

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E
SANEAMENTO

DAIANE FERREIRA CAMPOS

SISTEMA AUTOMÁTICO DE DETECÇÃO DE PARÂMETROS DE
QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO EM TEMPO REAL

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO CARLOS-SP

2022

DAIANE FERREIRA CAMPOS

**SISTEMA AUTOMÁTICO DE DETECÇÃO DE PARÂMETROS DE
QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO EM TEMPO REAL**

*Dissertação apresentada à Escola
de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Ciências da
Engenharia Hidráulica e
Saneamento.*

*Orientador: Prof. Dr. Filippo
Ghiglieno*

SÃO CARLOS-SP

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ferreira Campos, Daiane

SISTEMA AUTOMÁTICO DE DETECÇÃO DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO EM TEMPO REAL / Daiane Ferreira Campos; orientador Filippo Ghiglieno. São Carlos, 2022.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. Monitoramento de Qualidade da Água. 2. Automação no Saneamento. 3. Internet das Coisas. 4. Água Digital. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **DAIANE FERREIRA CAMPOS**.

Título da dissertação: "Sistema automático de detecção de parâmetros de qualidade da água de abastecimento em tempo real".

Data da defesa: 14/06/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Dr. **Filippo Giovanni Ghiglieno**
(Orientador)
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Profa. Dra. **Cali Laguna Achon**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Prof. Titular **Jose Galízia Tundisi**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Dr. **Luiz Antonio Daniel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

Ao professor Filippo Ghiglieno que me orientou com muita dedicação, gentileza e paciência nesse desafio interdisciplinar que foi o mestrado. Muito obrigada por ter sido tão presente e necessário nesta jornada.

Ao professor Mário Mendiondo por todos os esclarecimentos de dúvidas e sugestões que foram fundamentais na minha pesquisa. Obrigada por estar sempre tão solícito.

Ao Júlio e toda equipe do laboratório de Saneamento. Obrigada por todo apoio, vocês foram fundamentais na concretização de meus experimentos.

À Sá e a Rose, por serem excelentes secretárias do PPGSHS. Obrigada por toda atenção ao longo do meu mestrado.

À USP por todo investimento na ciência e por toda estrutura física. À CAPES por me contemplar com uma bolsa de fomento e possibilitar a minha participação na pesquisa.

Às amigas que fiz em São Carlos. Obrigada por todo companheirismo e por tornarem meus dias mais leves.

À minha família, que agradeço e dedico com muito amor, em especial, à minha mãe, Rita Ferreira, que é minha maior fonte de inspiração. Obrigada mãe, a realização deste sonho é uma conquista nossa, pois nada seria possível sem sua força e seu grande amor. Agradeço e dedico ao meu pai Nivaldo Campos (*in memoriam*) que mesmo não presente fisicamente nesta dimensão, mantém-se presente em meu coração e faz parte de tudo que sou hoje. Agradeço aos meus irmãos, Diego e Dandara, e ao meu padrasto Amado, pelo apoio e força que me transmitiram todo esse tempo.

Aos demais familiares e amigos, agradeço a torcida e por acreditarem em mim. E obrigada por compreenderem minha ausência.

Por fim, agradeço ao meu Deus, o Criador, por todo cuidado com minha vida e com meu caminho. Sem Ele nada seria possível.

“Nada é permanente, exceto a mudança.”

Heráclito

RESUMO

CAMPOS, D. F. (2022). **Sistema Automático De Detecção De Parâmetros De Qualidade Da Água De Abastecimento Em Tempo Real**. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O monitoramento convencional da qualidade da água em sistemas de saneamento, realizado de maneira manual na saída do processo de tratamento, não é capaz de compreender o processo de degradação da qualidade da água no percurso da rede de abastecimento até a população, tornando necessário o desenvolvimento de tecnologias direcionada ao monitoramento da água. No entanto, nesta fase emergente dos sistemas de monitoramento automático da qualidade da água, as tecnologias de alto custo tornam-se inviáveis, principalmente por tratar de dispositivos que necessitam ser acoplados em vários pontos da rede de canalização, atrelado, na maioria das vezes, ao *déficit* econômico e recursos limitados de companhias de saneamento. Logo, o intuito desta dissertação foi apresentar um sistema de monitoramento em tempo real da qualidade da água em linha de canalização de baixo custo, *in situ*, e com capacidade de extrair parâmetros além dos determinados pelos sensores plotados, como o cloro. A metodologia é realizada através de experimentos em um ambiente que simula a linha de canalização, onde está instalado o protótipo que abrange um conjunto de sensores de monitoramento da qualidade da água em tempo real, capazes de detectar os parâmetros de OD, pH, T, ORP, CE e fluxo. Além destes, é utilizado os parâmetros de ORP e pH para desenvolver uma equação preditiva de concentrações de cloro residual livre. O desempenho do protótipo é apresentado de maneira positiva e satisfatória a nível de laboratório, sendo capaz de detectar parâmetros de qualidade da água em regime dinâmico e estimar o nível de desinfecção da água de abastecimento. Logo, esse sistema pioneiro no Brasil de monitoramento de qualidade da água de abastecimento em tempo real é capaz de trazer grandes vantagens socioeconômicas, visto que é capaz de aumentar a segurança alimentar com baixo custo de montagem. Sendo assim, é um importante passo para a concretização do conceito de cidades inteligentes e cidades sustentáveis.

Palavras-chave: Qualidade da Água; Automação no Saneamento; Monitoramento Ambiental; Internet das Coisas; Cidades Inteligentes.

ABSTRACT

CAMPOS, D.F. (2022). **Automatic System of Detection of Parameters of Quality of the Water Supply in Real Time**. Dissertation, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo.

Conventional monitoring of water quality in sanitation systems, performed manually at the end of the treatment process, is not capable of understanding the process of degradation of water quality in the course of the supply network to the population, making it necessary to develop technologies aimed at water monitoring. However, in this emerging phase of automatic water quality monitoring systems, high-cost technologies become unfeasible, mainly because they deal with devices that need to be coupled at various points of the plumbing network. Moreover, in most cases, to to the economic deficit and limited resources of sanitation companies. Therefore, this dissertation aimed to present a real-time monitoring system of water quality in a low-cost pipeline, in situ, with the ability to extract parameters beyond those determined by the plotted sensors, such as chlorine. The methodology is carried out through experiments in an environment that simulates the plumbing line where the prototype is installed, which includes a set of sensors for monitoring water quality in real-time, capable of detecting the parameters of DO, pH, T, ORP, CE, and flow. In addition to these, ORP and pH parameters are used to develop a predictive equation for free residual chlorine concentrations. The prototype's performance is presented positively and satisfactorily at the laboratory level, detecting water quality parameters in a dynamic regime and estimating the level of disinfection of the supply water. Therefore, the first real-time supply water quality monitoring system in Brazil can bring significant socioeconomic advantages, as it can increase food security with low assembly costs. Therefore, it is an essential step toward realizing the concept of smart cities and sustainable cities.

Keywords: Water Quality; Automation in Sanitation; Environmental monitoring; Internet of Things; Smart Cities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Fluxograma de Metodologia.....	30
Figura 3.1: Sistema estudado.....	37
Figura 3.2: Ordenação de Sensores.....	37
Figura 3.3: Fluxograma de funcionamento do Sistema.....	38
Figura 3.4: EZO's.....	39
Figura 3.5: Fluxograma de comunicação do Sistema.....	39
Figura 3.6: Leitura dos Sensores na plataforma Online.....	49
Figura 4.1: Ambiente experimental.....	56
Figura 4.2: Percentual de cloro presente como HOCl em função do pH e da T.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Estado da Arte.....	24
Tabela 2.1: Característica do Ambiente Experimental.....	31
Tabela 2.2: Especificações do sensor de OD.....	31
Tabela 2.3: Especificações do Sensor de Condutividade.....	31
Tabela 2.4: Especificações do Sensor de pH.....	32
Tabela 2.5: Especificações do Sensor de Temperatura.....	32
Tabela 2.6: Especificações do Sensor de ORP.....	32
Tabela 2.7: Especificações do Sensor de Fluxo.....	33
Tabela 3.1: Atraso de Processamento nas Leituras dos Sensores.....	41
Tabela 3.2: Custo da água digital do um sistema de monitoramento.....	42
Tabela 3.3: Produção de Água Digital em diferentes processos hidrológicos.....	42
Tabela 4.1: Características dos Sensores.....	56
Tabela 4.2: Características da fonte das amostras de água analisadas.....	58
Tabela 4.3: Leituras dos parâmetros de T, pH e ORP das amostras de água.....	59
Tabela 4.4: Correlações de Pearson dos experimentos da Água Tipo 1.....	60
Tabela 4.5: Correlações de Pearson dos experimentos da Água Tipo 2.....	61
Tabela 4.6: Análise de Variância.....	66
Tabela 4.7: Características da amostra de água do ponto extra.....	67
Tabela 4.8: Cloro estimado com a equação 3 usando medidas da tabela 7.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1: Média do intervalo de tempo entre as leituras dos sensores.....	41
Gráfico 3.2: Sistema de feedback da temperatura em leituras de pH.....	44
Gráfico 3.3: Sistema de feedback da temperatura em leituras de OD.....	44
Gráfico 3.4: Sistema de feedback da temperatura em leituras de CE.....	45
Gráfico 3.5: Desvio Padrão dos sensores de OD.....	46
Gráfico 3.6: Desvio Padrão dos sensores de ORP.....	46
Gráfico 3.7: Desvio Padrão dos sensores de CE.....	46
Gráfico 3.8: Desvio Padrão dos sensores de pH.....	47
Gráfico 4.1: ORP vs. pH das amostras da Água do Tipo 1.....	61
Gráfico 4.2: ORP vs. pH das amostras da Água do Tipo 2.....	62
Gráfico 4.3: Superfície 3D dos experimentos com Água do Tipo 1.....	63
Gráfico 4.4: Superfície 3D dos experimentos com Água do tipo 2.....	63
Gráfico 4.5: Superfície 3D entre ORP, cloro e T.....	64
Gráfico 4.6: Gráfico de contorno de Cloro vs. pH; ORP.....	65
Gráfico 4.7: Concentrações conhecidas e estimadas de cloro.....	67

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEPA	Agência de Proteção Ambiental dos EUA
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANOVA	Análise de Variância
CE	Condutividade elétrica
CI	Circuito Integrado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente,
CRL	Cloro Residual Livre
DPD	<i>N, N-dietyl-p-fenilenodiamina</i>
EC	<i>Electrical conductivity</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
GL	Graus de Liberdade
GPS	<i>Global Positioning System,</i>
I2C	Circuito Inter-Integrado).
IIE	Instituto Internacional de Ecologia
IoT	<i>Internet of Things</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NBR	Norma Brasileira
NEMRP	<i>Neuse Estuary Monitoring and Research Program</i>
OD	Oxigênio Dissolvido
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OLAF	Laboratório de Ótica e Fotônica
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organizações das Nações Unidas
ORP	<i>Oxydation Reduction Potential</i> - Potencial de Oxidação/Redução
PH	Potencial Hidrogeniônico
PPG-SHS	Programa de pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento
PTFE	Politetrafluoretileno

QM (Aj.)	Quadrado Médio (Ajustado)
SD	<i>Secure Digital</i>
SQ (Aj.)	Soma dos quadrados (ajustada)
T	Temperatura
TDS	Sólidos dissolvidos totais
TURB	Turbidez
UART	Transmissão e Recepção Assíncrona Universal
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo
Vs.	Versus
WADI Lab	<i>Water-Adaptive Design & Innovation Lab.</i>

LISTA DE VARIÁVEIS

E_H	Potencial de oxido-redução
h_D	Perda distribuída pela Fórmula Universal da Perda de Carga
h_L	Perda localizada
K_L	Coefficiente de perda localizada
α_{CE}	Desvio-padrão das medidas de CE
α_{OD}	Desvio-padrão das medidas de OD
α_{ORP}	Desvio-padrão das medidas de ORP
α_{pH}	Desvio-padrão das medidas de pH
D_i	Diâmetro interno
f	Fator de Atrito
g	Aceleração da gravidade
$H_t = Z_t$	Altura total
L_t	Comprimento total
Q	Taxa de transferência de calor
T	Taxa de transferência de trabalho
V	Velocidade
ρ	Massa específica

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.1. INTRODUÇÃO GERAL	15
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	15
1.3. OBJETIVOS.....	16
1.3.1. OBJETIVOS GERAIS.....	16
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
1.4.1. ÁGUA DIGITAL.....	17
1.4.2. INTERNET DAS COISAS E CIDADES INTELIGENTES.....	17
1.4.3. QUALIDADE DA ÁGUA E SANEAMENTO.....	18
1.4.4. REGULAMENTAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	20
1.4.5. PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA	20
1.4.6. ESTADO DA ARTE	23
1.5. REFERÊNCIAS	26
2. METODOLOGIA GERAL	30
2.1. CARACTERÍSTICA DO AMBIENTE EXPERIMENTAL.....	30
2.2. CARACTERÍSTICA DOS SENSORES	31
2.3. MANUAL RÁPIDO DE CALIBRAÇÃO	33
2.4. REFERÊNCIAS	34
3. ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO EM TEMPO-REAL BASEADO EM INTERNET DAS COISAS	35
3.1. INTRODUÇÃO.....	35
3.2. METODOLOGIA.....	36
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
3.4. CONCLUSÃO.....	49
3.5. REFERÊNCIAS	50
4. USO DE INTERNET DAS COISAS PARA ESTIMAR CLORO EM LINHA DE ABASTECIMENTO ATRAVÉS DE SENSORES DE POTENCIAL REDOX E PH	52
4.1. INTRODUÇÃO.....	52
4.2. METODOLOGIA.....	55
4.3. RESULTADOS	58
4.4. DISCUSSÃO.....	68
4.5. CONCLUSÃO.....	71

4.6. REFERÊNCIAS	73
5. CONCLUSÃO GERAL	76

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO GERAL

O produto da transformação é sempre o novo. Quando o novo vem, a percepção até do que é perpetuo muda. Pois quando está imerso em transformações, nada fica imune. Mesmo na ausência de modificações palpáveis e visíveis, haverá aquelas as quais são paulatinamente sentidas. Isso ocorre porque a existência de tudo que é conhecido está atrelada a complexidade desse grande sistema dinâmico denominado planeta Terra, que mesmo após milhares de anos não deixou de mudar.

O espaço natural se modificou, bem como, a estrutura e organizações de civilizações, logo, os recursos naturais também estiveram vulneráveis aos processos de reformação, seja em aspectos qualitativos, quantitativos, físicos, químicos ou mesmo conceitual.

A mudança abordada neste trabalho foi além do ponto de vista tecnológico, como também foi conceitual, direcionada ao recurso natural que assume diferentes fases em diferentes aspectos, a água. Porque, diga-se de passagem, a percepção da humanidade sobre a água flui em regime dinâmico e acompanha o próprio desenvolvimento humano.

Assim, sabendo que dentro da atual configuração de sociedade, os sistemas de saneamento estão entre os principais meios de conexão entre a água e as pessoas, através essencialmente do abastecimento hídrico. Fazendo com que, a visualização de diferentes percepções da água dentro deste sistema pode direcionar ao entendimento da transformação que está constantemente acontecendo. Logo, de acordo as novas percepções, é valido ressaltar, que a água vai além do que é tradicionalmente quantificada, sendo possível analisar e estabelecer uma dialética também com uma nova e potente vertente, denominada Água Digital.

Este trabalho traz uma demonstração de um sistema baseado em internet das coisas capaz de revolucionar a água digital no Brasil, principalmente nos aspectos qualitativo, com intuito de proporcionar clareza no processo de gerenciamento da água de sistemas de abastecimento.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos, onde este primeiro capítulo compreende a contextualização, trazendo a introdução geral, objetivos e referencial teórico.

Em seguida, no segundo capítulo é apresentada a metodologia geral, com as principais características do ambiente experimental e do sistema estudado.

Os resultados são apresentados em dois capítulos em formato de artigo, onde o capítulo 3 compreende os resultados referente ao primeiro e segundo objetivo específico, no que se refere ao funcionamento e compreensão do sistema de monitoramento de qualidade da água.

E o capítulo 4 apresenta os resultados referente ao terceiro e quarto objetivo específico, os quais, compreendem a análise dos dados coletados e determinação indireta do nível de desinfecção da água através da combinação de leituras realizadas pelos sensores.

O capítulo 5 traz a conclusão geral do trabalho realizado que resultou neste texto de dissertação.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVOS GERAIS

Estudar e realizar testes em laboratório do primeiro protótipo brasileiro que compreende um sistema de monitoramento em tempo real da qualidade da água de abastecimento em canalização, composto por sensores eletrônicos de baixo custo plotados em sistema embarcado, fazendo uso da tecnologia baseada em internet das Coisas.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o desempenho do sistema através das características de funcionamento, avaliando a granularidade temporal de execução e resposta, precisão, sensibilidade, pressão, resistência e protocolos de calibração de cada sensor;
- Otimizar o protótipo visando futura instalação na rede hídrica de distribuição e a manutenção, garantindo o bom funcionamento do sistema ao longo do tempo.
- Analisar o comportamento dos parâmetros de qualidade da água em diferentes condições do ambiente e avaliar a alteração da qualidade da água com o tempo de circulação.
- Desenvolver equação preditiva do nível de desinfecção das águas cloradas, através das combinações de dados extraídos pelos sensores instalados.

