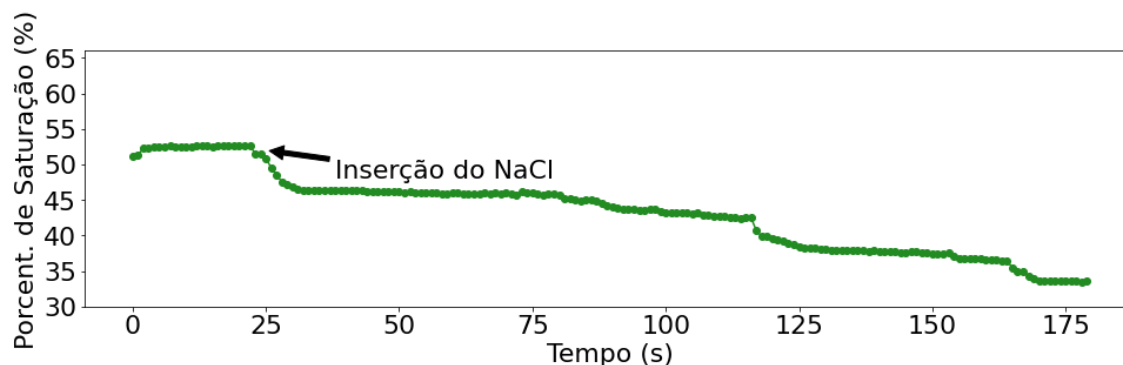


Fonte: Autor, 2020.

Por meio da análise da figura anterior, pode-se observar que quando há a inserção de 3% NaCl, a quantidade de oxigênio dissolvido na água diminui. Quando o sensor de OD está presente na água sem alterações, as medições são estabilizadas em 52,2% de saturação. Assim que 3% de NaCl é inserida na água, o sensor de OD estabiliza-se após 175 segundos, com valores de 36,38% de saturação.

Com a análise do sensor de OD sob condições de dissolução em 3% de NaCl, o comportamento do mesmo é analisado em 6% de dissolução de NaCl. A Figura 64 ilustra o comportamento do sensor de OD sob análise da dissolução de 6% de NaCl.

Figura 64 – Comportamento do sensor de OD em dissolução de 3% de NaCl.

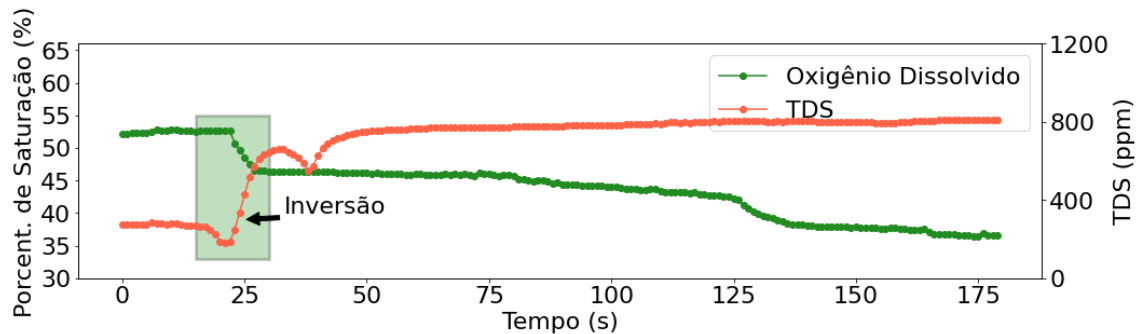


Fonte: Autor, 2020.

Com a condição do sensor sob dissolução de 6% de NaCl, o sensor de OD estabiliza-se após mesmos 175 segundos com valores de 33,52% de saturação.

Dessa forma, pode-se comprovar que quanto maior a salinidade da água, menor será a quantidade de oxigênio dissolvido na água. Nestas condições, podemos realizar um comparativo entre o sensor de TDS e o sensor de OD. A Figura 65 ilustra um comparativo do comportamento do sensor de TDS e de OD.

Figura 65 – Comportamento proporcional entre TDS e OD em dissolução de 3% de NaCl.

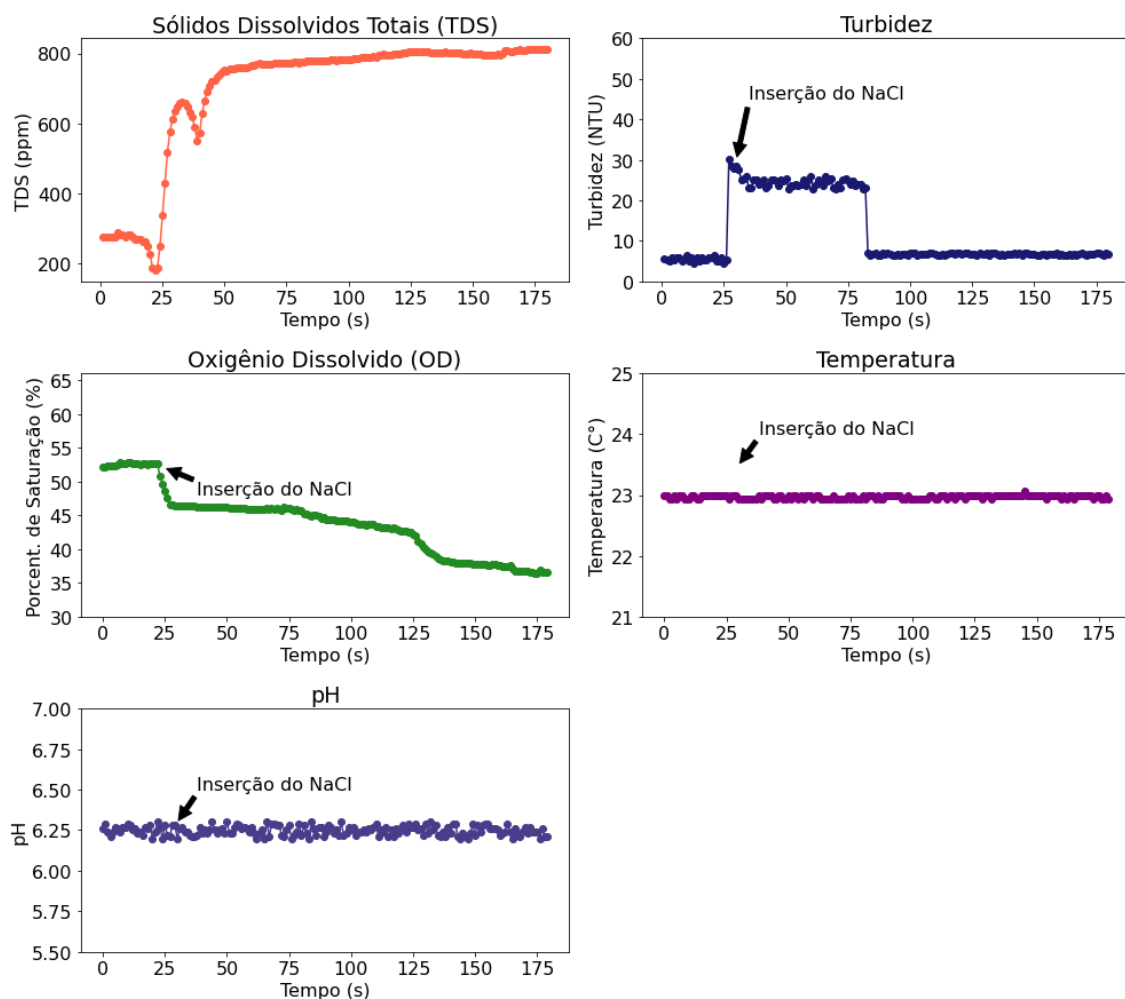


Fonte: Autor, 2020.