1.4. REFERENCIAL TEÓRICO

1.4.1. ÁGUA DIGITAL

Água digital é a expressão que descreve a transformação que está acontecendo no setor do saneamento, a qual baseia-se na coleta de informações através de dispositivos inteligentes em tempo real, sustentados em tecnologia de nuvem, móvel, infraestrutura inteligente, sensores, redes de comunicação e análises de grande quantidade de dados (IWA,2019). Desta forma, a digitalização da água refere-se à quantidade de *Bytes* armazenados em um sistema referente ao monitoramento dos recursos hídricos.

A água digital, água inteligente ou água 4.0 é como vem sendo mencionada essa revolução digital dos recursos hídricos. Esse progresso tecnológico traz ganhos expressivos em relação a produtividade, economia e manutenção, pois trata da transformação digital oriunda do conceito de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Big Data Analytics, Criptografia, Rastreabilidade, Realidade Aumentada, entre outras, que são capazes de elevar a indústria a um próximo nível (AESABESP, 2019).

Logo, a introdução de tecnologia e automação já é uma solução consolidada em diversos setores, bem como no setor de saneamento básico. Sendo comum que o controle destes sistemas seja realizado conforme ações programadas para manter-se operando em ponto ótimo (Legner,2019). Sendo perceptível que propagação da água digital encontra-se emergindo, mas a revolução da informação ocorreu a anos, no final do século passado, e é citada por Dollar (1994) como um período de reformatações profundas e difusas, destacando a natureza mutável da documentação.

1.4.2. INTERNET DAS COISAS E CIDADES INTELIGENTES

A concretização do desenvolvimento do conceito das cidades inteligentes, assiduamente conectadas à Internet, vem da aplicação das inovações tecnológicas para transformar a vida e o trabalho da comunidade, através do monitorando em tempo real de diversos compartimentos urbanos, como trânsito, segurança e o clima. De maneira que se apresenta como um ideal urbanístico com a promessa de agregar qualidade de vida, comunicação, gestão eficiente dos serviços e espaços, além de sustentabilidade (Payão e Santiago, 2018).

Onde o conceito primordial de cidade inteligente e consequentemente sustentável é direcionado pela coleta e negociação de dispositivos da Internet das Coisas (IoT) e aplicativos inteligentes para auxiliar e facilitar o cotidiano (Lu et al, 2021).

A ciência ambiental urbana enxerga tecnologia baseadas em Internet das Coisas como um caminho promissor capaz de fornecer métodos fundamentais para o planejamento, construção e gestão de cidades sustentáveis, cuja natureza é evidentemente complexa e multidisciplinar.

Logo, é necessário analisar os avanços tecnológicos que ocorrem no âmbito da Internet das Coisas e em relação à construção das cidades inteligentes, sob a perspectiva do conceito de desenvolvimento sustentável, para verificação dos potenciais benefícios ambientais, econômicos e sociais de sua implementação (Payão e Santiago, 2018). Visto que, muitos setores demandam reformatações e adaptações para permitir adequar-se ao conceito de cidades inteligentes.

Para exemplificar, há os sistemas tradicionais de saneamento, nos quais, normalmente não são capazes de identificar características específicas dos processos, nem de fornecer informações suficientes, acessíveis, confiáveis, precisas ou oportunas para a aplicação de tecnologias de tratamento apropriadas. O que traz a necessidade de maiores intervenções tecnológicas neste setor (Fatimah et. al, 2020).

Para suprir as necessidades, é necessário compreender que o desenvolvimento é constante e mutável, bem como a própria IoT, cujo avanços em suas teorias, métodos e tecnologias vem sendo continuamente aprimorados, com espaço para expansão e aplicação em uma diversidade de setores (Zhao et. al, 2013).

É importante destacar que a inserção de dispositivos inovadores e concretização de cidades inteligentes não é só uma estratégia de modernização do sistema de saneamento, mas também se enquadra como um instrumento de desenvolvimento social. Pois, segundo Havens (1971), o desenvolvimento traz consequências objetivas da mudança estrutural na sociedade, diferente da modernização que tende a direcionar e assentar apenas sobre a economia.

1.4.3. QUALIDADE DA ÁGUA E SANEAMENTO

A água potável e o saneamento tornaram-se, em 2015, um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU, com intuito de alcançar o acesso universal e equitativo a água potável e segura para todos, cuja meta, engloba a disponibilidade de água para consumo em condições livres de contaminação fecal ou química (UN, 2015). Dado que, os

aspectos qualitativos da água de abastecimento estão diretamente relacionados à saúde pública, pois, uma vez em desacordo com os padrões de potabilidade nacionais ou estabelecidos pela OMS, a água oriunda dos sistemas de saneamento pode apresentar-se como potencial via de contaminação em massa.

No Brasil, os parâmetros de qualidade da água produzida para abastecimento público nas ETA's são monitorados periodicamente, de maneira manual, na saída do processo de tratamento (BRASIL, 2021), no entanto, devido a variação desses parâmetros ao longo da rede de abastecimento, surge a necessidade de acentuar o processo de monitoramento através de artifícios tecnológicos implementados no percurso da água até a população. Visto que essa variação de qualidade pode ocorrer por fatores comuns, como temperatura, condições da tubulação, tempo de detenção da água, possíveis pontos de contaminação oriundos de ruptura do canal e ligações ilegais, além de outros fatores muitas vezes não identificados.

Embora muitos modelos de transporte de contaminantes tenham sido desenvolvidos, os processos que deteriora a qualidade da água na rede de distribuição seguem mal compreendidos, principalmente porque as tecnologias de detecção existentes tendem a não atender essa questão (Aisopou, 2012). O que torna o monitoramento em tempo real da qualidade da água em canalização uma deficiência global.

Contudo, mesmo diante os desafios de reformatações em um setor, as inovações tecnológicas de comunicação que surgiram recentemente com o desenvolvimento direcionado para a *IoT* (*Internet of Things*) pode impulsionar significativamente a evolução do sistema de monitoramento da qualidade da água (Chen e Han, 2018). A *IoT* é fundamental no processo de transformação da cidade tradicional para uma cidade inteligente, e é um potencial instrumento de concretização das cidades sustentáveis, visto que este conceito requer soluções assertivas que garantam a eficiência de muitos serviços e setores continuamente (Borgia, 2014). Portanto, os sistemas de monitoramento de água *in situ*, com transmissão de dados *on-line* e aquisição em tempo real apresentam facilidades não obtidas no campo ou laboratório (Lima et. al, 2011).

Nesta fase emergente dos sistemas de monitoramento da qualidade da água, as tecnologias de alto custo tornam-se inviáveis, principalmente por tratar de dispositivos que necessitam ser acoplados em vários pontos da rede de canalização, atrelado, na maioria das vezes, ao *déficit* econômico e recursos limitados de companhias de saneamento. Logo, este projeto tem o intuito de apresentar um sistema de monitoramento da qualidade da água em linha de canalização de baixo custo, *in situ*, com capacidade de extrair parâmetros além dos determinados pelos

sensores plotados, de maneira que contribua com tomadas de decisões mais assertivas dentro do sistema de saneamento e possibilite melhor gerenciamento dos recursos hídricos.

1.4.4. REGULAMENTAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

A resolução CONAMA no 357/2005 (BRASIL, 2005) estabelece a classificação das águas de acordo seu uso preponderante e determina o enquadramento das águas doces, salobras e salinas. Este enquadramento ocorre segundo os níveis de qualidade que os corpos hídricos deveriam possuir para atender às necessidades da comunidade e determina quando o recurso hídrico está apto para ser destinado ao abastecimento humano e o respectivo tratamento a ser aplicado.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) desempenha desde 2000, por meio da Lei nº 9.984 (BRASIL, 2000), o papel de reguladora das águas de domínio da União. Assim, os diversos setores usuários de recursos hídricos têm sido objeto da regulação da ANA. No entanto, na esfera do saneamento, sua atuação é devido à aprovação da Lei nº 14.026 de 2020 (BRASIL, 2020) referente ao novo marco legal do saneamento básico, onde foi determinada como responsável pela regulação do saneamento para contribuir com a edição de normas de referência, contendo diretrizes gerais.

O tratamento de água é regido de acordo a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

1.4.5. PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

- Oxigênio Dissolvido (OD)

A concentração de oxigênio proveniente da atmosfera dissolvida nos corpos hídricos é essencial para os organismos aeróbios e o principal parâmetro de caracterização dos efeitos da poluição da água. Sendo um indicador de qualidade da água, cujas variações estão associadas aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no ambiente natural aquático (Von Sperling, 1996). Normalmente para a manutenção da vida aquática aeróbia são necessários teores mínimos de oxigênio dissolvido de 2 mg/L a 5 mg/L (BRASIL, 2006).

A taxa de reintrodução de oxigênio dissolvido em águas naturais através da superfície depende das características hidráulicas e é proporcional à velocidade, no entanto, destaca a fotossíntese de algas como outra fonte importante de oxigênio nas águas (CETESB, 2018).

- Potencial Hidrogeniônico (pH)

O potencial hidrogeniônico (pH) indica a intensidade das condições ácidas ou alcalinas do meio analisado, através da avaliação da presença de íons hidrogênio (H^+). Sendo calculado em escala antilogarítma, abrange a faixa de valores de 0 a 14 (Von Sperling, 1996). O valor do pH influi na distribuição das formas livre e ionizada de diversos compostos químicos, além de contribuir para um maior ou menor grau de solubilidade das substâncias e de definir o potencial de toxicidade de vários elementos (BRASIL, 2014).

Em redes de abastecimento de água, o pH também influencia da estrutura, porque, de modo geral as águas de pH baixo tendem a ser corrosivas ou agressivas a determinados metais, paredes de concreto e superfície de cimento-amianto, e em contra partida, as águas de pH alto tendem a formar incrustações nas tubulações (Richter e Azevedo Neto, 1995).

A Portaria Portaria GM/MS nº 888 (BRASIL, 2021) estabelece que o pH da água esteja na faixa de 6,0 a 9,0 no sistema de abastecimento de água.

- Condutividade Elétrica (CE)

A Condutividade Elétrica (CE) depende da quantidade de sais dissolvidos na água e é aproximadamente proporcional à sua quantidade, cuja determinação possibilita uma estimativa rápida do conteúdo de sólidos de uma amostra (Richter e Azevedo Neto, 1995). Desta forma, a condutividade elétrica da água representa sua capacidade de transmitir a corrente elétrica em função da presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions. (BRASIL, 2006).

Enquanto as águas naturais apresentam teores de condutividade na faixa de 10 a 100 $\mu S/cm$, em ambientes poluídos por esgotos domésticos ou industriais os valores podem chegar até 1.000 $\mu S/cm$ (BRASIL, 2006).

- Potencial de Redução de Oxidação (ORP)

O potencial de redução e oxidação (ORP) mede a intensidade na qual os elétrons são capazes de serem transferidos entre as espécies componentes de uma solução (Skoog et. al., 2006). Logo, pode indicar a capacidade da água de se livrar de contaminantes (Pule et. al., 2017).

O ORP é indicado para monitorar pontos de rede de abastecimento em situações que seja difícil manter o cloro residual, para poder realizar reforço do fornecimento de cloro a essas áreas (White, 2010).

- Temperatura

A temperatura representa a energia cinética das moléculas de um corpo, no qual o seu gradiente é o fenômeno responsável pela transferência de calor em um meio (Halliday, 1916).

A variação da temperatura da água pode ser ocasionada por fontes naturais, através da radiação, condução e convecção ou por fontes antropogênicas, como despejos industriais e águas oriundas de torres de resfriamento (Von Sperling, 1996). De maneira que a temperatura exerce influência sobre outras propriedades, como, velocidade de reações químicas, redução da solubilidade dos gases e aumento da sensação de sabor e odor (Richter e Azevedo Neto, 1995).

- Cloro

O cloro é um elemento da família dos halogênios que nunca é encontrado não combinado na natureza. Estima-se que seja responsável por 0,15% da crosta terrestre na forma de cloretos solúveis, como sal comum (NaCl), carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e silvita (KCl) (White, 2010).

O cloro destaca-se dentre os principais desinfetantes usados nas Estações de Tratamento de Água, visto que a desinfecção é o processo em que utiliza um agente químico ou não químico com o intuito de eliminar microrganismos patogênicos presentes na água (Di Bernardo, 1993). Além do cloro gasoso, que é sua forma mais comum, o cloro pode ser empregado na desinfecção de água para consumo humano sob a forma dos seguintes compostos clorados: hipoclorito de sódio, hipoclorito de cálcio e dióxido de cloro (Di Bernardo, 1993).

A Portaria GM/MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021) determina que o teor mínimo de cloro em linha de canalização seja 0,2 mg/l de cloro residual livre, sem estabelecer limite máximo, no qual era indicado como 2 mg/l quando a Portaria de Consolidação 05/2017 (BRASIL, 2017) estava em vigor e determinava os parâmetros de qualidade da água.

- Reações de oxido-redução do Cloro

O mecanismo de reações de oxidação e redução é baseado na transferência de elétrons de uma substância para outra, de maneira que a redução ocorre quando a substância ganha elétrons e a oxidação quando são perdidos, assim, ocorre nas reações de compostos clorados com

contaminantes, pois sendo o cloro um oxidante, quando em contato com um contaminante, o cloro ganha elétrons e é reduzido a cloreto, deixando o contaminante oxidado (White, 2010).

Logo, utilizar o monitoramento do ORP e do pH para controlar a cloração contínua é uma estratégia eficiente, capaz de tornar o processo de desinfecção mais estável e eficaz (Yu, 2004)

O principal benefício em usar ORP na estimativa de desinfecção é a praticidade, pois a sonda pode ser inserida diretamente na água a ser analisada, sem necessidade de utilizar reagentes, análises titulométrica ou espectrofotométrica (Van Haute et. al., 2019).

1.4.6. ESTADO DA ARTE

O desenvolvimento de novos componentes eletrônicos no final dos anos 70 permitiram medições de parâmetros de qualidade da água através de sistemas de monitoramento, um exemplo disto são as unidades remotas de biosensorização automatizadas dos Estados Unidos da América (EUA) que avaliam as mudanças da qualidade de água em uma bacia hidrográfica, estando conectadas na plataforma de coleta remota de dados da Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço - NASA (MORGAN et.al, 1980).

Ainda nos EUA, programas como o NEMRP (2020) (*Neuse Estuary Monitoring and Research Program*) começaram atuar no monitoramento da qualidade das águas. A partir dos anos 2000 o NEMRP montou uma rede com dezenas de estações no rio Neuse, capazes de obterem as condições da coluna de água através de sondas biológicas e químicas, bem como, sensores meteorológicos em tempo real.

Devido aos eventos de 11 de setembro de 2001 nos EUA e as demais ameaças a população, o monitoramento em tempo real da qualidade da água nos sistemas de abastecimentos também ganhou mais atenção. Logo, Agência de Proteção Ambiental dos EUA (AEPA) financiou várias tecnologias direcionadas ao monitoramento online da água potável (Panguluri, 2005). Esta preocupação se estendeu em vários lugares do mundo.

Com inúmeros países empenhados em tecnologias de segurança hídrica, é possível afirmar que muitas tecnologias existentes e emergentes apresentam potencial para atuar no monitoramento da qualidade da água potável em tempo real em redes de abastecimentos (Storey et. al., 2011). No entanto, a falta de sistemas de sensores de baixo custo, ainda é um grande obstáculo no setor de saneamento (Aisopou et. al., 2012).

Mesmo diante os desafios tecnológicos, a China se destacou com desenvolvimento de sistemas de monitoramento e de alerta precoce da qualidade da água Hou et. al. (2013), onde pesquisas foram direcionadas a otimização energética dos sistemas de monitoramento, com intuito de torná-los autossustentáveis Luo HP et. al. (2015)

É explícito na literatura que os sensores de parâmetros físicos e químicos da água estão bem mais consolidados que os sensores microbiológicos, visto que as soluções das tecnologias para variáveis microbiológicas têm apresentado inúmeras limitações.

Contudo, a aquisição dos parâmetros tende a ocorrer cada vez mais assertiva nas novas tecnologias, visto que muitos sistemas automatizados permitem acoplar diferentes módulos de aquisição de dados, como o sistema de cruzeiro automático para monitoramento da qualidade da água desenvolvido por Zhu CY et. al. (2018), que contém módulos de aquisição dos parâmetros, bem como, módulo GPS e módulo de transmissão de dados, permitindo comunicação com o sistema através de um aplicativo Android.

Como o desenvolvimento de tecnologias ambientais segue em ascensão, na União Europeia, um sistema inteligente micro fluídico e nano habilitado para monitoramento da qualidade da água, denominado PROTEUS, é financiado pelo programa H2020, cujo intuito é investigar a integração inteligente de sensores químicos e físicos, auxiliados por mecanismos cognitivo com reconfiguração em tempo real. Desta forma, combina competências de sistemas inteligentes e tecnologias de sensores para o desenvolvimento no setor de serviços hídricos (PROTEUS, 2020).

Essas inovações deram espaço para o surgimento das estações de monitoramento de qualidade da água que fazem uso de tecnologia emergente já existente, com suporte de sistemas embarcados e tecnologia baseada em internet das coisas. Tornando possível a construção de sistemas de monitoramento com sensores comerciais disponível para a montagem. Nos quais, o desenvolvedor decide quais parâmetros monitorar e qual sistema embarcado ou sistema de controle será utilizado, bem como, quais os protocolos de funcionamento. A Tabela 1.1 traz o estado da arte com exemplos de pesquisas direcionadas a esses sistemas e suas respectivas características.

Tabela 1.1: Estado da Arte

ano	Autor	País	Objetivo	Sistema embarcado/ Microcontrolador	Parâmetros
2014	Lambrou et al.	Chipre	Monitoramento e Detecção de	PIC32 MCU	TURB, ORP, pH, EC e T

ano	Autor	País	Objetivo	Sistema embarcado/ Microcontrolador	Parâmetros
			Contaminação em Sistemas de Distribuição de Água Potável		
2015	Mohd Akmal Helmi et al.	Malásia	Bóia móvel para monitoramento da qualidade da água doce	Intel Atom N2600	T, pH e ORP
2015	Pandian & Mala	Índia	Monitorar qualidade de água	Arduino IDE	T, TURB, nível da água e salinidade
2015	Vijayakumar & Ramya	Índia	Monitorar água de abastecimento	Raspberry Pi B+	T, PH, TURB, CE e OD
2016	Geetha & Gouthami	Índia	Sistema simplificado para monitorar a qualidade da água	TI CC3200	ph, CE, TURB e nível da água.
2016	Silva Junior et al.	Brasil	Monitoramento de água doce com um veleiro robótico	Raspberry Pi	pH, CE, T, OD, e ORP
2016	Siyang & Kerdcharoen	Tailândia	Monitorar a qualidade de água doce com veículo não tripulado	Arduino Mega 2560	T, pH, OD, ORP e EC.
2018	Bhardwaj et al.	Índia	Monitorar qualidade de água potável em rede de abastecimento	Arduino Mega 2560	pH, EC, OD, ORP, T e salinidade
2018	Koparan et al.	EUA	Monitorar Qualidade da Água doces Usando um Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado	Arduino Mega 2560	T, CE, OD e pH
2018	Moparathi et al.	Índia	Monitorar qualidade de água potável	Arduino	pH
2019	Chowdury et al.	Bangladesh	Monitorar a qualidade da água do rio em tempo real	Arduino	pH, CE e TURB
2019	Qasem et al.	Kuwait	Monitoramento e detecção de derramamentos de óleo na água do mar	Raspberry Pi 3	ORP, EC, OD e T
2021	Lin et al.	Taiwan	Monitoramento da qualidade da água da aquicultura	Módulo ESP-32	T, pH, OD e CE
<u>2021</u>	P. Khatri et al.	Índia	Monitorar qualidade da Água em regiões rurais	Raspberry Pi	pH, CE, OD, ORP e T

1.5. REFERÊNCIAS

AESABESP. Indústria 4.0 e precariedade num cenário de contrastes. 2019. Documento Eletrônico: <https://www.aesabesp.org.br/2019/03/29/industria-4-0-e-precariedade-num-cenario-de-contrastes/>

Aisopou A, Stoianov I, Graham NJ. In-pipe water quality monitoring in water supply systems under steady and unsteady state flow conditions: a quantitative assessment. **Water Research**. 2012 Jan;46(1):235-246. DOI: 10.1016/j.watres.2011.10.058.

Bhardwaj, Jyotirmoy; Gupta, Karunesh K ; Khatri, Punit. (2018). Real Time Assessment of Potable Water Quality in Distribution Network based on Low Cost Multi-Sensor Array. OP Conf. Series: Materials Science and Engineering 331 (2018) 012027 doi:10.1088/1757-899X/331/1/012027

Borgia, E., 2014. The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications* 54, 1–31.. doi:10.1016/j.comcom.2014.09.008

BRASIL, Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 março. 2005. Acesso em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>

BRASIL. Casa Civil. LEI No 9.984, DE 17 DE JULHO DE 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 jun. 2000. Acesso: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19984.htm

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS – Brasília: Funasa, 2014. Acesso: www.saude.gov.br/bvs

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria Gm/Ms Nº 888, De 4 De Maio De 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 04 maio. 2021. Acesso: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano – Brasília : Ministério da Saúde, 2006. ISBN 85-334-1240-1

BRASIL. Secretaria-Geral. LEI Nº 14.026, DE 15 DE JULHO DE 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Acesso: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm

- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Escola Superior da CETESB: Gestão do Conhecimento Ambiental. **Fundamentos de Controle de Poluição da Águas**. São Paulo - Novembro de 2018.
- Chen, Y., Han, D., 2018. Water quality monitoring in smart city: A pilot project. *Automation in Construction* 89, 307–316. doi:10.1016/j.autcon.2018.02.008
- Chowdury, M. S. U., Emran, T. B., Ghosh, S., Pathak, A., Alam, M. M., Absar, N., ... Hossain, M. S.. (2019). IoT Based Real-time River Water Quality Monitoring System. *Procedia Computer Science*, 155, 161–168. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.025>
- Di Bernardo, L. **Métodos e Técnicas de tratamento de água**, volume II - Rio de Janeiro: ABES, 1993. ISBN: 85-7022-112-6
- DOLLAR, Charles M. O impacto das tecnologias de informação sobre princípios e práticas de arquivos: algumas considerações. *ACERVO - Revista do Arquivo Nacional*. Rio de Janeiro. Vol. 7. 1994. ISSN 0102-700X
- Fatimah, Y. A., Govindan, K., Murniningsih, R., & Setiawan, A.. (2020). Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: A case study of Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122263. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122263>
- Geetha, S., & Gouthami, S.. (2016). Internet of things enabled real time water quality monitoring system. *Smart Water*, 2(1). <http://doi.org/10.1186/s40713-017-0005-y>
- Halliday, David, 1916-2010. Fundamentos de física, volume 2 : gravitação, ondas e termodinâmica / David Halliday , Robert Resnick , Jearl Walker ; tradução Ronaldo Sérgio de Biasi. – 10. ed. – Rio de Janeiro : LTC, 2016. Tradução de: *Fundamentals of physics*, 10th ed. ISBN 978-85-216-3206-1
- HAVENS, A. Eugene. Desenvolvimento e modernização: Uma contradição fundamental. *Rev. C. Sociais*, Vol. II N.º 2, 1971.
- Hou, D., Song, X., Zhang, G. et al. An early warning and control system for urban, drinking water quality protection: China's experience. **Environ Sci Pollut Res** 20, 4496–4508 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1406-y> ISBN: 978-0-470-18098-3
- IWA, THE INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION. **Digital Water**: Industry leaders chart the transformation journey. 2019. 43 p.
- Khatri, P., Gupta, K. K., Gupta, R. K., & Panchariya, P. C.. (2021). Towards the Green Analytics: Design and Development of Sustainable Drinking Water Quality Monitoring System for Shekhawati Region in Rajasthan. *MAPAN*, 36(4), 843–857. <http://doi.org/10.1007/s12647-021-00465-x>
- Koparan, C., Koc, A., Privette, C., & Sawyer, C.. (2019). Autonomous In Situ Measurements of Noncontaminant Water Quality Indicators and Sample Collection with a UAV. *Water*, 11(3), 604. <http://doi.org/10.3390/w11030604>
- Lambrou, T. P., Anastasiou, C. C., Panayiotou, C. G., & Polycarpou, M. M.. (2014). A Low-Cost Sensor Network for Real-Time Monitoring and Contamination Detection in Drinking

Water Distribution Systems. *IEEE Sensors Journal*, 14(8), 2765–2772.
<http://doi.org/10.1109/jsen.2014.2316414>

Legner, Carla. Automatização De Estações De Tratamento De Água E Efluentes. Revista TAE. Edição Nº 50 - agosto/setembro de 2019.

Lima, R. S., Santos, V. B. D., Guerreiro, T. B., Araújo, M. C. U. D., & Gaião, E. D. N.. (2011). Um sistema microcontrolado para o monitoramento on-line, in situ e remoto de pH, condutividade e temperatura de águas. *Química Nova*, 34(1), 135–139.
<http://doi.org/10.1590/s0100-40422011000100025>

Lin, J.-Y., Tsai, H.-L., & Lyu, W.-H.. (2021). An Integrated Wireless Multi-Sensor System for Monitoring the Water Quality of Aquaculture. *Sensors*, 21(24), 8179.
<http://doi.org/10.3390/s21248179>

Lu, M., Fu, G., Osman, N. B., & Konbr, U.. (2021). Green energy harvesting strategies on edge-based urban computing in sustainable internet of things. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103349. <http://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103349>

Luo H P, Li G L, Peng W F, Song J, Bai Q W. Real-time remote monitoring system for aquaculture water quality. *Int J Agric & Biol Eng*, 2015; 8(6): 136–143. DOI: 10.3965 / j.ijabe.20150806.1486

Mohd Akmal Helmi, A. H., Hafiz, M. M., & Shah Rizam, M. S. B.. (2014). Mobile buoy for real time monitoring and assessment of water quality.
<http://doi.org/10.1109/spc.2014.7086223>

Moparthi, N. R., Mukesh, C., & Vidya Sagar, P.. (2018). Water Quality Monitoring System Using IOT. <http://doi.org/10.1109/aeicb.2018.8480963>

Morgan, E. L., Herrmann, R., Eagleson, K. W., & McCollough, I. L. (1980). New Developments in Automated Biosensing from Remote Water Quality Stations and Satellite Data Retrieval for Resource Management. *Water International*, 5(1), 23-27.

Pandian, DR, & Mala, K. (2015). Dispositivo inteligente para monitorar a qualidade da água para evitar poluição no ambiente IoT. *Int J Emerging Tech Comput Sci Electron* , 12 (2), 120-125.

Panguluri, S., Hought, R. C, Patterson, C. Krishnan, R., Hall, J. Real-Time Remote Monitoring of Drinking Water Quality. **Impacts of Global Climate Change**. 2005.

Payão, J. V., & Santiago, M. R.. (2018). INTERNET DAS COISAS E CIDADES INTELIGENTES: TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E O PARADIGMA DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. *Revista De Direito Da Cidade*, 10(2).
<http://doi.org/10.12957/rdc.2018.31207>

PROTEUS. Acesso online: 2020. <http://www.proteus-sensor.eu/>

PULE, Mompoloki; YAHYA, Abid y CHUMA, Joseph. Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality. *J. appl. res. technol* [online]. 2017, vol.15, n.6, pp.562-570. ISSN 2448-6736. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.07.004>.

- Qasem, F., Susilo, T. B., Said, S., Alarbash, Z., Hasan, M., Jabakhanji, B., ... Alkork, S.. (2019). Preliminary Engineering Implementation on Multisensory Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV) for Oil Spills Surveillance. <http://doi.org/10.1109/biosmart.2019.8734217>
- Richter, Carlos A. Azevedo Netto, José. M. Tratamento de água - Tecnologia atualizada. São Paulo. Editora Edgard Blucher, 1ª reimpressão, 1995. ISBN:85-212-0053-6
- Silva Junior, A., Lima Sa, S., Santos, D., Negreiros, Á., Souza Silva, J., Álvarez Jacobo, J., & Garcia Gonçalves, L.. (2016). Towards a Real-Time Embedded System for Water Monitoring Installed in a Robotic Sailboat. *Sensors*, 16(8), 1226. <http://doi.org/10.3390/s16081226>
- Siyang, S., & Kerdcharoen, T.. (2016). Development of unmanned surface vehicle for smart water quality inspector. <http://doi.org/10.1109/ecticon.2016.7561370>
- Skoog, D.A.; West, D.M.; Holler F.J.; Crouch, S.R., Fundamentos de Química Analítica, Tradução da 8ª edição Norte-Americana, Thomson Learning, São Paulo, 2006
- Storey, Michael & van der Gaag, Bram & Burns, Brendan. (2011). Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems. *Water research*. 45. 741-7. 10.1016/j.watres.2010.08.049.
- UN Sustainable Development Goals: 17 goals to transform our world [Internet]. 2015. Acesso em 28/05/2021: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>
- Van Haute, S., Zhou, B., Luo, Y., Sampers, I., Vanhaverbeke, M., Millner, P., 2019. The use of redox potential to estimate free chlorine in fresh produce washing operations: Possibilities and limitations. *Postharvest Biology and Technology* 156, 110957.. doi:10.1016/j.postharvbio.2019.110957
- Vijayakumar, N., & Ramya, R.. (2015). The real time monitoring of water quality in IoT environment. <http://doi.org/10.1109/iciiecs.2015.7193080>
- Von Sperling, Marcos. Introdução à qualidade da águas e ao tratamento de esgotos / Marcos von Sperling - 2 ed. - Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.
- White ,G.C. **White's Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants**. (5th ed.), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey (2010)
- Yu, R.-F., 2004. Feed-forward dose control of wastewater chlorination using on-line pH and ORP titration. *Chemosphere* 56, 973–980.. doi:10.1016/j.chemosphere.2004.03.015
- Zhao, J., Zheng, X., Dong, R., & Shao, G.. (2013). The planning, construction, and management toward sustainable cities in China needs the Environmental Internet of Things. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 20(3), 195–198. <http://doi.org/10.1080/13504509.2013.784882>

2. METODOLOGIA GERAL

A metodologia desta dissertação é realizada através de experimento que simula a linha de canalização e que visa testar o protótipo localizado no Laboratório de Ótica, Lazer e Fotônica (OLAF) - UFSCar, utilizando um sistema que abrange um conjunto de sensores de monitoramento da qualidade da água em tempo real. Os experimentos são realizados com suporte do Laboratório de Saneamento (SHS/USP), do WADI Lab (SHS/USP) e do IIE. Este sistema é oriundo da parceria UFSCar/IIE e esteve em fase de montagem desde 2014. A realização do trabalho ocorreu em diferentes fases, como, o desenvolvimento do banco de comunicação, construção de protocolos de calibração, experimentos laboratoriais, aquisição dos dados e análise de dados.

As atividades experimentais serão realizadas seguindo as seguintes etapas demonstradas na figura 2.1 abaixo.

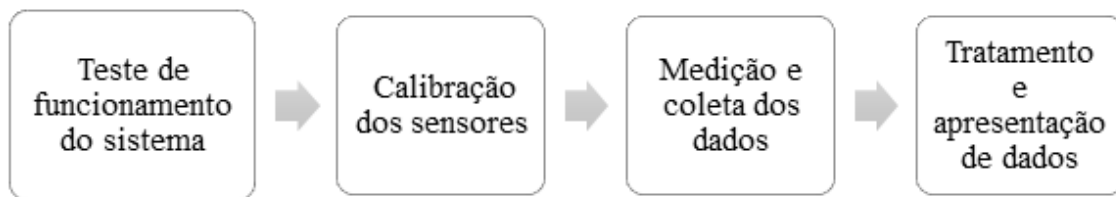


Figura 2.2: Fluxograma de Metodologia

2.1. CARACTERÍSTICA DO AMBIENTE EXPERIMENTAL

O protótipo disponível no laboratório consiste em um conjunto de equipamentos que permite realizar o experimento e levantar os dados de qualidade da água. O sistema que simula a linha de canalização é composto por um recipiente de acrílico que armazena a água a ser analisada, bem como, uma bomba d'água que bombeia a água pela tubulação que em parte do seu percurso possui a instalação do protótipo, que consiste em um conjunto de sondas de monitoramento de qualidade da água. A mesma água que circula na linha de canalização é utilizada no sistema de refrigeração da bomba, onde a transferência de calor acarreta aumento da temperatura e proporciona análises em diferentes faixas de temperatura. As características básicas do ambiente experimental são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Característica do Ambiente Experimental

Volume do Reservatório	39 L
Potência da bomba	34 W
Altura da Rede	33 cm
Comprimento da rede	433 cm
Diâmetro interno	2,54 cm
Faixa da vazão de funcionamento utilizada	6 a 15 L/min

2.2. CARACTERÍSTICA DOS SENSORES

Os sensores utilizados têm o objetivo de medir os parâmetros de OD, pH, temperatura, ORP e CE, além de estimar TDS. As características dos sensores disponíveis no laboratório e que compõe o protótipo são demonstrados nos tópicos abaixo, segundo o fabricante. Além desses, no sistema que simula a rede de distribuição possui instalado um medidor de vazão.

- Sensor de Oxigênio Dissolvido

Tabela 2.2: Especificações do sensor de OD. FONTE: Atlas Scientific.