Podemos concluir que, sob as condições de dissolução de 3% e 6% de NaCl, há uma relação inversamente proporcional entre os parâmetros sólidos dissolvidos totais (TDS) e oxigênio dissolvido (OD), a qual quanto maior a quantidade de TDS, menor será a quantidade de oxigênio dissolvido.

Com as mesmas condições, o comportamento dos sensores de pH e temperatura são analisados. Porém, podemos observar que não houve alterações nos parâmetros pH e temperatura sob as condições de dissolução de 3% de NaCl. A Figura 66 a seguir ilustra o comportamento dos parâmetros sob as condições de dissolução de 3% de NaCl.

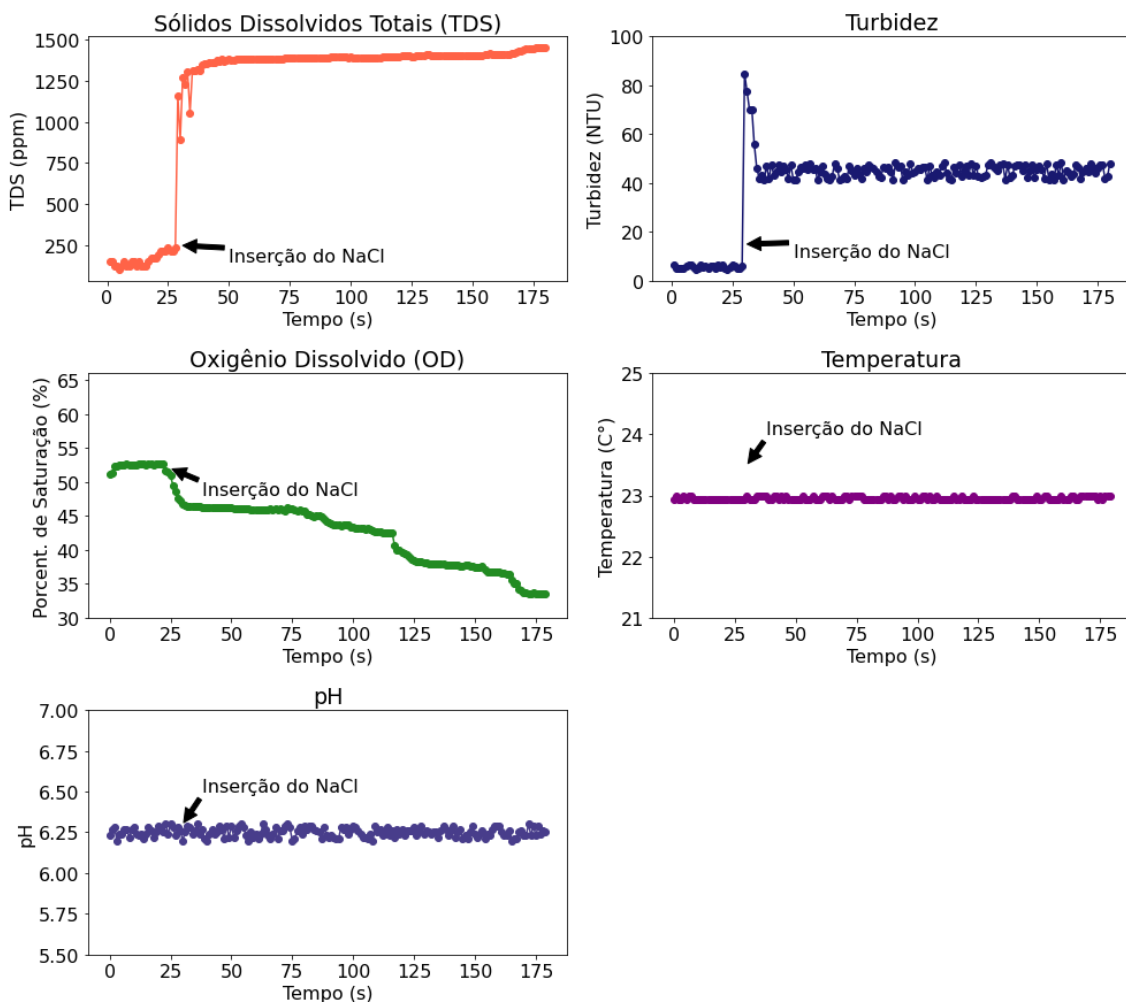
Figura 66 – Comportamento dos sensores dos parâmetros em dissolução de 3% de NaCl.



Fonte: Autor, 2020.

Sob as condições de dissolução de 3% de NaCl, podemos observar que novamente não houve alterações nos parâmetros pH e temperatura. A Figura 67 a seguir ilustra o comportamento dos parâmetros sob as condições de dissolução de 6% de NaCl.