Alcance	0 - 100 mg / L
Precisão	+/- 0,05 mg / L
Tempo de resposta	~ 0,3 mg / l / por segundo
Faixa de temperatura ° C	1 - 60 ° C
Pressão máxima	3.447 kPa
profundidade máxima	343 metros
Conector	SMA masculino / BNC masculino
Comprimento do cabo	1 metro
Tempo antes da recalibração	~ 1 ano
Expectativa de vida	5 anos +
Manutenção	~ 18 meses

- Sensor de Condutividade

Tabela 2.3: Especificações do Sensor de Condutividade. FONTE: Atlas Scientific.

Alcance	10 μ S / cm - 1 S / cm
Precisão	+ / - 2%
Tempo de resposta	90% em 1s
Faixa de temperatura ° C	1 - 110 ° C

Pressão máxima	200 PSI
profundidade máxima	60m (197 pés)
Conector	SMA masculino / BNC masculino
Comprimento do cabo	1 metro
Sensor de temperatura interno	Não
Tempo antes da recalibração	~ 10 anos
Expectativa de vida	~ 10 anos

- Sensor de pH

Tabela 2.4: Especificações do Sensor de pH. FONTE: Atlas Scientific.

Alcance	0 - 14
Resolução	+/- 0,001
Precisão	+/- 0,002
Tempo de resposta	95% em 1s
Faixa de temperatura ° C	-5 - 99 ° C
Pressão máxima	100 PSI
profundidade máxima	60m (197 pés)
Conector	SMA masculino / BNC masculino
Comprimento do cabo	1 metro
Tempo antes da recalibração	~ 1 ano
Expectativa de vida	~ 2,5 anos +
Incluído com a sonda de pH	1x adaptador SMA para BNC

- Sensor de Temperatura

Tabela 2.5: Especificações do Sensor de Temperatura. FONTE: Atlas Scientific.

Alcance	-200 toC a 850 °C
Tipo de sonda	Platina classe A, RTD
Precisão	+/- (0,15 + (0,002 * t))
Conector	BNC masculino
Tempo de reação	90% em 13s
Comprimento do cabo	81cm
Resultado	Analógico
Tempo antes da recalibração	3 - 5 anos
Expectativa de vida	15 anos

- Sensor de ORP

Tabela 2.6: Especificações do Sensor de ORP. FONTE: Atlas Scientific.

Faixa de medição	+/- 2000mV
Precisão	+/- 1mV
Tempo de resposta	95% em 1s

Faixa de temperatura ° C	1 - 80 ° C
Pressão máxima	100 PSI
profundidade máxima	60m
Conector	SMA masculino / BNC masculino
Tempo antes da recalibração	~ 1 ano
Expectativa de vida	2 anos +
Preço	\$ 115.00

- Sensor de Fluxo

Tabela 2.7: Especificações do Sensor de Fluxo. FONTE: DFRobot.

Pressão da água	<1,75 Mpa
Faixa de fluxo de água	1-30 L / min
Faixa de tensão	3,5 ~ 12 V
Precisão	± 5% (2 ~ 30L / min)
Faixa de umidade de trabalho	25% ~ 95% UR (sem geada)

2.3. MANUAL RÁPIDO DE CALIBRAÇÃO

Para medições precisas, foi necessário executar uma rotina de calibração adequada, seguindo as orientações dos fabricantes. Sendo analisado a derivação da leitura dos sensores em regime dinâmico, visto que as sondas foram fabricadas para funcionamento em regime estático.

- Sonda de condutividade

Como as sondas de condutividade não têm eletrólito que se esgota, elas só precisam ser calibradas durante a instalação. E apenas precisam ser recalibradas caso ultrapasse 10 anos de uso. Pode utilizar as soluções com concentração de 12.880µS e 150.000µS para calibração dos sensores que trabalham em água de abastecimento.

- Sonda de Oxigênio Dissolvido

Para sonda de OD, o tempo de recalibração é de 1 ano com a Solução Eletrolítica contendo 0 mg/mL de oxigênio, usado para calibrar a extremidade inferior da escala de oxigênio.

É indicado substituir a solução eletrolítica e a membrana PTFE a cada 1 - 2 anos.

Para recondicionar a sonda de oxigênio dissolvido: Durante o uso, uma pequena quantidade de solução eletrolítica dentro da sonda de oxigênio dissolvido vai se esgotar. Nesse caso, precisará adicionar mais solução à sonda.

- Sonda de pH

Na utilização da sonda em ambiente que com níveis fracos de ácidos e bases, só é preciso recalibrar a sonda uma vez por ano durante os primeiros dois anos. Depois disso, a cada seis meses. Utiliza-se solução tampão de pH 4.0, 7.0 ou 10.0.

- Sonda de Temperatura

O conjunto pode ser calibrado utilizando um único ponto em qualquer temperatura conhecida, desde que se tenha certeza da temperatura da solução. Um exemplo, seria a calibração do conjunto utilizando como referência o ponto de ebulição da água (100°C), em condições conhecidas de pressão.

- Sonda de ORP

Na utilização da sonda em ambiente que com níveis fracos de ácidos e bases, só é preciso recalibrar a sonda uma vez por ano durante os primeiros dois anos. Depois disso, a cada seis meses. Usar a solução de calibração $225 \pm 2,0\text{mV}$ a 25°C .

2.4. REFERÊNCIAS

AtlasScientific. <https://atlas-scientific.com/> <Acesso: 03/2022> [Referência Online]

DFRobot. <https://www.dfrobot.com/> <Acesso: 03/2022> [Referência Online]

3. ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO EM TEMPO-REAL BASEADO EM INTERNET DAS COISAS

Daiane Ferreira Campos, Danilo Nascimento, José Galizia Tundisi, Eduardo Mário Mendiondo, Filippo Ghiglieno

RESUMO

Diante a vulnerabilidade da alteração da qualidade da água ao longo da rede de abastecimento, surge a necessidade de acentuar o processo de monitoramento, tornando-o online e em tempo real. Logo, o objetivo deste artigo é apresentar o primeiro sistema brasileiro de monitoramento da qualidade da água direcionado a linha de canalização de distribuição de água, de baixo custo e *in situ*. O sistema é composto por um conjunto de sensores de OD, CE, T, ORP e pH, conectados a um sistema embarcado, onde é capaz de realizar leituras dos parâmetros de qualidade da água e enviá-las para uma plataforma online *IoT*.

3.1. INTRODUÇÃO

No Brasil, os parâmetros de qualidade da água produzida para abastecimento público nas ETA's são monitorados periodicamente, de maneira manual, na saída do processo de tratamento (BRASIL, 2021), no entanto, a qualidade da água está vulnerável à alterações ao longo da rede de abastecimento ocasionada por diversos fatores, como temperatura, condições da tubulação, tempo de detenção da água, possíveis pontos de contaminação oriundos de ruptura do canal e ligações ilegais, além de outros fatores muitas vezes não identificados.

Logo, surge a necessidade de acentuar o processo de monitoramento através de artifícios tecnológicos implementados no percurso da água até a população. Principalmente, porque os processos que deteriora a qualidade da água na rede de distribuição seguem mal compreendidos (Aisopou, 2012).

Para aumentar a segurança alimentar da população, mesmo diante os desafios financeiros, as inovações tecnológicas de comunicação que surgiram recentemente com o desenvolvimento direcionado para a *IoT (Internet of Things)* tem apresentado potencial para impulsionar significativamente a evolução do sistema de monitoramento da qualidade da água (Chen e Han,

2018). Pois, os sistemas de monitoramento de água *in situ*, com transmissão de dados *on-line* e aquisição em tempo real apresentam facilidades não obtidas no campo ou laboratório (LIMA et. al, 2011).

Nesta fase emergente dos sistemas de monitoramento da qualidade da água, as tecnologias de alto custo tornam-se inviáveis, principalmente por tratar de dispositivos que necessitam ser acoplados em vários pontos da rede de canalização, atrelado, na maioria das vezes, ao *déficit* econômico e recursos limitados de companhias de saneamento. Sendo assim, este artigo tem o intuito de apresentar o primeiro sistema brasileiro de monitoramento da qualidade da água direcionado a linha de canalização de baixo custo e *in situ*, de maneira que contribua com tomadas de decisões mais assertivas dentro do sistema de saneamento e possibilite melhor gerenciamento dos recursos hídricos.

3.2. METODOLOGIA

Foi realizado experimentos através de um sistema que simula a linha de canalização localizado no Laboratório de Ótica, Lazer e Fotônica (OLAF) - UFSCar, utilizando uma sonda multiparamétrica que abrange um conjunto de sensores de monitoramento da qualidade da água em tempo real.

- Protótipo do Sistema

O protótipo disponível no laboratório consiste em um conjunto de equipamentos que permite realizar o experimento e levantar os dados de qualidade da água, no qual está acoplado no sistema que simula a linha de canalização. A figura 3.1 apresenta uma representação do sistema onde são realizados os experimentos.

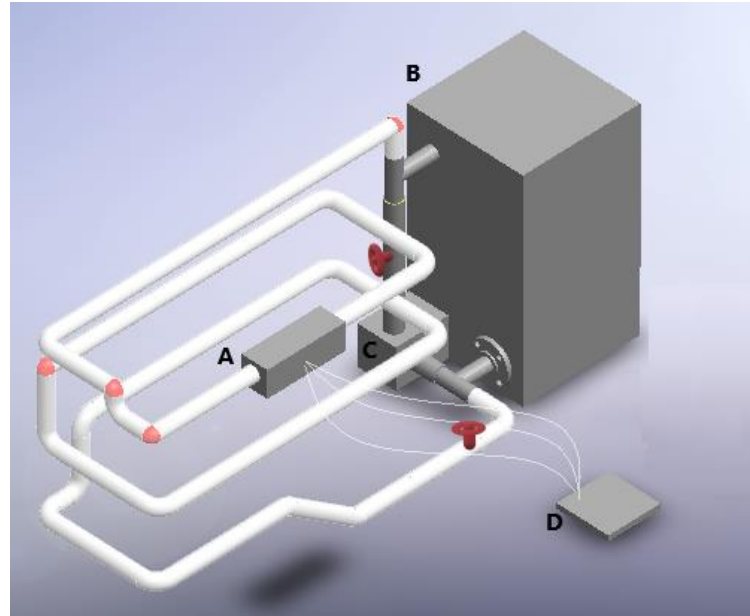


Figura 3.1: Sistema estudado. A) Protótipo (Caixa com sensores). B) Recipiente de armazenamento da água. C) Caixa da bomba. D) Microcontrolador (Arduino).

Os sensores do protótipo instalados na tubulação que simula a rede de distribuição de água no laboratório, ficam ordenados em sequência para minimizar as perdas e para facilitar a realização das análises de vários parâmetros em uma mesma amostra de água. A representação da instalação dos sensores é demonstrada na figura 3.2.

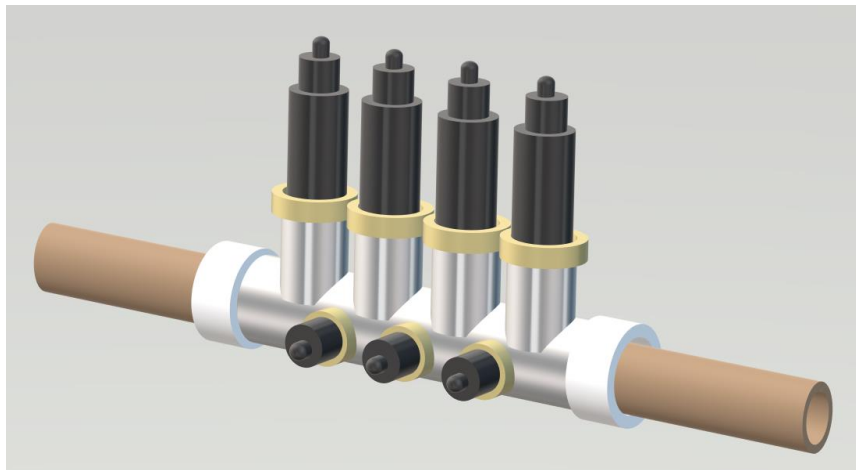


Figura 3.2: Ordenação de Sensores.

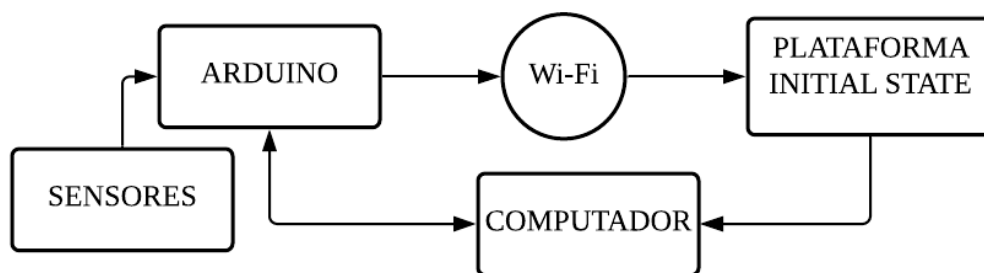
- Sensores

A sonda multiparamétrica é constituída de sensores de Oxigênio Dissolvido, pH, Temperatura, Potencial Redox e Condutividade, da marca Atlas Scientific. Na tubulação também há um sensor analógico de fluxo.

- Comunicação externa: Arduino e Nuvem

O sistema embarcado utilizado é o Arduino Yún, principalmente, porque integra placa Wi-Fi conjuntamente com o microcontrolador baseado no ATmega32u4 e no Atheros AR9331 e permite enviar dados em tempo real para nuvem apoiado por um servidor *IoT*.

Após a leitura dos sensores, a aquisição de dados pode ocorrer utilizando a tecnologia Wi-Fi que permite a transmissão de dados remotamente para um servidor web, apresentando os dados na plataforma *Initial State*, que se baseia em um provedor de serviços *IoT*, onde permite o depósito e transmissão de dados Arduino. Bem como, pode ocorrer *offline* através da impressão de dados diretamente no computador conectado com o Arduino via USB, além do backup local dos dados no cartão de memória conectado ao sistema embarcado, como mostrado na Figura 3.3.



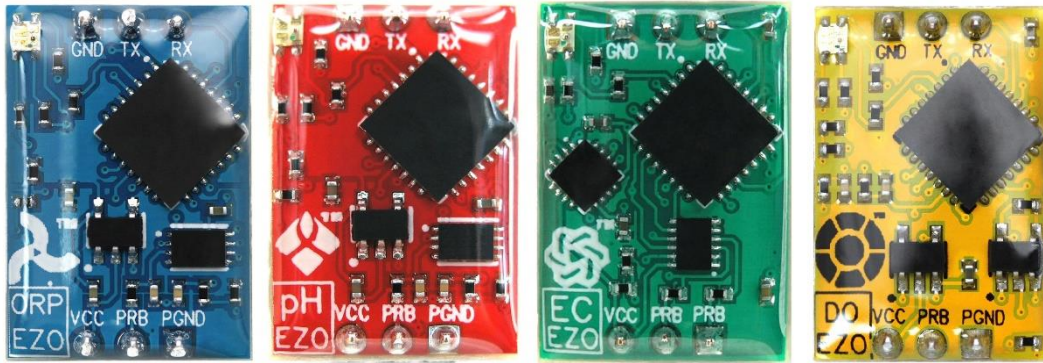
Figura

3.3: Fluxograma de funcionamento do Sistema.

- Comunicação Interna: Arduino e Sensores

Os sensores possuem interface para sistemas embarcados, que neste projeto será utilizado o Arduino. Quatro equipamentos desse sistema vêm acompanhados de placas de circuito. Essas pequenas placas ao receber o sinal dos sensores, armazenam as informações na memória, permitem realizar calibrações e atuam como conversores da comunicação serial com os microprocessadores e microcontroladores, através do modo Transmissão e Recepção Assíncrona Universal (UART) ou Circuito Inter-Integrado (I2C).

No sistema desenvolvido foi utilizado especificamente o modo I2C na comunicação dos sensores com o sistema embarcado, de maneira que cada EZO está denominado de acordo sua função, com endereço I2C padrão de DO97, Ph99, EC100, ORP98 para oxigênio dissolvido, potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica e potencial de oxidação e redução, respectivamente. As placas de circuito EZO são apresentadas na Figura 3.4.



Figura

3.4: EZO's. FONTE: Atlas Scientific, 2021.

O sensor de temperatura possui o protocolo de comunicação *I-Wire*, logo, para adequar ao protocolo I2C foi utilizado um circuito baseado no CI DS2482-100, que realizar conversão de protocolo bidirecional entre I2C e qualquer dispositivo *I-Wire*, onde o uso deste circuito requer a utilização de uma biblioteca *OneWire* modificada. O sensor de fluxo utilizado no sistema proposto emite pulsos elétricos com uma frequência proporcional ao fluxo de água e o circuito integrado PCF8593 é utilizado para contabilizá-los. Este CI comporta como um relógio digital que se comunica com o Arduino via I2C que habilita também a possibilidade de um pulso externo ser utilizado como *clock*. Essa fase da comunicação é apresentada na Figura 3.5.

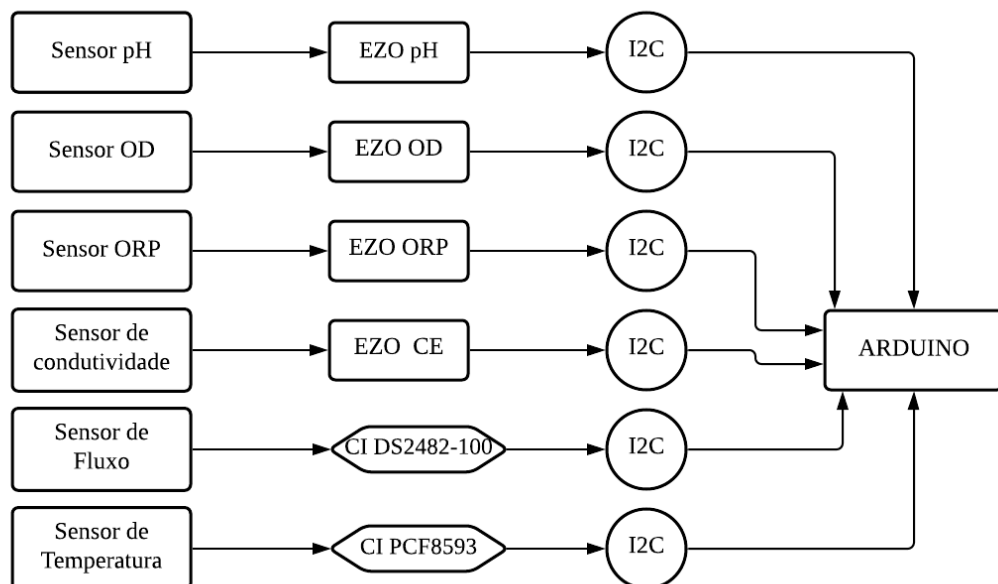


Figura 3.5: Fluxograma de comunicação do Sistema.

- Rotina de Calibração

Para medições precisas, foi necessário executar uma rotina de calibração adequada, seguindo as orientações dos fabricantes. Sendo analisado a derivação da leitura dos sensores em regime dinâmico, visto que as sondas foram fabricadas para funcionamento em regime estático.

- Experimento de funcionamento

A caixa de água do simulador foi preenchida com água potável comercial, de maneira que nos primeiros experimentos foram utilizados aproximadamente 15 litros. Em seguida, o sistema foi ligado e abastecido com a água da caixa que passa a percorrer a tubulação até alcançar o módulo de sensoriamento. O sistema foi programado para fazer leituras a cada 5 minutos e em cada leitura faz 5 repetições de cada parâmetro, para análises estatísticas.

Para as medições paralelas e em condição estática, os valores de pH foram comparados com o Papel Indicador Especial Ph 0-14 *Merck*, e a condutividade com o dispositivo Medidor de EC&TDS *Tickas*, enquanto a temperatura e ORP foram analisados do Medidor de ORP *Kmoon*.

- Tratamento dos Dados

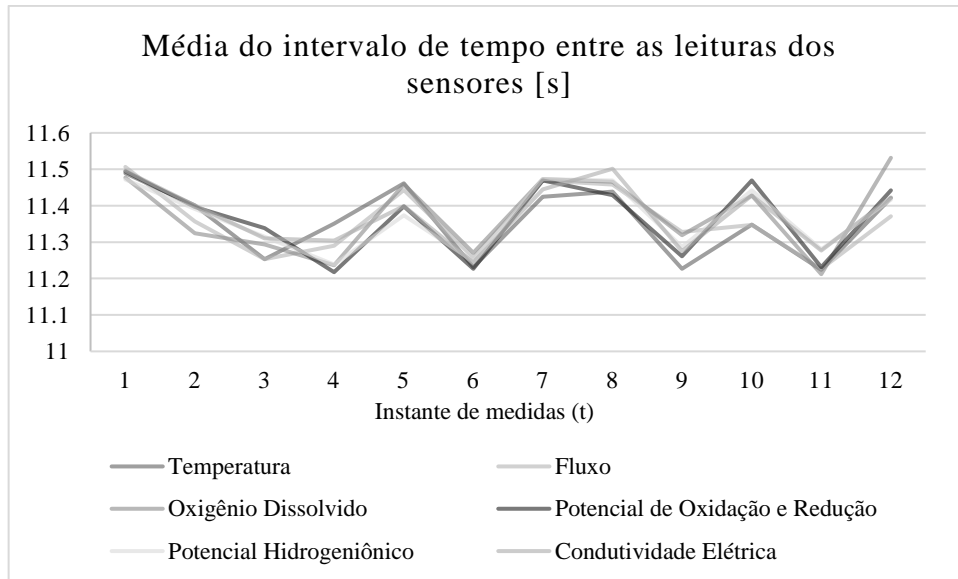
Para compreender a relação dos parâmetros analisados e comportamento do sistema de monitoramento foram aplicados testes estatísticos nos dados coletados usando o software estatístico *MiniTab*. Sendo possível determinar o tempo de resposta do sistema, a incerteza dos sensores em cada faixa de fluxo e temperatura através do desvio padrão móvel, a faixa de pressão e consequentemente analisar as melhores condições de funcionamento.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

- Tempo de resposta

Sabendo que a rotina de leitura do sistema consistiu em 5 medições de cada parâmetro dentro de aproximadamente 1 minuto, repetidamente a cada 5 minutos, é possível observar que cada leitura dos sensores seguem um intervalo de tempo padronizado, com variação de 11,2 a 11,6 segundos, como mostrado no gráfico 3.1.

Gráfico 3.1: Média do intervalo de tempo entre as leituras dos sensores.



Esse intervalo induz que o sistema não está submetendo alguns sensores a situações de estresse, pois, de acordo o fabricante, o sensor de pH e ORP são capazes de executar 95% da leitura em 1 segundo, e o sensor de CE executa 90% também em 1 segundo, no entanto, o sensor de temperatura e OD podem se comprometer com o ritmo submetido pelo próprio sistema, visto que, o sensor de temperatura necessita de 13 segundos para executar 90% da leitura, enquanto o sensor de OD tem seu tempo estabelecido de acordo a concentração a ser lida, conseguindo 0,3 mg/l/segundo. Outro fator importante a ser considerado no intervalo de medições é o atraso de processamento em cada leitura (*Delay*), mas que no caso desses sensores, se apresentaram não muito significativos estando entre 600 e 900 milissegundos como demonstrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Atraso de Processamento nas Leituras dos Sensores

	<i>Delay</i> [ms]
T	600
Fluxo	-
OD	600
ORP	900
pH	900
CE	600

Quando o intervalo de repetições foi modificado de 5 para 2 minutos, os sensores não conseguiram fechar o ciclo de 5 medidas em todos os pontos de leitura. De maneira, que os sensores que apresentaram maiores dificuldades de funcionamento neste ciclo de medições

foram o de pH, Temperatura e Condutividade Elétrica, onde informaram erro em 15,6%, 10,4% e 9,04% das leituras realizadas, respectivamente.

- Armazenamento de Dados (Água Digital)

As leituras dos sensores ficam armazenadas do cartão SD em formato .txt, nas quais necessitam de pouca capacidade de armazenamento. Logo, o funcionamento do sistema por 24 horas com leituras a cada 5 minutos e 5 repetições de cada parâmetro ocupa um espaço de 124 KB/dia, dentro de um ano de leituras contínuas, equivale a 116,6 MB/ano. O custo do possível armazenamento é apresentado na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Custo da água digital do um sistema de monitoramento de qualidade da água

Capacidade [GB]	Preço [\$]	Período de armazenamento [anos]
16	4,99 a 9,99	137
32	7,99 a 17,49	275

O custo de armazenamento do sistema de monitoramento de qualidade da água em tempo real é demasiadamente baixo, o que induz a possibilidade de alto com baixo investimento em memória.

Para exemplificar a relação de Água Digital e medições dos recursos hídricos, a tabela 3.3 aborda a quantidade de água digital produzida e registrada em diferentes situações/ processos hidrológicos. Sendo explícito que produção da água digital oscila de acordo os métodos, dispositivos, abrangência e frequência das medições.

Tabela 3.3: Produção de Água Digital em diferentes sistemas/processos hidrológicos

Quantidade água digital	Processo hidrológico medido	Método	População atendida (habitantes)	Quantidade de dispositivos / sistemas de monitoramento	Frequência de medição	Fonte
30,5 (Bytes/dia/pessoa)	Precipitação	Ground-based C-Band radar	141	2	5 min	Bray et al. 2008
4,3 (Kbs/dia/pessoa)	Precipitação, nível e velocidade da vazão	Pluviógrafo, Sensor de nível e velocidade da água	100.152	30	10 min	Sunkpho & Ootamakorn, 2011

4,0 (Kbs/dia)	Vazão	Sensores acusticos	936.425	1.600	24 h	Trimble, 2020.
50 bytes/dia/pessoa	Nível e precipitação	Sensor de nível e precipitação	5009	1	15 min	ANA, 2020.
6,63 bytes/dia/pessoa	Precipitação	Sensor de precipitação	253.094	7	10 min	CEMADE N, 2020.
5 bytes/dia/pessoa	Vazão e precipitação	Sensores de velocidade da água e precipitação	253.094	5 (2 - PLU ; 3 - FLU)	15 min	ANA, 2020
5 bytes/5min	Nível de rios e reservatórios/precipitação	Diferentes tipos	1.511.078	—	5 min	SAISP, 2020.

- Sistema de feedback: correção de medições com a temperatura

Como indicado pelo fabricante, os sensores de pH, ORP e CE realizam a correção dos dados a cada 2 graus de temperatura, devido ao sistema de feedback. Essa correção ocorreu sutilmente, sem apresentar grandes oscilações. Como demonstrado nos gráficos 3.2, 3.3 e 3.4.

No experimento dos gráficos abaixo, a temperatura variou de 18,5 °C a 25 °C. O primeiro círculo representa o ponto em que a temperatura aumentou para 20,5°C; o segundo círculo representa o ponto em que a temperatura aumentou para 22,5°C; o terceiro círculo representa o ponto em que a temperatura aumentou para 22,5°C.

O segundo e terceiro momento do feedback da temperatura com as medidas de pH são bem perceptíveis no gráfico 3.2, no entanto, pode-se perceber que a variação ocorre em uma escala de 0,01. Logo, o primeiro feedback das leituras de pH foi quase que imperceptível.

A atualização das leituras do sensor de OD também não demonstraram grandes oscilações do comportamento do parâmetro, sendo bem sutil.

Em relação as atualizações das leituras de CE, não fica perceptível devido a ausência de continuidade das medidas de condutividade, visto que, mesmo fora dos pontos de atualização do sensor, as leituras de condutividade oscilam fortemente.

Gráfico 3.2: Sistema de feedback da temperatura em leituras de pH.

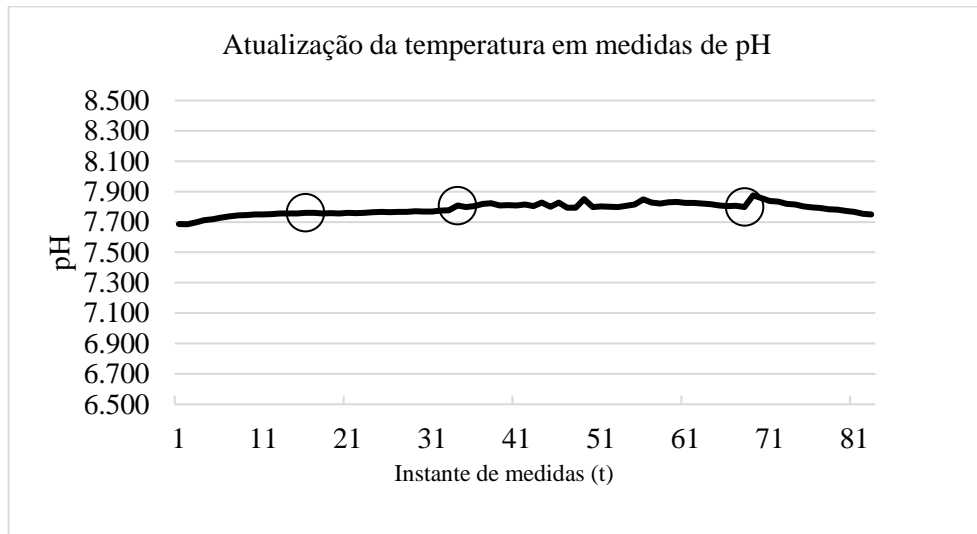


Gráfico 3.3: Sistema de feedback da temperatura em leituras de OD.

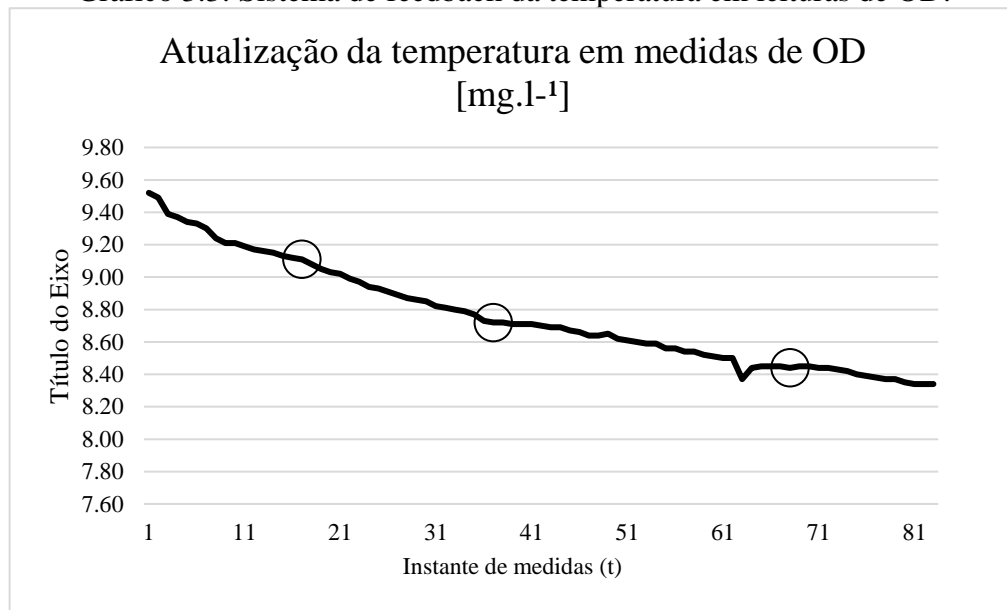
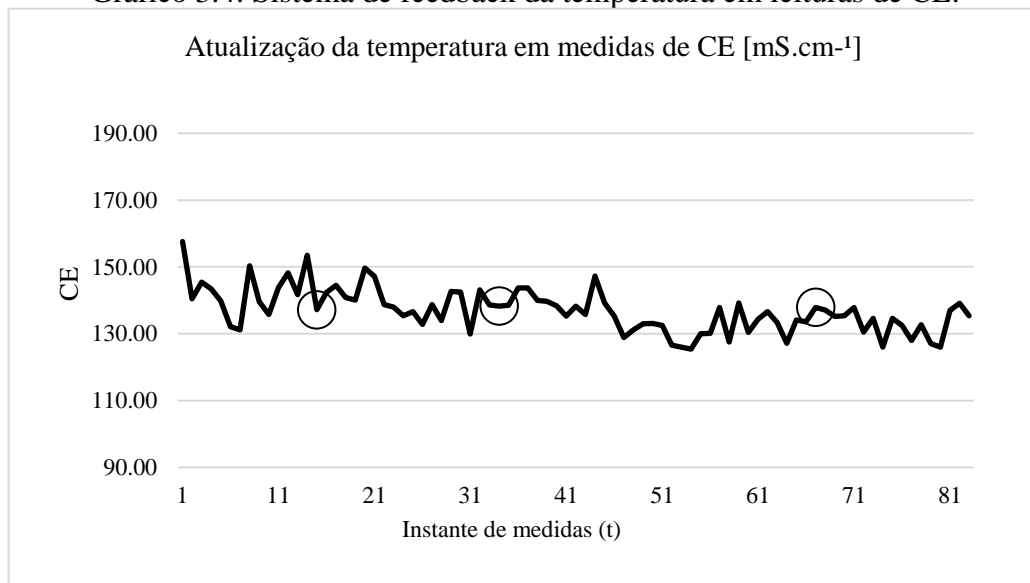


Gráfico 3.4: Sistema de feedback da temperatura em leituras de CE.



Os gráficos acima foram plotados com as sequências de leituras ao longo do funcionamento do sistema (aumento da temperatura).

- Desvio Padrão das leituras dos sensores em regime dinâmico

Sabendo que as sondas de monitoramento da qualidade da água utilizadas neste estudo são originalmente destinadas para funcionamento em regime estático, logo, para compreender as oscilações das leituras em regime dinâmico, foi analisado o desvio padrão das repetições realizadas no mesmo instante em diferentes vazões. O intuito destas observações foi compreender se há influência do fluxo nas oscilações dos sensores e, conseqüentemente, encontrar a melhor vazão de funcionamento.