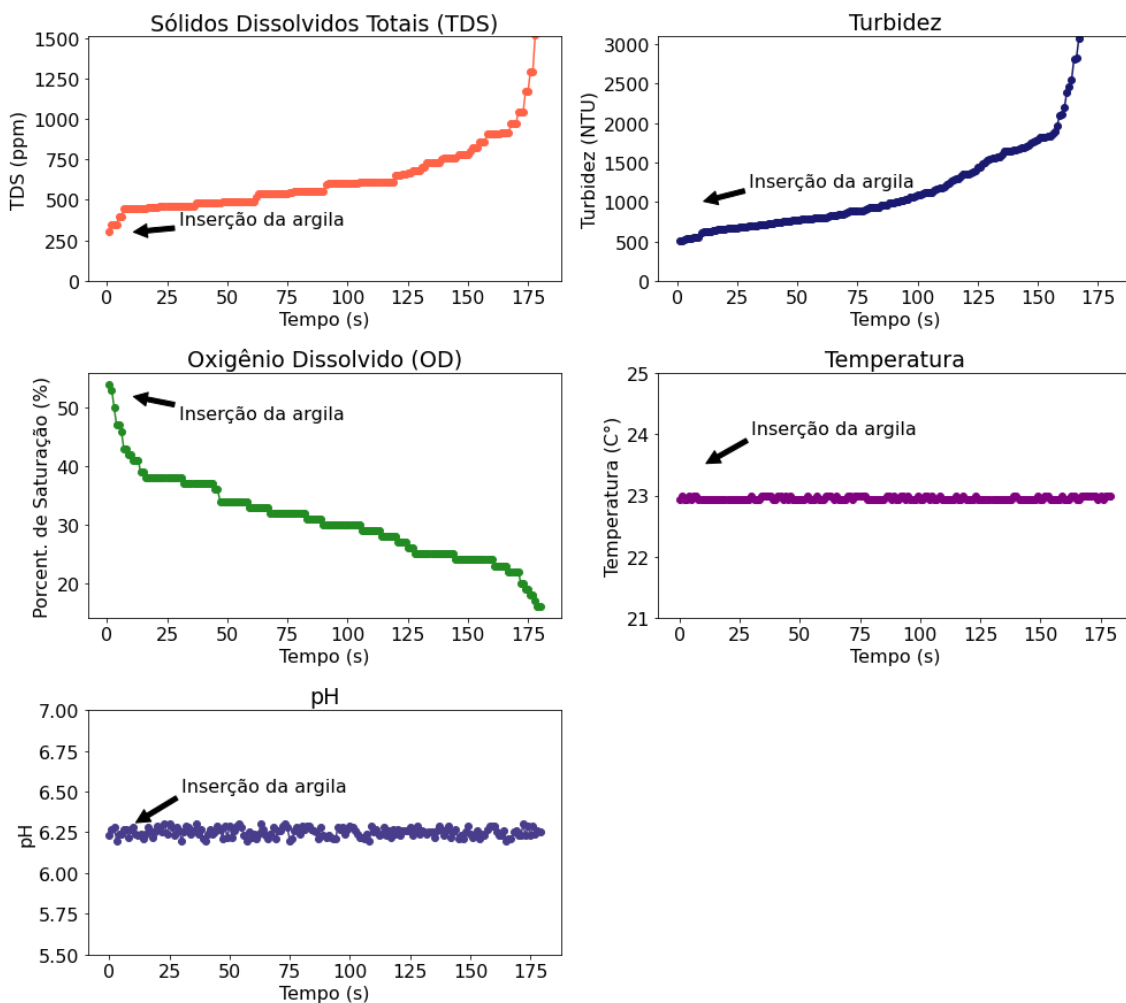
Figura 67 – Comportamento dos sensores dos parâmetros em dissolução de 6% de NaCl.



Fonte: Autor, 2020.

Por fim, os sensores foram submetidos a análise sob condições de alteração da qualidade da água utilizando argila. A argila foi utilizada pelo fato de apresentar um aspecto bem turvo a água. Dessa forma, os dados foram analisados sob alteração da água limpa em 6% (60g) de argila. A Figura 68 a seguir ilustra o comportamento dos parâmetros sob as condições de 6% de argila.

Figura 68 – Comportamento dos sensores dos parâmetros em dissolução de 6% de argila.



Fonte: Autor, 2020.

Os dados coletados com a simulação de alteração utilizando a argila possibilita uma melhor visualização das correlações entre os parâmetros TDS, turbidez e OD. Novamente podemos observar uma correlação proporcionalmente positiva entre o parâmetro TDS e turbidez, e uma correlação proporcionalmente negativa entre esses parâmetros e o parâmetro OD. Por meio da análise dos sensores foram obtidos os valores monitorados (valores estabilizados máximos), apresentados na Tabela 14 à seguir.

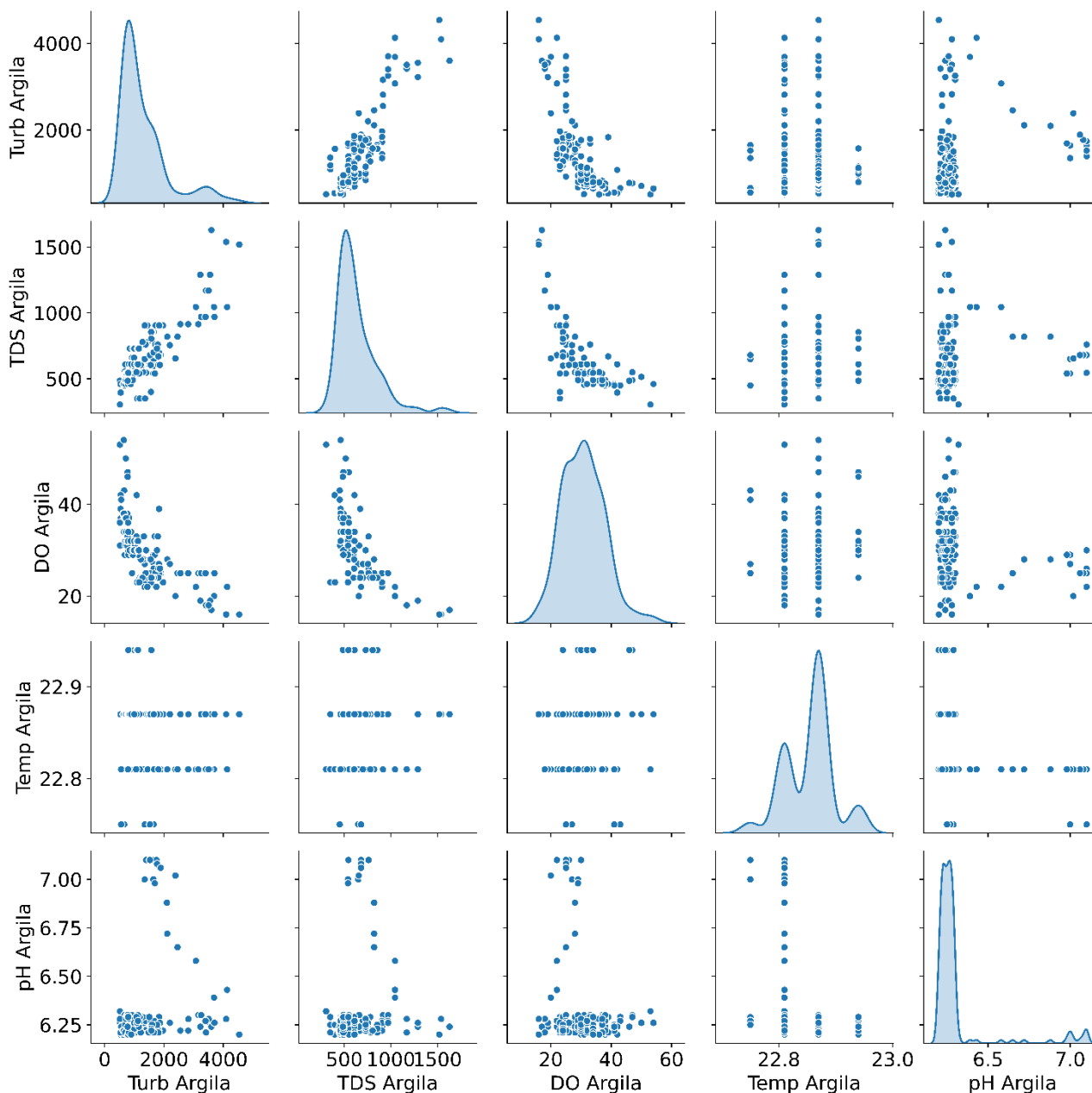
Tabela 14 – Dados dos parâmetros coletados pelo sistema.