Foram realizados experimentos em fluxos de aproximadamente 6,6 l.min⁻¹, 9,9 l.min⁻¹, 13,5 l.min⁻¹, 11,2 l.min⁻¹ e 7,5 l.min⁻¹. Os valores são aproximados devido ao caráter do sensor de fluxo, no qual é baseado em sistema de pulso. O comportamento do desvio padrão em diferentes vazões é apresentado nos gráficos 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8.

Gráfico 3.5: Desvio Padrão dos sensores de OD.

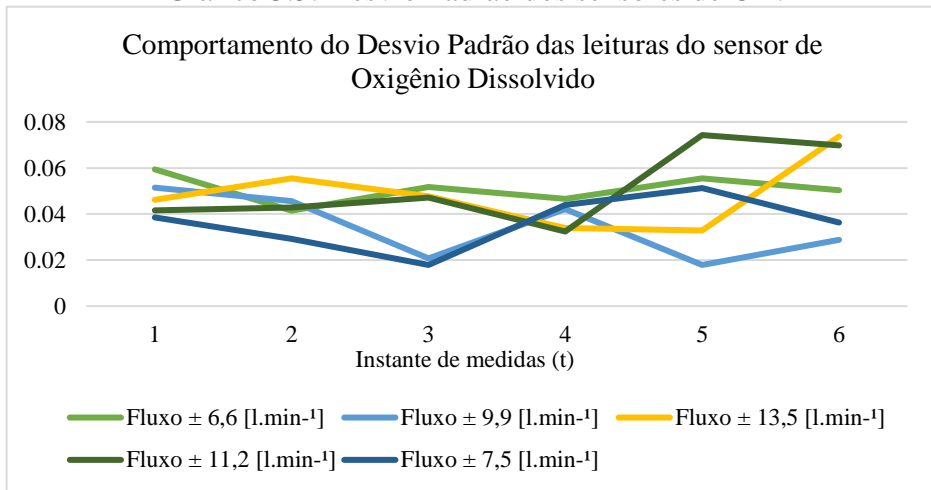


Gráfico 3.6: Desvio Padrão dos sensores de ORP.

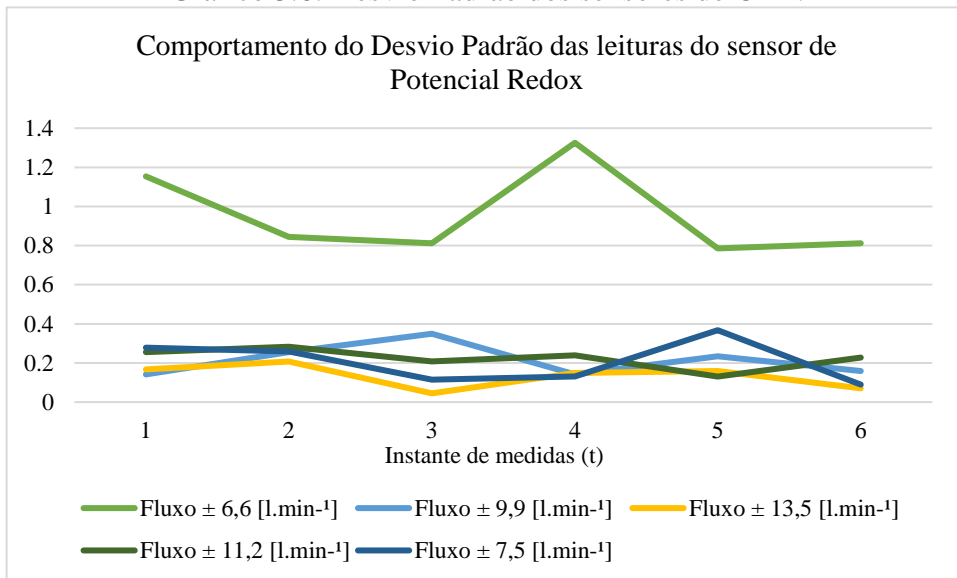


Gráfico 3.7: Desvio Padrão dos sensores de CE.

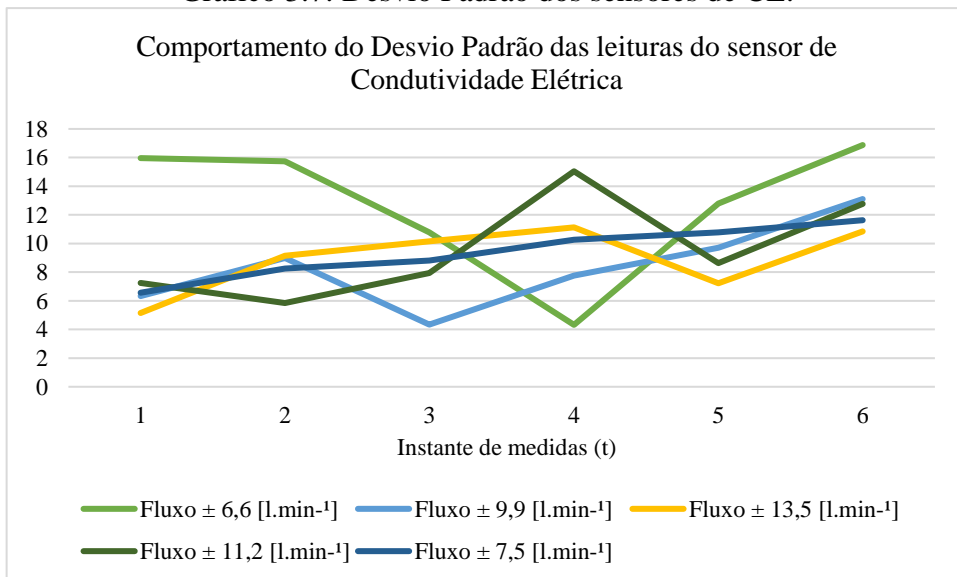
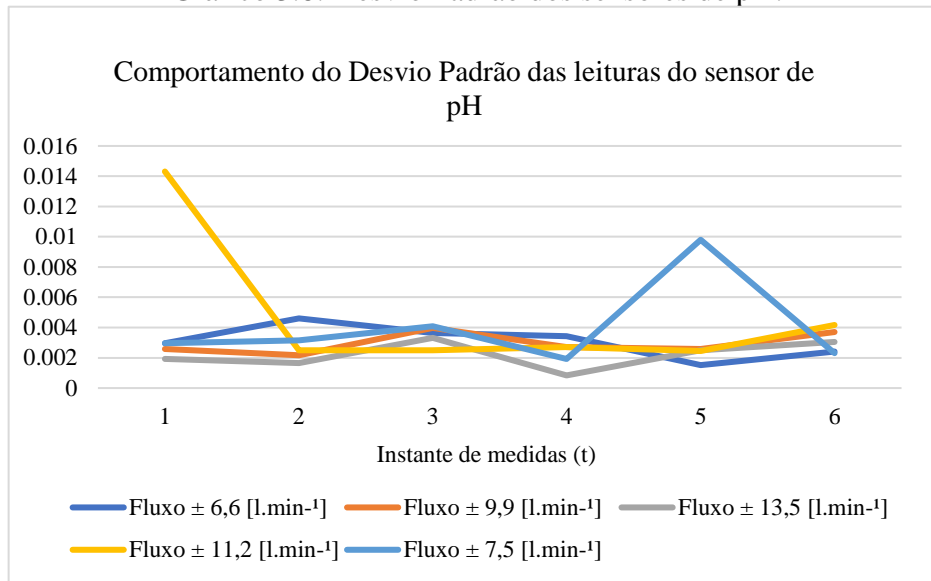


Gráfico 3.8: Desvio Padrão dos sensores de pH.



Com os desvios padrão da leitura dos sensores em diferentes fluxos de funcionamento do sistema, foi plotado uma regressão linear multiparamétrica tendo o fluxo como resposta e os desvios como preditores contínuos. Foi obtida a equação 3.1.

$$Fluxo = 10,87 + 8,0 * \alpha_{OD} - 5,21 * \alpha_{ORP} + 13,1 * \alpha_{pH} - 0,055 * \alpha_{CE} \quad (3.1)$$

No entanto, a ANOVA identificou que apenas um dos sensores, o ORP, demonstrou possuir relação significativa com as mudanças de fluxos submetidas. Assim, o desvio padrão de ORP possuiu um valor-p igual a 0,001. Em contrapartida, o valor-p do desvio padrão de OD, pH e CE foram 0,71, 0,50 e 0,58 respectivamente, acima de 0,05 e rejeitando a hipótese de influência da alteração de vazões do sistema.

Logo, para avaliar o fluxo ideal para o funcionamento do sensor de ORP, foi plotado a regressão do Fluxo como variável resposta e apenas o ORP como preditor contínuo. Foi encontrada a equação 3.2.

$$Fluxo = 10,638 - 4,83 * \alpha_{ORP} \quad (3.2)$$

Ao assumir o desvio padrão tendendo a zero, o valor ideal do fluxo de funcionamento foi de 10,63 l.min⁻¹. Como o sensor de fluxo é analógico e baseado em sistema de pulso, foi mantido valores de vazões entre 10 e 11 l.min⁻¹, garantindo a aproximação do valor encontrado nos próximos experimentos.

- Cálculo de pressão de funcionamento

Com base na primeira lei da termodinâmica adequada a volumes de controle, é obtida a equação 3.3, onde a taxa de variação temporal da energia total do sistema atrelada ao fluxo líquido de energia total na superfície de controle representa a soma da taxa de transferência de calor com a taxa de transferência de trabalho (Munson, 2004)

$$\frac{D}{Dt} \int_{sis} e \rho d v + \int_{sc} e \rho V \cdot \hat{n} dA = (Q + W) \quad (3.3)$$

Neste trabalho, o processo de escoamento da água na tubulação foi considerado adiabático, na qual torna a taxa de transferência de calor nula. Considerando apenas a taxa de transferência de trabalho, também conhecida como potência, como mostrado na equação 3.4.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} e \rho d v + \int_{sc} \left(\tilde{u} + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) e \rho V \cdot \hat{n} dA = W \quad (3.4)$$

Ao acrescentar a perda de energia disponível no escoamento, a equação de energia torna a equação de energia mecânica ou equação de Bernoulli estendida (Munson, 2004), demonstrada na equação 3.5, expressa em J/kg.

$$\frac{P_s}{\rho} + \frac{V_s^2}{2} + gz_s = \frac{P_e}{\rho} + \frac{V_e^2}{2} + gz_e + w_{eixo} - perda \quad (3.5)$$

Foram consideradas as perdas distribuídas e localizadas, utilizado a Fórmula Universal da perda de Carga, representada na equação 3.6, e a fórmula de perda localizada K, representada pela equação 3.7.

$$h_D = f \frac{L V^2}{D} \quad (3.6)$$

$$h_L = \sum K_L \frac{L V^2}{D} \quad (3.7)$$

Logo, para uma vazão de 10,63 L/min, potência da bomba de 34 W e as características do sistema que simula uma linha de canalização em PVC em dimensões miniaturizadas com Di= 1 pol, Lt= 433 cm, Ht=33 cm, 13 curvas de 90° e 1 válvula de gaveta aberta foi obtido um fator

de atrito de Moody de 0,017 e o desenvolvido a equação, na qual, resultou em uma variação de pressão dentro do sistema de 188.809,8 Pa, equivalente a 19,25 m.c.a.

Em uma situação real, a pressão em uma rede de abastecimento de água deve estar entre 10 e 50 m.c.a, segundo a NBR 12218 (ABNT, 2017). Desta maneira é possível perceber que o sistema suportaria as pressões mínimas da rede, no entanto, em relação ao fluxo intenso da água, é necessário estudos futuros para avaliar a robustez e resistência da sonda multiparamétrica.

- Plataforma Online

Ao conectar o sistema de monitoramento da qualidade da água na internet através do Wi-Fi, foi possível enviar as medidas dos sensores para plataforma *IoT*, Initial State, como mostrado na figura 3.6.



Figura 3.6: Leituras dos Sensores na plataforma online

3.4. CONCLUSÃO

Diante os resultados apresentados, é perceptível que este sistema demonstra grandes avanços para comunidade acadêmica e social, principalmente nesta nova fase do saneamento, na qual, prever muitas reformatações. Logo, o primeiro sistema de monitoramento de qualidade da água de abastecimento em tempo real do Brasil é capaz de trazer grandes vantagens socioeconômicas, visto que é capaz de aumentar a segurança alimentar com baixo custo de montagem. Sendo assim, é um importante passo para a concretização do conceito de cidades inteligentes e cidades sustentáveis.

3.5. REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 2017.
- Aisopou A, Stoianov I, Graham NJ. In-pipe water quality monitoring in water supply systems under steady and unsteady state flow conditions: a quantitative assessment. **Water Research**. 2012 Jan;46(1):235-246. DOI: 10.1016/j.watres.2011.10.058.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Sistema Hidro - Telemetria. 2020.
- AtlasScientific, 2020. <https://atlas-scientific.com/>
- Borgia, E., 2014. The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications* 54, 1–31.. doi:10.1016/j.comcom.2014.09.008
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria Gm/Ms Nº 888, De 4 De Maio De 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 04 maio. 2021. Acesso: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>
- Bray, M., Han, D., Cluckie, I., & Rico-Ramirez, M.. (2008). Analysis of weather radar and rain gauges for flood forecasting (pp. 1225–1230). <http://doi.org/10.1201/9780203883020.ch143>
- CEMADEN. Mapa Interativo da Rede Observacional para Monitoramento de Risco de Desastres Naturais do Cemaden. 2020. <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/>
- Chen, Y., Han, D., 2018. Water quality monitoring in smart city: A pilot project. *Automation in Construction* 89, 307–316. doi:10.1016/j.autcon.2018.02.008
- HAVENS, A. Eugene. Desenvolvimento e modernização: Uma contradição fundamental. *Rev. C. Sociais*, Vol. II N.º 2, 1971.
- <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/Default.html>
- LIMA, Renato Sousa; SANTOS, Vagner Bezerra dos; GUERREIRO, Thiago Brito; ARAËJO, Mário César Ugulino de; GAIÃO, Edvaldo da Nóbrega. Um sistema microcontrolado para o monitoramento on-line, in situ e remoto de pH, condutividade e temperatura de águas. *Química Nova*, [S.L.], v. 34, n. 1, p. 135-139, 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422011000100025>.
- Munson, Bruce R. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos / Bruce R. Munson, Donald F. Yong; Theodore H. Okiishi; tradução da 4ª edição americana: Euryale Zerbini -São Paulo: Edgard Blucher, 2004. ISBN 85-212-0343-8
- SAISP. Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. 2020. <https://www.saisp.br/estaticos/sitenovo/produtos.xmlt>
- Sunkpho, Jirapon & Ootamakorn, Chaiwat. Real-time flood monitoring and warning system. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*33 (2), 227-235, Mar. - Apr. 2011.
- Trimble. Wireless Leak Monitoring and Detection: PROACTIVELY MONITOR AND DETECT LEAKS ON A WATER NETWORK. SOLUTION DATASHEET. 2020 <https://www.trimblewater.com/>

UN Sustainable Development Goals: 17 goals to transform our world [Internet]. 2015. Acesso em 28/05/2021: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>

4. USO DE INTERNET DAS COISAS PARA ESTIMAR CLORO EM LINHA DE ABASTECIMENTO ATRAVÉS DE SENSORES DE POTENCIAL REDOX E PH

Daiane Ferreira Campos, Danilo Nascimento Guimarães, José Galizia Tundisi, Eduardo Mário Mendiondo, Filippo Ghiglieno.

Esta é uma versão adaptada (em português) do artigo submetido a Revista Ecohydrology & Hydrobiology (Elsevier).

RESUMO

O cloro é um dos principais desinfetantes usados nas Estações de Tratamento de Água, cujo monitoramento se restringe, na maioria das vezes a métodos manuais, devido à falta de recursos do setor de saneamento para adquirir novas soluções tecnológicas emergentes no mercado oriundas da quarta revolução industrial. Diante disso, esta pesquisa teve o objetivo de propor uma equação preditiva de cloro para água de abastecimento, através das medidas do potencial redox obtidas em uma estação de sensores de baixo custo controlado por sistema embarcado que utiliza tecnologia WiFi para envio de dados a nuvem em tempo real. Com este sistema foram realizados experimentos em laboratório, simulando a coleta das medições em tempo real e in situ. Sendo identificado que o ORP tem alta correlação com o cloro residual livre em água de abastecimento, bem como, foi desenvolvida uma equação preditiva de cloro em função dos seguintes parâmetros $\text{cloro} = f(\text{ORP}, \text{pH} * \text{ORP}, T)$. A equação obteve baixo desvio e bom ajuste.

4.1. INTRODUÇÃO

O conceito de Internet das Coisas (IoT) expressa o aumento da comunicação entre máquinas pela internet, o desenvolvimento de diversos utensílios inteligentes e microdispositivos, como sensores que, quando conectados, são capazes de captar dados do ambiente que está inserido e assim tornar partes integrantes da internet (Magrani, 2018). IoT dá acesso imediato a informações sobre objetos físicos e leva a um serviço inovador com alta eficiência e produtividade (Vijayakumar & Ramya, 2015).

É crescente o surgimento de pesquisas fazendo uso de tecnologias emergentes baseado em Internet das Coisas aplicadas a monitoramento de qualidade da água. Principalmente

direcionadas ao monitoramento de água doce, como, Khatri et. al (2021), Pandian & Mala (2015), Geetha & Gouthami (2016), Lin et. al (2021) que apresentaram sistemas desenvolvidos em laboratório capazes de monitorar parâmetros de qualidade da água, com sondas comerciais conectadas a sistemas embarcados e consequentemente enviar leituras para nuvem. Fazendo uso de tecnologia semelhante Chowdury et. al (2019) apresentou um sistema acoplado em Arduino que saiu do laboratório e monitorou a qualidade da água de rio em tempo-real, bem como, Mohd Akmal Helmi et. al (2014) que desenvolveu uma bóia móvel em placa Intel Atom N2600 para facilitar medições de água doce.

Diante disso, Siyang & Kerdcharoen (2016), Silva Junior et. al (2016) e Koparan et. al (2018) inovaram e conectaram seus sistemas de monitoramento de qualidade da água em tempo-real em veículos não tripulados, capazes de enviar medidas de vários pontos de um rio, lago ou reservatório. Na esfera do saneamento, Bhardwaj et. al (2018) direcionou seu sistema de monitoramento para água de abastecimento para consumo humano, realizando experimentos em regime estático, bem como, Lambrou et. al (2014) que inseriu sondas de monitoramento em uma canalização de baixo fluxo.

Os sistemas citados acima compreendem no monitoramento de parâmetros como pH, temperatura, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, potencial redox, turbidez e salinidade. No entanto, o uso de tecnologias baseada em IoT para monitorar o nível de desinfecção da água de abastecimento na rede de abastecimento permanece escasso.

A desinfecção de água é o processo fundamental para eliminar microrganismos patogênicos presentes na água e garantir a segurança para consumo (Di Bernardo, 1993). Na rede de abastecimento, as concentrações do cloro residual podem variar por diversos fatores como materiais e idade das tubulações, formações de biofilme e demais condições hidráulicas (Liu et. al, 2017), sendo fundamental o monitoramento para compreender o processo de degradação de desinfetantes da rede.

Como o cloro é um dos principais agentes de desinfecção de água nas estações de tratamento de água, muitos modelos de simulação computacional objetivam entender o transporte de cloro em sistemas de saneamento, no entanto, a qualidade dos resultados obtidos depende dos dados de entrada de pontos monitorados (Musz-Pomorska et. al, 2019). De maneira que ausência do monitoramento dificulta a compreensão da taxa de degradação do cloro e a adequação dos modelos.

As maiores dificuldades dos sistemas de abastecimento em monitorar o cloro na rede de abastecimento consiste, principalmente, no fato do método tradicional, o DPD (*N, N*-dietil-*p*-fenilenodiamina), ser baseado em colorimetria e necessitar de reagentes, impedindo o monitoramento em tempo-real, bem como, os baixos recursos do setor para adquirir os sensores automáticos de cloro disponível no mercado, devido ao caráter de alto custo.

Diante isto, o uso dos sensores comerciais de baixo-custo do potencial de oxidação-redução (ORP) vem sendo visto como um substituto promissor para medições de cloro residual livre, de maneira que seu funcionamento está relacionado à quantidade e força de oxidantes na água (Bergendahl & Stevens, 2005). Logo, o ORP é indicado para monitorar pontos de rede de abastecimento em situações que seja difícil manter o cloro residual, para poder realizar reforço do fornecimento de cloro a essas áreas (White, 2010), com intuito de manter a qualidade da água dentro dos padrões de potabilidade.

Assim, o principal benefício em usar ORP na estimativa de desinfecção é a praticidade, pois a sonda pode ser inserida diretamente na água a ser analisada, sem necessidade de utilizar reagentes, análises titulométrica ou espectrofotométrica (Van Haute et. al., 2019). Atrelado a isto, como o pH da água é um parâmetro que determina a solubilidade e disponibilidade biológica de produtos químicos e metais pesados, bem como, a produção de espécies oxidantes, é então, um parâmetro decisivo na relação ORP e cloro (Bonola et. al, 2020; Liao et. al, 2007; Pangloli & Hung, 2013). Desta maneira, Yu (2004) acredita que utilizar o monitoramento do ORP e do pH para controlar a cloração contínua é uma estratégia eficiente, capaz de tornar o processo de desinfecção mais estável e eficaz.

No entanto, apesar da disponibilidade da tecnologia, o uso dos sensores de ORP não está amplamente consolidado nas concessionárias de água potável por vários motivos, como, questões de confiabilidade dos eletrodos, ausência de regulamento e referência de uso (Copeland & Lytle, 2014). Visto que, algumas pesquisas indicam que o ORP consegue descrever o processo de desinfecção, mas os estudos são escassos e muitas vezes direcionados a desinfecção de efluentes e não a água potável, quando em água potável, não assumem regime dinâmico.

Temos como exemplo disto, Steininger e Pareja (1996) que realizaram um estudo para avaliar a resposta do ORP em água clorada em regime estático. Mais à frente, Kim et al. (2006) e Yu et. al (2008) estudaram uma estratégia de controle de dose de cloração de águas residuais usando titulação de pH e ORP on-line. Anteriormente, Bergendahl & Stevens (2005) avaliaram o

potencial redox como medida de eficácia de desinfecção para cloração de águas residuais, visto que sondas de ORP podem oferecer resultados em tempo real, enquanto medidas de cloro demandam mais tempo.

Van Haute et. al., (2019) estudaram a relação entre ORP e FC em água de lavagem de produtos frescos, onde desenvolveu uma equação preditiva de cloro residual livre na forma $\log\text{Cloro} = f(\text{ORP}, \text{ORP}^2, \text{ORP}.\text{pH})$ para águas de lavagem da indústria de alimentos.

Diante isto, este é o primeiro artigo que estudou o comportamento do ORP e pH em um sistema que simula uma linha de canalização, com o objetivo de propor uma equação preditiva de cloro direcionada a água de abastecimento público, através de experimentos realizados com sondas de baixo custo conectadas a um sistema embarcado, com medições online, in situ e em tempo real.

4.2. METODOLOGIA

- Sistema De Monitoramento Baseado Em *IoT*

Foi utilizado um sistema de monitoramento da qualidade da água em tempo real, baseado em tecnologia *IoT*. O ambiente do experimento, demonstrado na Figura 4.1, consiste em um conjunto de equipamentos que permite realizar as medidas e coletar os dados de qualidade da água desejados. O sistema que simula a linha de canalização é composto por uma caixa d'água que armazena a água a ser analisada, bem como, uma bomba d'água de baixa potência que bombeia a água pela tubulação que em parte do seu percurso possui a instalação do protótipo, que consiste em um conjunto de sensores multiparâmetros.

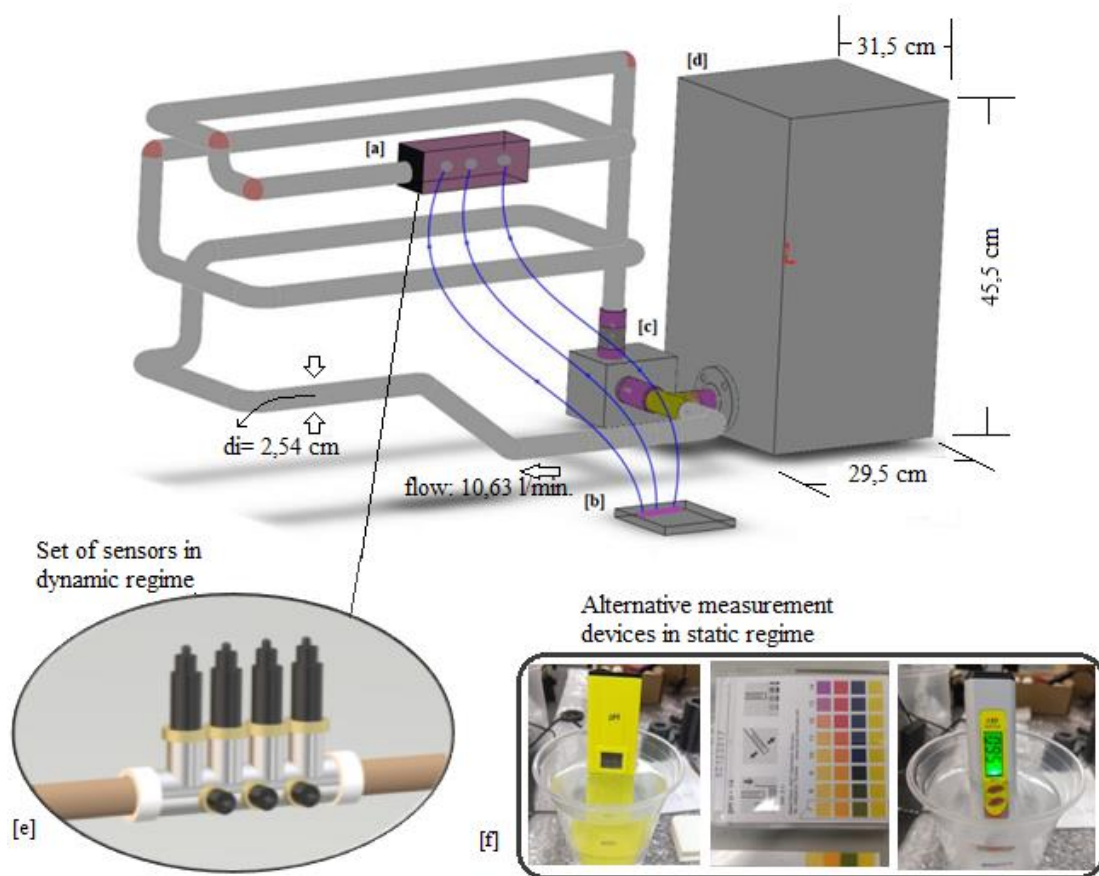


Figura 4.1: Ambiente experimental. [a] Caixa de sensores; [b] Sistema embarcado; [c] Bomba d'água; [d] Reservatório. [e] Ordenação dos sensores; [f] Dispositivos de medições paralelas.

No protótipo, dentre outros sensores, há os sensores de Potencial Redox, pH e Temperatura, onde suas características de acordo o fabricante são descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características dos Sensores.

	Sensor de ORP	Sensor de pH	Sensor de Temperatura
Alcance	+/- 2000mV	0 - 14	-200 °C a 850 °C
Precisão	+/- 1mV	+/- 0,002	+/- (0,15 + (0,002 * t))
Faixa de temperatura ° C	1 - 80 ° C	-5 - 99 ° C	-200 toC a 850 °C
Tempo antes da recalibração	~ 1 ano	~ 1 ano	3 - 5 anos

Expectativa de vida	~ 2 anos	~ 2,5 anos	3 - 5 anos
----------------------------	----------	------------	------------

- Água Clorada

As amostras de água clorada foram preparadas pelo Laboratório de Saneamento (SHS/USP) em 3 garrafas de 10 litros cada. Foram utilizadas 2 tipos de água comercial diferentes, nas amostras da água do Tipo 1, foram estabelecidas concentrações de 0,53 mg.l⁻¹, 1,64 mg.l⁻¹ e 2,97 mg.l⁻¹ de cloro residual livre em cada garrafa de água mineral, respectivamente, enquanto nas amostras de água do Tipo 2 foram estabelecidas concentrações de 0,78 mg.l⁻¹, 2,09 mg.l⁻¹ e 3,04 mg.l⁻¹ de cloro residual livre. Após preparadas, as amostras de água clorada foram deslocadas para o Laboratório de Óptica e Fotônica (OLAF/UFSCar) onde foram utilizadas para o experimento.

As concentrações variando entre 0,53 a 3,04 mg.l⁻¹ foram determinadas de acordo as faixas de concentrações comumente encontradas em água de abastecimento público, as quais são enquadradas na Portaria Gm/Ms Nº 888/2021, referente aos procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, que determina que o sistema de abastecimento de água deva manter o teor mínimo de cloro residual livre de 0,5 mg/L.

Para validar a faixa das medidas registradas e trazer maior confiança em relação a leitura dos sensores foram utilizados aparelhos externo em um momento pontual, para fazer medições paralelas em condição estática.

- Configuração Do Experimento

A caixa de água do ambiente do experimento foi inicialmente preenchida com a água potável comercial sem cloro, para obter as medidas do ponto sem cloro (CRLi=0). Em seguida, o sistema foi abastecido com a água da caixa que passa a percorrer a tubulação até alcançar o módulo de sensoriamento. O protótipo foi programado para fazer leituras a cada 5 minutos e em cada leitura faz 5 repetições de cada parâmetro. Após realizar medidas do ponto zero de cada amostra de água, foi realizado os experimentos com as amostras de água contendo concentrações de cloro residual livre separadamente, onde foi realizado a limpeza da caixa e da tubulação com amostras de água sem cloro destinadas a este fim, para não comprometer as

análises seguintes. A sequência de experimentos com cada tipo de água ocorreu em dias diferentes, seguindo o mesmo protocolo de limpeza.

Cada amostra de água circulou no ambiente experimental por aproximadamente 2h30min, para identificar a variação dos parâmetros de acordo a variação de temperatura, cujas medidas de pH, ORP e temperatura eram realizadas a cada 5 minutos. A caixa de água permaneceu fechada para evitar dissipação do cloro.

- Envio de Dados

O sistema embarcado comunica via WiFi com a plataforma de um servidor online direcionado a sistemas *IoT*, onde envia em tempo real as leituras dos parâmetros de qualidade da água para a nuvem. A plataforma permite coleta dos dados e oferece tratamento estatístico das informações coletadas, possibilitando apresentações gráficas dos resultados disponíveis para qualquer pessoa interessada que tenha o link da página virtual e acesso à internet.

- Análises Estatísticas

Foi aplicada a correlação de Pearson entre cloro, ORP, pH para compreender o grau de relação. Com auxílio do Excel foi elaborado os gráficos de dispersão e regressão linear entre as variáveis estudadas. Em seguida foi escolhido as melhores correlações para o modelo da regressão multivariada, no qual, foi construído no software estatístico Minitab 19. Foi calculada a Análise de Variância (ANOVA) do modelo de regressão multivariada para verificar o nível de significância do valor-p de cada parâmetro. Por fim, foi plotado os valores estimados pela equação com base nas medidas obtidas em um experimento de validação.

4.3. RESULTADOS

Foram realizadas sequências de análises com água de duas fontes diferentes, logo, as amostras de água assumem características originárias distintas, como demonstrada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Características da fonte das amostras de água analisadas.

Água mineral Fluoretada		
	Água Tipo 1	Água Tipo 2
Composição Química (mg/L)		
Bário	0,018	0,05
Cálcio	16,8	0,356

Magnésio	11,1	0,563
Potássio	1,24	2,43
Sódio	1,21	1,44
Fosfato	-	0,04
Bicarbonato	110,78	7,67
Fluoreto	0,05	0,03
Nitrato	0,77	2,69
Cloreto	0,11	0,65
Estrôncio	0,02	-
Composição Físico-Química		
Condutividade elétrica a 25°C (uS/cm)	143,5	21,1
pH a 25 °C	7,76	5,89
Resíduos de evaporação a 180 °C (mg/L)	109,95	35,84
Temperatura da água na fonte	17,9°C	24,2 °C
Radioatividade na fonte a 20°C e 760 mm de Hg (maches)	9,79	-

Com as amostras de água do Tipo 1 foram realizados experimentos com diferentes concentrações de cloro residual livre. O primeiro foi sem nenhuma concentração de cloro, denominado de CRL1=0, os outros 3 obtiveram concentrações de 0,53, 1,64 e 2,97 mg/L de cloro residual livre, denominados respectivamente por CRL=0,53, CRL=1,64 e CRL=2,97.

Bem como, foram realizadas 4 seqüências de experimentos com amostras de Água do Tipo 2. Onde, houve a amostra com zero concentração de cloro, denominada CRL2=0, e mais 3 amostras contendo 0,78, 2,09 e 3,04 mg/L de cloro residual livre, denominadas respectivamente de CRL=0,78, CRL=2,09 e CRL=3,04.

A Sequência de experimentos registrou faixas de leitura das amostras demonstradas na tabela 4.3, abaixo.

Tabela 4.3: Leituras dos parâmetros de Temperatura, pH e ORP das amostras de água analisadas.

Faixa de leitura dos experimentos			
Experimentos	T [°C]	pH	ORP
Água Tipo 1			

CRL1=0	25,5 - 26	7,85- 8,04	207-244
CRL=0,53	25 - 25,5	8,21 - 8,22	239 - 245
CRL=1,64	25,5 - 26,0	7,93 - 7,96	705 - 708
CRL=2,97	25,5 - 26,5	8,0 - 8,02	725 - 734
Água Tipo 2			
CRL2=0	26,5	6,8 - 6,9	276 - 259
CRL=0,78	27,5 - 28	6,9 - 7,0	662 - 716
CRL=2,09	26,5 - 27	7,4 - 7,7	795 - 810
CRL=3,04	26,5	7,8 - 7,9	817 - 823

- Relação do ORP com pH

A tabela 4.4 apresenta a correlação do ORP e pH das primeiras sequências de experimentos, no qual apresentou uma relação positiva apenas na amostra não clorada e uma relação inversamente proporcional em todas as medidas de água clorada. As correlações entre pH e ORP foram fortes em todas as análises.