Parâmetros	Pura	3% de NaCl	6% de NaCl	6% de Argila
Sólidos dissolvidos totais (ppm)	55,79	821,6	1.498,4	1.511,1
Temperatura (C°)	23,04	23,0	22,94	23,02
Turbidez (NTU)	4,57	30,2	84,7	3000,1
Oxigênio Dissolvido (% sat.)	52,2	36,38	33,52	8,23
pH	6,39	6,32	6,34	6,32

Fonte: Autor, 2020.

Os dados coletados em bancada já possibilitam uma análise de correlação entre os parâmetros. Por meio da análise realizada utilizando o método do colinearidade foi possível visualizar uma forte correlação linearmente positiva entre os parâmetros TDS e turbidez, bem como visualizar uma pequena correlação linearmente negativa entre os parâmetros TDS (e turbidez) e OD. A Figura 69 a seguir ilustra a análise de colinearidade entre os parâmetros sob condições de alterações da argila.

Figura 69 – Análise de correlação entre os parâmetros sob alteração com argila



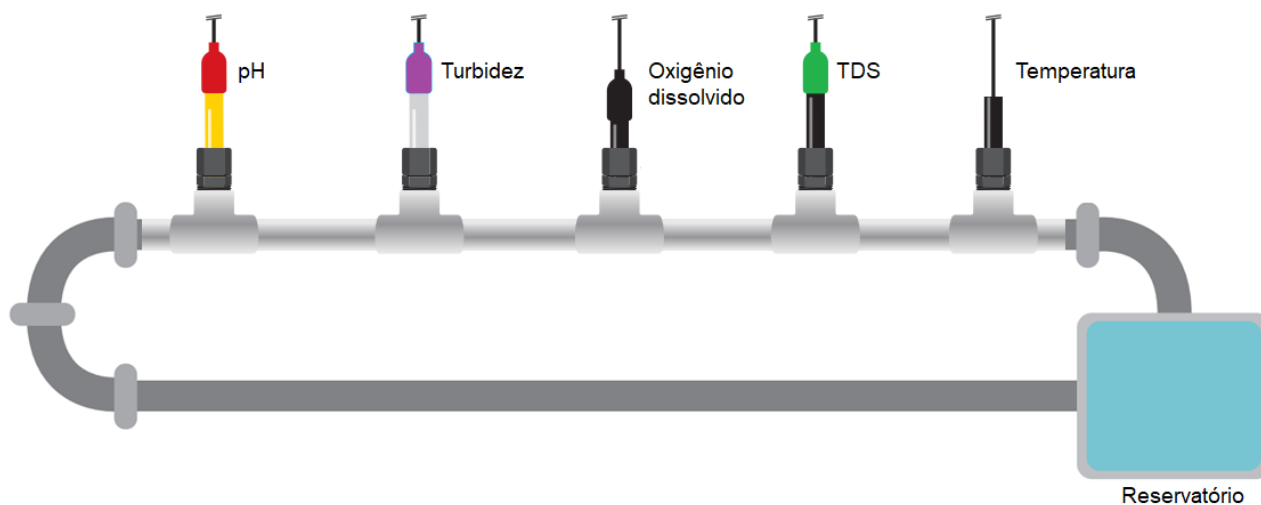
Fonte: Autor, 2020.

6.2.4 Análise de Correlação de Dados dos Sensores em um Reservatório de Água Potável

O sistema de monitoramento de água proposto foi implementado em um reservatório de 300 litros com água potável; água distribuída pela concessionária de água SANEQUA da cidade de Mairinque, no estado de São Paulo. O reservatório submetido ao monitoramento apresenta uma arquitetura de sistema

fechado (*closed-loop*), o qual a água circula por meio de uma bomba e passa sob os sensores inseridos diretamente na tubulação. A Figura 70 a seguir ilustra a arquitetura utilizada para o monitoramento do reservatório.

Figura 70 – Arquitetura de monitoramento *closed-loop* de um reservatório.



Fonte: Autor, 2020.

O reservatório utilizado de 300 litros foi disponibilizado pela empresa Yamatec, bem como os itens para implementação dos sensores na tubulação. A Figura 71 a seguir ilustra o sistema de reservação implementado seu monitoramento em tempo real.

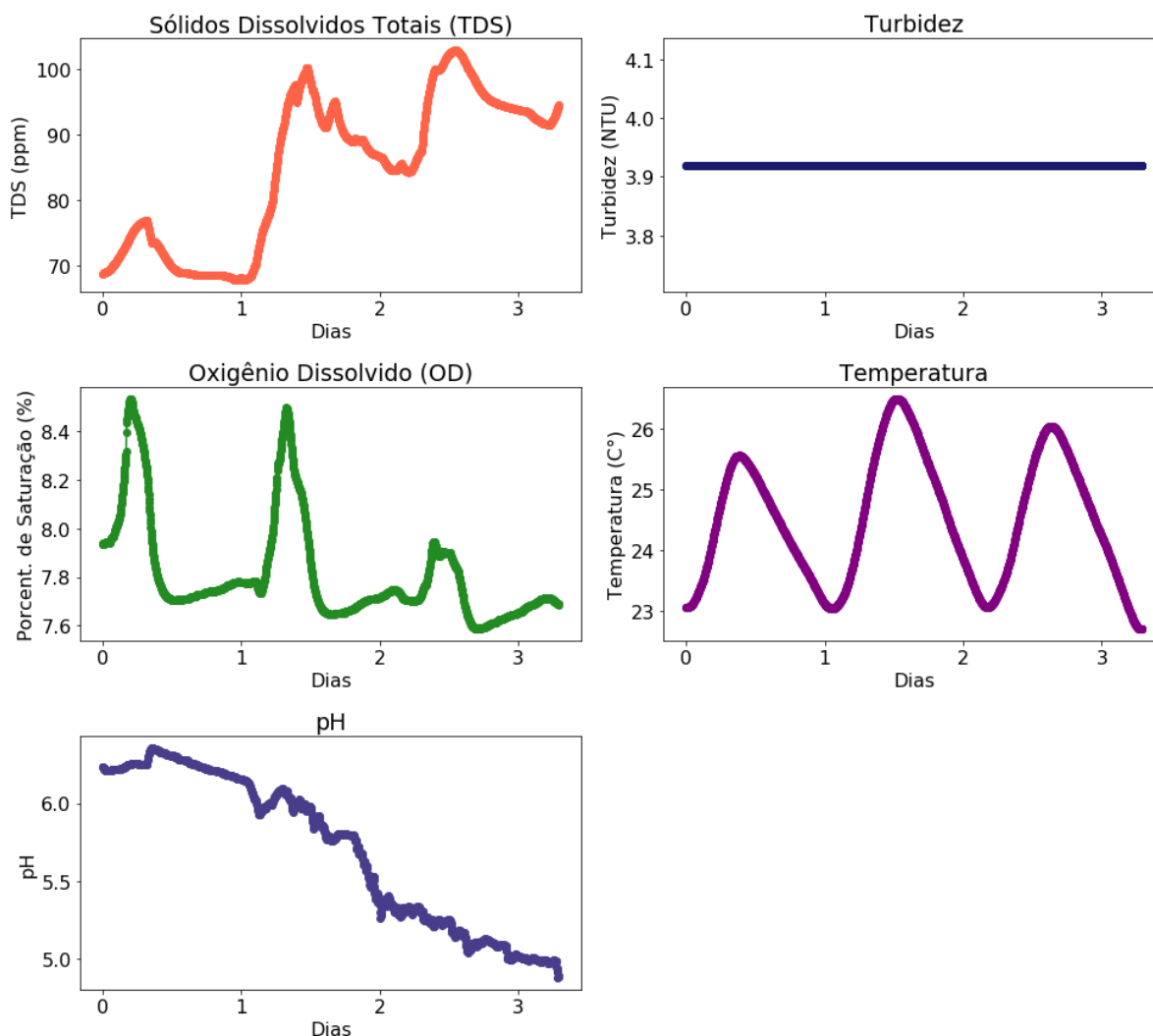
Figura 71 – Reservatório implementado.



Fonte: Autor, 2020.

O sistema realizou o monitoramento da água do reservatório, o qual ficou estagnada sem utilização. A finalidade do monitoramento da água do reservatório é identificar alterações e analisar o comportamento dos parâmetros físico-químicos sob condições de água parada. A Figura 72 mostra o comportamento da água do reservatório.

Figura 72 – Comportamento dos parâmetros da água do reservatório monitorado.



Fonte: Autor, 2020.

Os dados coletados do reservatório possibilitam uma análise de correlação entre os parâmetros, a qual o método utilizado é o de Pearson. A Tabela 15 a seguir mostra os valores de correlação.

Tabela 15 – Correlação de Pearson entre os parâmetros monitorados.

	Temperatura	OD	pH	Turbidez	TDS
Temperatura	1,0000	0,0981	0,0886	0,0000	0,1723
OD	0,0981	1,0000	0,6139	0,0000	-0,5256
pH	0,0886	0,6139	1,0000	0,0000	-0,9138
Turbidez	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000
TDS	0,1723	-0,5256	-0,9138	0,0000	1,0000

Fonte: Autor, 2020.

O método de correlação de Pearson é capaz de medir uma relação entre duas variáveis quantitativas, apresentando valores entre -1 e 1. Aplicado a correlação de Pearson, valores que se aproximam de 1 apresentam correlação positiva. Em contrapartida, quando os valores da correlação de Pearson se aproximam de -1, as variáveis apresentam correlação negativa. Por meio da análise utilizando a correlação de Pearson, podemos observar o comportamento entre todos os parâmetros monitorados, destacando: i) a diminuição do pH é capaz de influenciar a quantidade de oxigênio dissolvido na água; ii) o aumento de sólidos totais dissolvidos (TDS) na água é capaz de influenciar a diminuição do pH, em direção a acidez, apresentando agentes contaminantes prejudiciais a água. Isso acontece pelo fato da água apresentar solubilização de CO₂ (gás carbônico) tornando a água ácida, afetando diretamente o pH e a quantidade de TDS; e iii) o aumento de TDS é capaz de provocar a diminuição de oxigênio dissolvido. Esse fato é devido a influência da quantidade de TDS (por exemplo, a salinidade) em diminuir a dissolução do oxigênio na água.

6.3 Considerações Parciais

Nesse capítulo foram apresentados os resultados obtidos por meio dos processos experimentais realizados e as respectivas análises de correlações entre os parâmetros monitorados.

Com o sistema validado por meio de simulações e testes em bancada, podemos concluir que o sistema proposto foi capaz de coletar as informações dos sensores e as disponibilizar para análises comportamentais.

Por meio da análise de correlação dos sensores de cada parâmetro monitorado foi possível a identificação de uma correlação positiva entre os parâmetros TDS e turbidez, e uma correlação negativa entre os parâmetros OD e TDS e turbidez e OD.

Utilizando o método correlação de Pearson foi possível a identificação da diminuição do pH positivamente relacionada com a diminuição da quantidade de oxigênio dissolvido na água; do aumento de sólidos totais dissolvidos (TDS) na água sendo capaz de influenciar a diminuição do pH; analisar o aumento de TDS e a diminuição de oxigênio dissolvido.

Com os processos experimentais realizados e os resultados obtidos, o capítulo a seguir apresentará as conclusões finais do trabalho.

7 CONCLUSÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema focado no monitoramento dos parâmetros da qualidade das águas em tempo real, utilizando conceitos das cidades inteligentes. O sistema tem como objetivo auxiliar gestores na eficiência nas avaliações, apresentando indicadores que possam ser utilizados na tomada de decisão sobre possíveis contaminações dos níveis da qualidade da água de reservatórios e redes de distribuição.

Por meio da contextualização e da caracterização da qualidade das águas, e dos parâmetros físico-químicos e biológicos que a compõem, foi possível o conhecimento sobre os parâmetros utilizados para o monitoramento da qualidade das águas, os quais dependendo dos valores apresentados definem a classificação e a finalidade de uso das águas. Além disso, pudemos entender sobre as exigências, critérios, metas e diretrizes políticas do país, utilizadas por órgãos como a CETESB, SABESP e ANA fundamentadas pela gestão dos recursos hídricos e o múltiplo uso das águas.

Das tecnologias presentes no mercado podemos concluir que muitas pesquisas e discussões estão sendo realizadas focadas no desenvolvimento de soluções de baixo custo e de alta confiabilidade, uma vez que a maioria das soluções atuais são de alto custo de aquisição, implementação e manuseio. Das soluções que utilizam de conceitos de Internet das Coisas (IoT) e cidades inteligentes, podemos concluir que tipicamente os parâmetros monitorados são o de pH, temperatura, turbidez, oxigênio dissolvido e condutividade, acoplados a microcontroladores com módulos de transmissão de dados que utilizam a internet.

O desenvolvimento da arquitetura da eletrônica e a especificação dos sensores dos parâmetros utilizados para o monitoramento permitiu o entendimento das características de funcionamento de cada sensor e a realização do dimensionamento correto dos circuitos de adequação dos sinais. O dimensionamento correto de divisores de tensão, amplificadores de sinais e filtros de ruídos permitiu que os dados dos sensores pudessem ser coletados de forma adequada pelo microcontrolador.

Por meio do desenvolvimento da arquitetura de *software*, podemos concluir que para o funcionamento correto do sistema, o mesmo depende de recursos como servidores de *web*, bancos de dados (servidor e aplicativo), aplicativos e serviços de notificações. Com a ausência de qualquer uma dessas componentes, o sistema seria incapaz de armazenar os dados e os disponibilizar para visualização e análise.

Por fim, os sistemas eletrônico e de *software* foram validados por meio de simulações e testes em bancada, e uma análise de correlação entre os parâmetros monitorados foi realizada sob diferentes condições da qualidade da água. A análise de correlação entre os sensores possibilitou a identificação de uma correlação positiva entre os parâmetros TDS e turbidez, e uma correlação negativa entre os parâmetros OD e TDS e turbidez e OD. Foi realizada também uma análise de correlação utilizando o método de Pearson, possibilitando a identificação da diminuição do pH positivamente relacionada com a diminuição da quantidade de oxigênio dissolvido na água; do aumento de sólidos totais dissolvidos (TDS) na água sendo capaz de influenciar a diminuição do pH; analisar o aumento de TDS e a diminuição de oxigênio dissolvido.

Podemos concluir que mesmo com a correlação positiva entre os parâmetros, cada parâmetro deve ser monitorado individualmente. Pois como pudemos analisar por meio do monitoramento da água do reservatório, mesmo com a água sem a presença de partículas em suspensão (turbidez com níveis insignificantes), os níveis de TDS apresentaram-se em crescimento, indicando possível presença de bactéria e contaminação do meio. Seria desejável a implementação do sistema com demais simulações, utilizando outros compostos contaminantes para a verificação das correlações entre os parâmetros.

Para trabalhos futuros, seria proposto o incremento de novos parâmetros ao sistema de monitoramento remoto, com a finalidade de entender possíveis novas correlações, bem como a utilização de ferramentas e técnicas de aprendizagem de máquina aplicadas a análise associativa entre as variáveis monitoradas, sendo possível a previsão de valores de contaminação.

7.1 Publicações correlatas

Durante o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica – PPGE do ICTS/UNESP, foram publicados artigos e apresentados artigos correlacionados ao projeto desenvolvido:

MONTEIRO, L. N., DINIZ, I. S., MARAFÃO, F. P. **SISTEMA DE MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS**. Simpósio Mundial de Sustentabilidade Conferência Internacional BRIDGE 2019.

MONTEIRO, L. N., DINIZ, I. S., MARAFÃO, F. P. **SISTEMA DE MONITORAMENTO DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA EM TEMPO REAL**. 2019. 4º Congresso de Pós-Graduação do IFSP (Conpog).

MONTEIRO, L. N., VENDEMIATTI, C., DINIZ, I. S., MARAFÃO, F. P e SIMÕES, A. S. **CARACTERIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA RESIDENCIAL UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**. In: ANAIS DO 14º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 2019, Ouro Preto. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbai-2019/papers/caracterizacao-do-consumo-de-agua-residencial-utilizando-redes-neurais-artificiais>>

(EM PROCESSO DE SUBMISSÃO) MONTEIRO, L. N., DINIZ, I. S., MARAFÃO, F. P. **WATER QUALITY MONITORING APPROACH BASED ON THE OPEN SOURCE IOT PLATFORM**. 2020.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASI, T.; ABBASI, S. A. **Water quality indices based on bioassessment: The biotic indices**. Journal of water and health. 9. 330-48, 2011.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626:1998**. Instalação Predial de Água Fria. Rio de Janeiro, 1998. 41 p.
- ADVICE, E. **Unable to connect sim800l with network**. 2018. Disponível em: <http://www.embeddedadvice.com/t/unable-to-connect-sim800l-with-network/227>. Acesso em: 7 dez. 2019.
- AGSOLVE. **Sondas Multiparâmetros**. 2017. Disponível em: <https://www.agsolve.com.br/produtos/48/sondas-multiparametros>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- AKOGLU, H. **User's guide to correlation coefficients**. Turkish Journal of Emergency Medicine, Volume 18, 3, 2018, Pag. 91-93, ISSN 2452-2473, <https://doi.org/10.1016/j.tjem.2018.08.001>.
- AHMED, U., MUMTAZ, R., ANWAR, H., MUMTAZ, S., e QAMAR, A. M. 2020. **Water quality monitoring: from conventional to emerging technologies**. Water Supply. 1 de fevereiro de 2020; 20 (1): 28–45. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2019.144>.
- AKSO. **Controle de Qualidade**. 2020. Disponível em: <https://www.akso.com.br/produtos/controle-de-qualidade>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- AMORIM, J. S. *et Al*. **Avaliação da relação entre condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos em uma seção do Rio Catolé do município de Itapetinga-BA**. 2012. 64ª Reunião Anual da SBPC.
- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS). Cadernos de recursos hídricos: panorama do enquadramento dos corpos d'água: estudo técnico. Brasília: ANA, 2005.
- ASUERO, A. G.; SAYAGO, A.; e GONZÁLEZ, A. G. **The Correlation Coefficient: An Overview**, Critical Reviews in Analytical Chemistry, 36:1, 41-59, DOI: 10.1080/10408340500526766. 2007.
- ATLAS SCIENTIFIC ®. **Atlas Scientific Environmental Robotics**. 2015. Disponível em: <https://www.atlas-scientific.com/>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- BRAGA, B. *et. Al*. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Portaria MS nº 2914 de 12 de dezembro de 2011**. Brasília, dez. 2011.
- _____. Ministério da Saúde. **Fundação Nacional de Saúde (FUNASA). Manual prático de análise de água**. 3. ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde. 144 p, 2009. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manual_pratico_de_analise_de_agua_2.pdf. Acesso em: 20 jul. 2019.
- _____. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde (FUNASA). **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**. Brasília. Fundação Nacional de Saúde. 112 p, 2014. CDU 628.1. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manualcont_quali_agua_tecnicos_trab_emetas.pdf. Acesso em: 25 jul. 2019.
- _____. Ministério da Saúde. **Secretaria de Vigilância em Saúde. Manual de procedimentos de vigilância em saúde ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano**. Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde. - Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 284 p. - (Série A. Normas e Manuais Técnicos).
- _____. Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. **Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional**. Publicado no D.O.U.

BROWN, R.M.; MCLELLAND, N.J.; DEININGER, R.A.; TOZER, R.G. **A Water Quality Index Do We Dare?** Water & Sewage Works, p. 339-343, 1970.

CARTER, B e MANCINI, R. **OP AMPS for Everyone**. 2018. Newnes Elsevier. 5a Edição. 484 p.

CETESB. Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo. **Apêndice D – Índices de Qualidade das Águas**. São Paulo. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente. 2016. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2017/11/Ap%C3%AAndice-E-Significado-Ambiental-e-Sanit%C3%A1rio-das-Vari%C3%A1veis-de-Qualidade-2016.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2019.

_____. **Apêndice E – Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem**. São Paulo. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente. 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2017/11/Ap%C3%AAndice-D-%C3%8Dndices-de-Qualidade-das-%C3%81guas.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2019.

_____. **Norma Técnica D3.855**. Desinfecção de sistemas de instalações prediais de água fria: procedimento. São Paulo, 1979, 9 p.

CHEN, Y; HAN, D. **Water quality monitoring in smart city: A pilot project**. Automation in Construction. 2018.

CLOETE, N. A., MALEKIAN, R. e NAIR, L. 2016. **Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring**. IEEE Access, vol. 4, pp. 3975-3990, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2592958.

COUTO, J. L. V. **Limnologia – Parâmetros**. 2014. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/limno.htm>. Acesso em: 20 jul. 2019.

DAS, B. e JAIN, P. C. 2017. **Real-time water quality monitoring system using Internet of Things**. International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix), Jaipur, 2017, pp. 78-82, doi: 10.1109/COMPTLIX.2017.8003942.

DAIGAVANE; VAISHNAVI, V. e GAIKWAD, M. A.. **Water Quality Monitoring System Based on IOT**. 2017.

DFROBOT. **Liquid Sensor Selection Guide**. 2018. DFRobot. Disponível em: <https://www.dfrobot.com/blog-1138.html>. Acesso em: 12 jan. 2020.

DONG, J., WANG, G., YAN H., XU, J., e ZHANG, X. 2015. **A survey of smart water quality monitoring system**. Environ Sci Pollut Res 22(7):4893–4906.

EMBARCADERO®. **Delphi**. 2019. Disponível em: <https://www.embarcadero.com/br/products/delphi>. Acesso em: 19 dez. 2019.

ENCINAS, C., RUIZ, E., CORTEZ, J.e ESPINOZA, C. 2017. **Design and implementation of a distributed IoT system for the monitoring of water quality in aquaculture**. 2017 Wireless Telecommunications Symposium (WTS), Chicago, IL, 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/WTS.2017.7943540.

EPA (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). **Summary of the Clean Water Act**. 33 USC §1251 e segs, 1972. Disponível em: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-water-act>. Acesso em: 10 out. 2019.

ESPRESSIF. **ESP32-DevKitC**. 2019. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp32-devkitc/overview>. Acesso em 08 jan. 2020.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 601 p.

FIORUCCI, A. R e FILHO, E. B. **A importancia do Oxigênio Dissolvido em Ecossistemas Aquáticos**. 2005. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Disponível em http://www.ufjf.br/baccan/files/2012/11/Oxig%C3%AAnio-dissolvido-em-sistemas-aqu%C3%A1ticos-QNEsc_2005.pdf. Acesso em: 20 jan 19.

FONDRIEST ENVIRONMENTAL, INC. **Dissolved Oxygen**. Fundamentals of Environmental Measurements. 19 nov. 2013. Disponível em: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/dissolved-oxygen/>. Acesso em: 20 ago. 2019.

_____. **Measuring Dissolved Oxygen**. Fundamentals of Environmental Measurements. 7 Jan. 2014. Disponível em <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/measurements/measuring-water-quality/dissolved-oxygen-sensors-and-methods/>. Acesso em: 25 ago. 2019.

_____. **Measuring Turbidity, TSS, and Water Clarity**. Fundamentals of Environmental Measurements. 5 set. 2014. Web. Disponível em: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/measurements/measuring-water-quality/turbidity-sensors-meters-and-methods/>. Acesso em: 24 nov. 2019.

_____. **pH of Water**. Fundamentals of Environmental Measurements. 19 nov. 2013. Disponível em: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/ph/>. Acesso em: 12 ago. 2019.

_____. **Telemetria**. Fundamentos de medições ambientais. 23 out. de 2014. Disponível em: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/monitoring-equipment/telemetry/>. Acesso em: 18 nov. 2019.

_____. **Turbidity, Total Suspended Solids and Water Clarity**. Fundamentals of Environmental Measurements. 13 jun. 2014. Disponível em: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/>. Acesso em: 12 jul. 2019.

_____. **Water Temperature**. Fundamentals of Environmental Measurements. 7 fev. 2014. Disponível em: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/water-temperature/>. Acesso em: 9 jun. 2019.

GEETHA, S., GOUTHAMI, S. 2017. **Internet of things enabled real time water quality monitoring system**. Smart Water 2, 1. <https://doi.org/10.1186/s40713-017-0005-y>

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado da Saúde. Centro de Vigilância Sanitária. **Comunicado CVS 6, de 12 de janeiro de 2011**. Limpeza e desinfecção de caixas d'água. São Paulo, jan. 2011.

_____. Secretaria de Estado da Saúde. Centro de Vigilância Sanitária. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao Controle e Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano no Estado de São Paulo e dá outras providências. **Resolução SS 65, de 12 de abril de 2005**. São Paulo, abr. 2005.

HANNA® INSTRUMENTS. **HANNA® instruments Brasil**. 2017. Disponível em: <https://hannainst.com.br/um-pouco-da-historia/>. Acesso em: 21 jan. 2020.

HUAN, J., FAN, H. L., WEIJIAN CAO, W. 2020. **Design of water quality monitoring system for aquaculture ponds based on NB-IoT**. Aquacultural Engineering. Volume 90, August 2020, 102088. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102088>.

IN-SITU BRASIL. **Apps e Software**. 2020. Disponível em: <https://in-situdoBrasil.com.br/categorias/sondas-de-qualidade-da-agua>. Acesso em: 18 jan. 2020.

_____. **Sondas de Qualidade da Água**. 2020. Disponível em: <https://in-situdoBrasil.com.br/categorias/sondas-de-qualidade-da-agua>. Acesso em: 18 jan. 2020.

JULIÃO, F.C. **Avaliação das condições microbiológicas e físico-químicas da água de reservatório domiciliar e predial: importância da qualidade dessa água no contexto da saúde pública**. 2011. 157 p. Tese (Doutorado) - Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, 2011.

- KAGEYAMA, T., MIURA, M., MAEDA, A., MORI, A. e LEE, S. 2016. **A wireless sensor network platform for water quality monitoring**. IEEE SENSORS, Orlando, FL, 2016, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808887.
- KEYESTUDIO. **KS0414 Sensor de turbidez Keyestudio V1.0**. Keyestudio. 5 nov. 2019, Disponível em: https://wiki.keyestudio.com/KS0414_Keyestudio_Turbidity_Sensor_V1.0. Acesso em: 18 dez. 2019.
- KUMAR, S., SAROJINI, M., e RANGA, P. 2016. **IoT based real time monitoring of water quality**. Int. J. Pr. of. Eng. Stud. VII(5):174–179.
- LAMBROU, T. P., ANASTASIOU, C. C., PANAYIOTOU, C. G. e POLYCARPOU, M. M. 2014. **A Low-Cost Sensor Network for Real-Time Monitoring and Contamination Detection in Drinking Water Distribution Systems**. IEEE Sensors Journal, vol. 14, no. 8, pp. 2765-2772, Agosto. 2014, doi: 10.1109/JSEN.2014.2316414.
- LAMON, A. W. **Aplicação de microssores no monitoramento de oxigênio dissolvido, potencial REDOX e temperatura em estudos limnológicos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- LIBELIUM. **Smart Water Sensors to monitor water quality in rivers, lakes and the sea**. 2014 – Libelium. Disponível em: <http://www.libelium.com/smart-water-sensors-to-monitor-water-quality-in-rivers-lakes-and-the-sea/#!prettyPhoto>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- MUKAKA, M. M. **Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research**. 2012. Malawi medical journal : the journal of Medical Association of Malawi, 24(3), 69–71.
- MARTINS, I. D. Qualidade microbiológica da água de abastecimento, de reservatório e filtrada em residências de Alfenas – MG. 2012. **Seminário de Iniciação Científica da UNIFAL-MG**.
- MAXIM INTEGRATED. **DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer**. 2019. Disponível em: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2019.
- MEDEIROS, D. F. **Sistema de Monitoramento de Chuvas para Aplicações em Cidades Inteligentes**. Universidade Federal da Paraíba Centro de Energias Alternativas e Renováveis Departamento de Engenharia Elétrica. João Pessoa, 2018.
- MUINUL H. B., SYED I., ALEX F., HOMAYOUN N., REHAN S., MANUEL R. e MINA H. 2014. **Online Drinking Water Quality Monitoring: Review on Available and Emerging Technologies, Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 44:12, 1370-1421, DOI: 10.1080/10643389.2013.781936
- MYERS, D. N. **Why monitor water quality?** United States Geological Survey. 2017. Disponível em: <https://water.usgs.gov/owq/WhyMonitorWaterQuality.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.
- MOORE, D. S. **The Basic Practice of Statistics**. New York, Freeman. 2007.
- NIVETEC. **Sistema inteligente para a medição de qualidade da água**. 2019. Disponível em: <https://nivetec.com.br/sistema-inteligente-para-medicao-de-qualidade-da-agua/>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- OBILO, E.I e AMADI, E. **Test for Significance of Pearson's Correlation Coefficient (r)**. International Journal of Innovative Mathematics, Statistics & Energy Policies 6(1):11-23, Jan-Mar, 2018.
- OFFIONG, M., ABDULLAHI, A., CHILE-AGADA, N., RAJI-LAWAL, Y., e NWEZE, O. 2014. **Real Time Monitoring Of Urban Water Systems for Developing Countries**. IOSR Journal of Computer Engineering. 16. 11-14. 10.9790/0661-16321114.
- PANDAS, 2020. **Pandas documentation**. 2020. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/index.html>. Acesso em: 02 ago. 2020.
- PARK, J.; KIM, K.T.; LEE, W.H. 2020. **Recent Advances in Information and Communications Technology (ICT) and Sensor Technology for Monitoring Water Quality**. Water 2020, 12, 510.

POMPÊO *et Al.* **Ecologia de reservatórios e interfaces**. 2015. São Paulo. Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo.

POSUDIN, Y. **Methods of Measuring Environmental Parameters**. 2014.

RAUT, V. e SHELKE, S. 2016. **Wireless acquisition system for water quality monitoring**. Conference on Advances in Signal Processing (CASP), Pune, 2016, pp. 371-374, doi: 10.1109/CASP.2016.7746198.

RAJU, K. AND G. K. VARMA. 2017. **Knowledge Based Real Time Monitoring System for Aquaculture Using IoT**. IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC) (2017): 318-321.

RIÇATO, F. T. **Proposta de um Sistema de Monitoramento em Tempo Real, para Estudos de Determinação de Economia de Energia, em Aquecimento Solar de Água**. Universidade Estadual de Londrina Centro de Tecnologia e Urbanismo Departamento de Engenharia Elétrica. 5 fev. 2018. Disponível em: http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2017_FilipeTravizaniRicato.pdf. Acesso em: 16 dez. 2019.

SAMPAIO, W. L. A. **Avaliando a Eficiência Energética de uma conexão com a Internet através do GPRS em um cenário IoT: Um estudo de caso com o SIM800L e o middleware DOJOT**. Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Curso de Redes de Computadores, Quixadá, 2018.

SANTOS, G. A. D.; MACHADO, G. J. C.; ALMEIDA JUNIOR, R. A.; SOUZA, M. S. **Internet of Things (IoT): Um Cenário Guiado por Patentes Industriais**. GESTÃO.Org - Revista Eletrônica de Gestão Organizacional, v. 13, n. Ed. Especial, p. 271-281, 2015.

SANTOS, J. W. e JUNIOR, R. C. L. **Sistema de Automatização Residencial de baixo custo Controlado pelo Microcontrolador ESP32 e Monitorado via smartphone**. Ponta Grossa, 2019.

SCHOBER, P.; BOER, C.; e SCHWARTE, L. A. **Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation**, Anesthesia & Analgesia. Maio 2018 - Volume 126 - 5 - p 1763-1768.

SEABORN. 2020. **Seaborn: statistical data visualization**. Disponível em: <https://seaborn.pydata.org/index.html>. Acesso em: 20 ago. 2020.

SHANTHOSAM, K. P.; LAKSHMI, G. S. e REVATHI, T. **Design of smart sensors for real time drinking water quality monitoring and contamination detection in water distributed mains**. International Journal of Engineering & Technology, 2018.

STANTON, Jeffrey M. (2001), "Galton, Pearson, and the peas: A brief history of linear regression for statistics instructors". Journal of Statistical Education, 9,3. Disponível em: <http://www.amstat.org/publications/JSE/v9n3/stanton.html>.

SUBRAMANIAN, A.; SILVA, L. B.; e COUTINHO, A. S.. **Aplicação de método e técnica multivariados para previsão de variáveis termoambientais e perceptivas**. Prod., São Paulo, v. 17, n. 1, p. 52-70, Abril. 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132007000100004&lng=en&nrm=iso. Access em: 10 Nov. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132007000100004>.

TAYLOR, R. **Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review**. Journal of Diagnostic Medical Sonography, vol. 6, no. 1, Jan. 1990, pp. 35–39, doi:10.1177/875647939000600106.

THIYAGARAJAN, K.; PAPPU, S.; VUDATHA, P. e NIHARIKA. A.V. **Intelligent IoT Based Water Quality Monitoring System**. International Journal of Applied Engineering Research, 2017.

VALENTE, J. P. S.; PADILHA, P. M.; SILVA, A. M. M. **Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu - SP**. Eclet. Quím., São Paulo, v. 22, p. 49-66, 1997. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-46701997000100005&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 21 nov. 2019.

VIJAYAKUMAR, N. e RAMYA, R. 2015. **The real time monitoring of water quality in IoT environment**. International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2015], Nagercoil, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCPCT.2015.7159459.

WIRANTO, G., MAULANA, Y. Y. , HERMIDA, I. D. P. , SYAMSU, I. e MAHMUDIN, D. 2015. **Integrated online water quality monitoring**. International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA), Kuala Lumpur, 2015, pp. 111-115, doi: 10.1109/ICSSA.2015.7322521.

WETZEL, R. G. **Limnology: Lake and River Ecosystems**. (3rd ed.). San Diego, CA: Academic Press, 2011.

WONG, B. P., KERKEZ, B. 2016. **Real-time environmental sensor data: An application to water quality using web services**, Environmental Modelling & Software, Volume 84, 2016, pág. 505-517, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.07.020>.

ZAVALA, M.A.L.; ZUNIGA, H.C.; MAHLKNECHT, J. Application of a Harmonized Water Quality Index. In: World Water Congress. **Anais...Canadá: International Water Association (IWA)**, p. 19-24. 2010. CD-ROM.

ZHOU, J., WANG, Y., XIAO, F., WANG, Y. e SUN, L. 2018. **Water Quality Prediction Method Based on IGRA and LSTM**. Water 10, no. 9: 1148