Tabela 4.4: Correlações de Pearson dos experimentos da Água Tipo 1.

Experimentos	ORP x pH
CRL=0	0,993
CRL=0,53	-0,999
CRL=1,64	-0,976
CRL=2,97	-0,961

O gráfico 1 demonstra o comportamento do ORP e pH das sequências de experimentos das amostras de Água do Tipo 4.1.

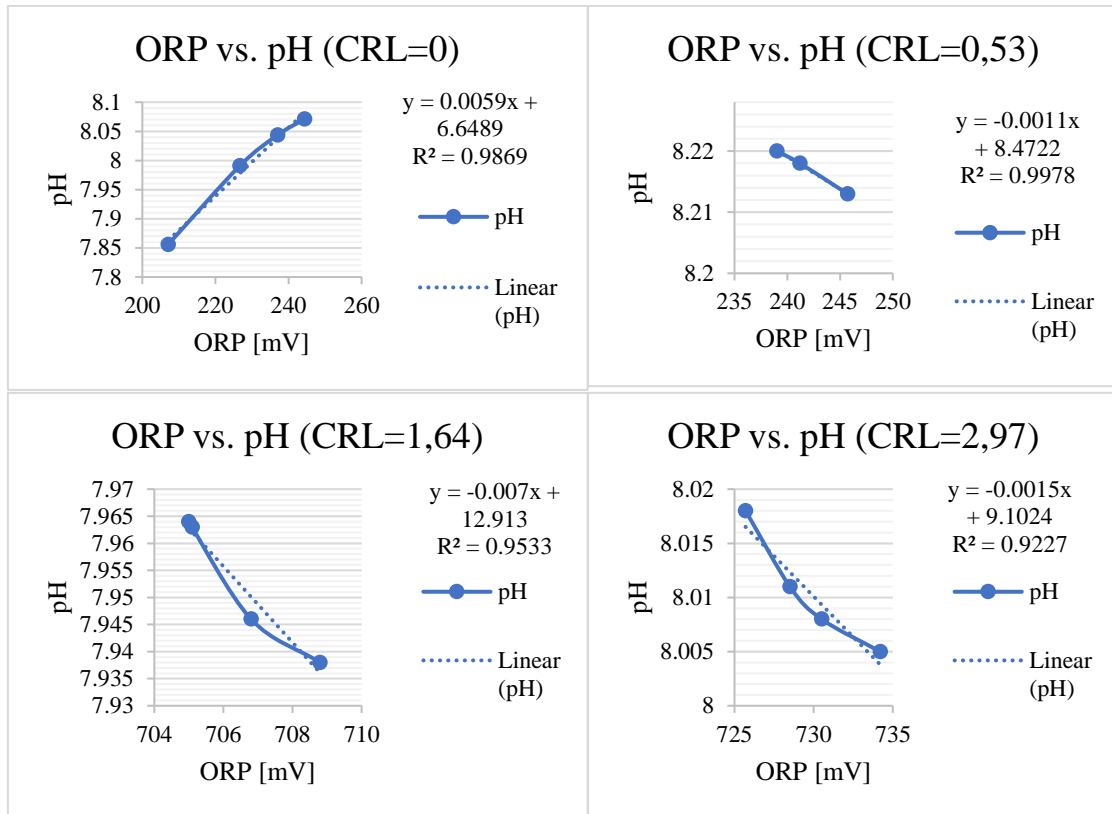


Gráfico 4.1: ORP vs. pH das amostras da Água do Tipo 1.

O comportamento do ORP e pH nas amostras de água do Tipo 2 foram bem semelhante ao encontrado nas análises da água do Tipo 1, onde a amostra não clorada apresentou correlação negativa enquanto as outras contendo teor de cloro residual livre apresentaram correlação negativa. Em todas as amostras a correlação de pH e ORP foram fortes, como demonstrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Correlações de Pearson dos experimentos da Água Tipo 2.

Experimentos	ORP x pH
CRL=0	0,984
CRL=0,78	-0,998
CRL=2,09	-0,978
CRL=3,04	-0,988

O gráfico 4.2, abaixo, retrata o comportamento do ORP e pH nas amostras de água do Tipo 2, nas quais apresentaram valores de ORP mais altos e valores de pH mais baixos quando comparados com as amostras de água do Tipo 1, no entanto, se comportou com tendência semelhante nos resultados sem cloro e com cloro nas amostras.

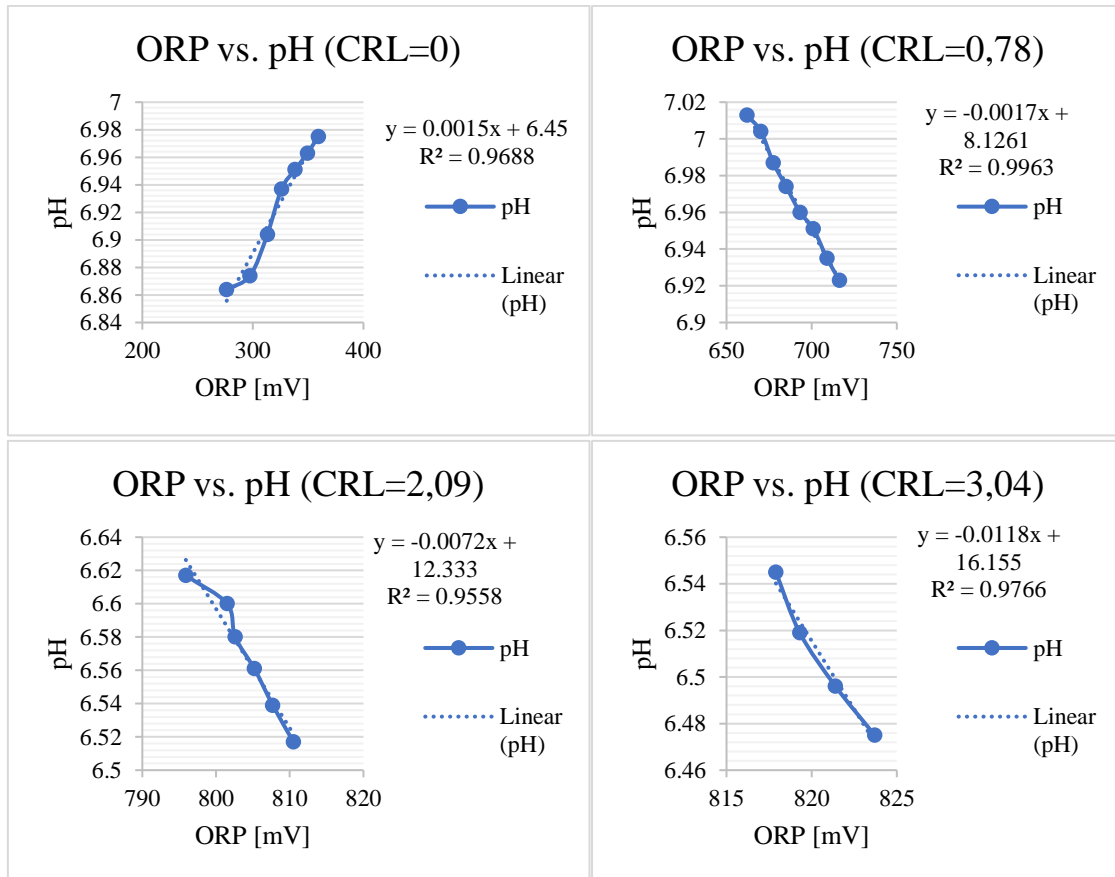


Gráfico 4.2: ORP vs. pH das amostras da Água do Tipo 2.

- Visualização do ORP, pH e T em diferentes concentrações de Cloro.

Os gráficos 4.3 e 4.4 de superfície 3D permitem observar a variação dos parâmetros de pH e ORP ao longo dos experimentos com diferentes concentrações de cloro. Sendo possível identificar que os experimentos com amostras de água do Tipo 1 foram mais vulneráveis a variações bruscas do ORP com a adição de cloro na água, formando uma superfície de resposta côncava. Enquanto, a superfície de resposta das amostras de água do Tipo 2 se comportou uma tendência plana, demonstrando maior sensibilidade às variações de ORP em valores de pH mais altos.

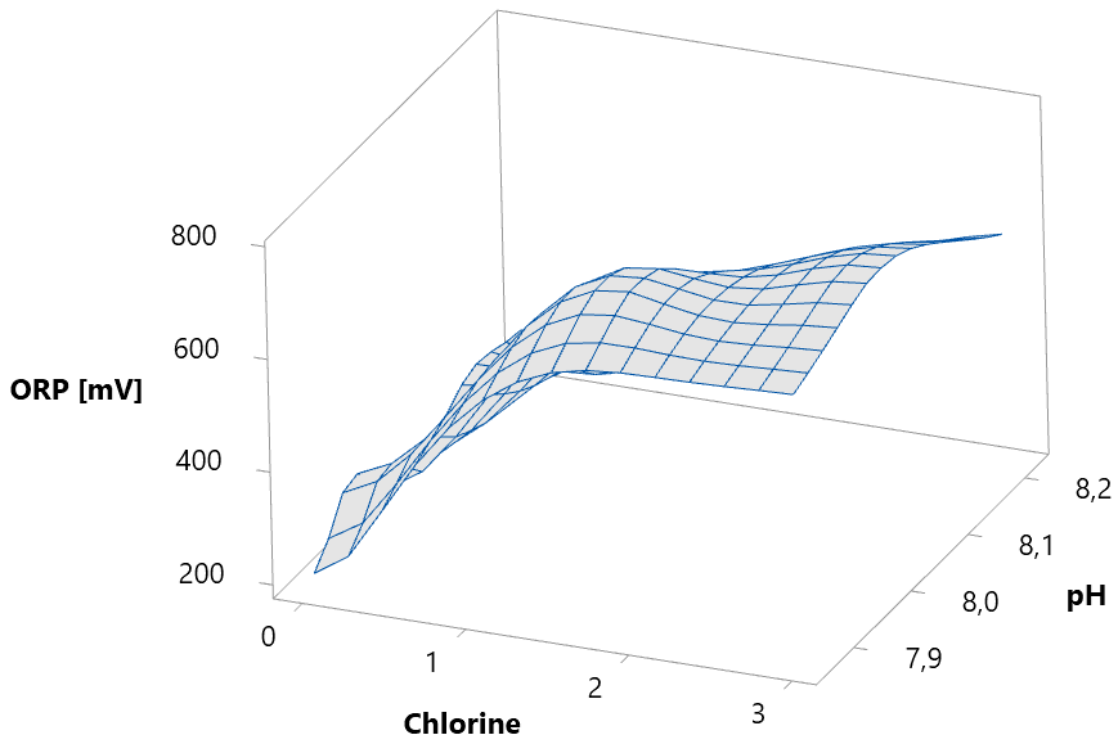


Gráfico 4.3: Superfície 3D dos experimentos com Água do Tipo 1.

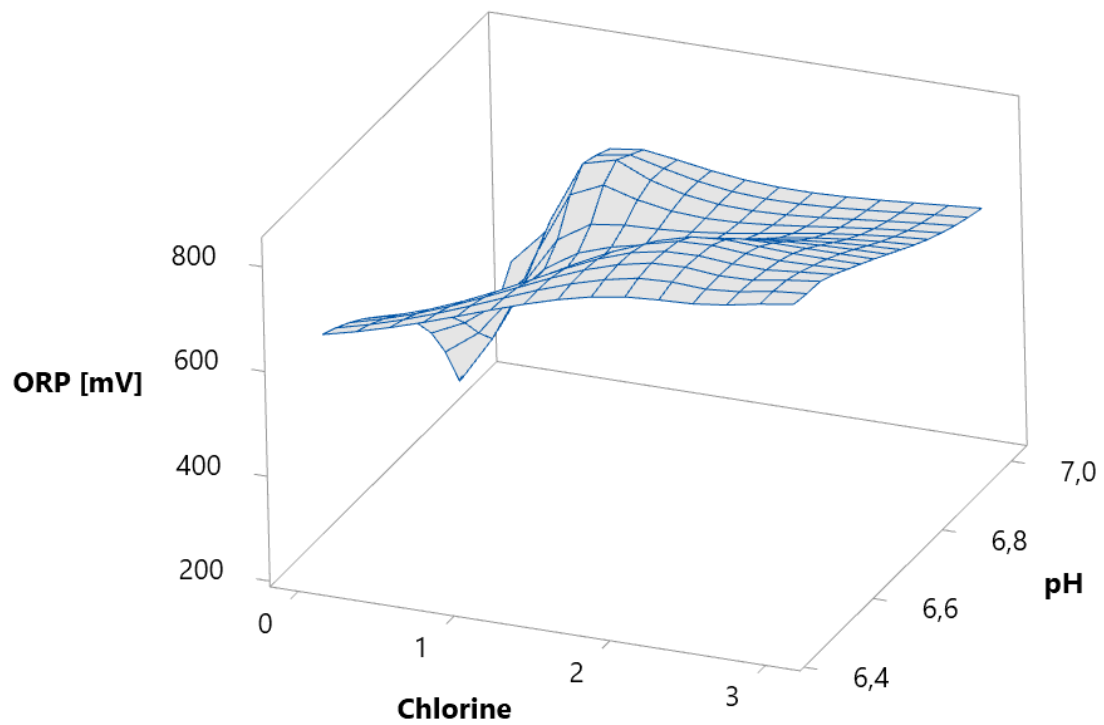


Gráfico 4.4: Superfície 3D dos experimentos com Água do tipo 2.

Além do pH e do ORP, a temperatura é um parâmetro fundamental na compreensão do processo de desinfecção de água. Para enxergar essa relação, foi plotada uma superfície 3D com a junção dos experimentos com amostra de água do Tipo 1 e amostras de água do Tipo 2, demonstrado no Gráfico 4.5. Na qual, é perceptível a tendência de proporcionalidade do ORP com a temperatura, de maneira que o ORP aumenta na medida que a temperatura eleva.

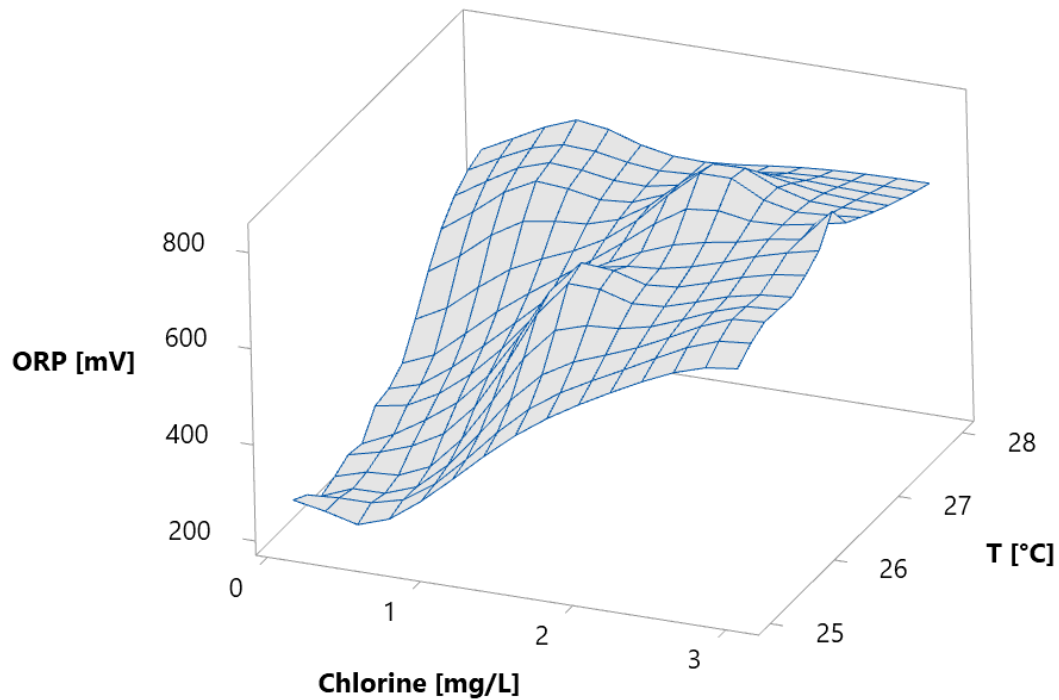


Gráfico 4.5: Superfície 3D entre ORP, cloro e T.

Quando contraposto os valores de ORP e pH em diferentes concentrações de cloro obtidos nos experimentos, foi possível estabelecer o gráfico de contorno com o Cloro como resposta, Gráfico 4.6. O gráfico permite identificar a faixa de concentração de cloro residual livre em mg/L para uma água clorada contendo ORP e pH conhecidos.

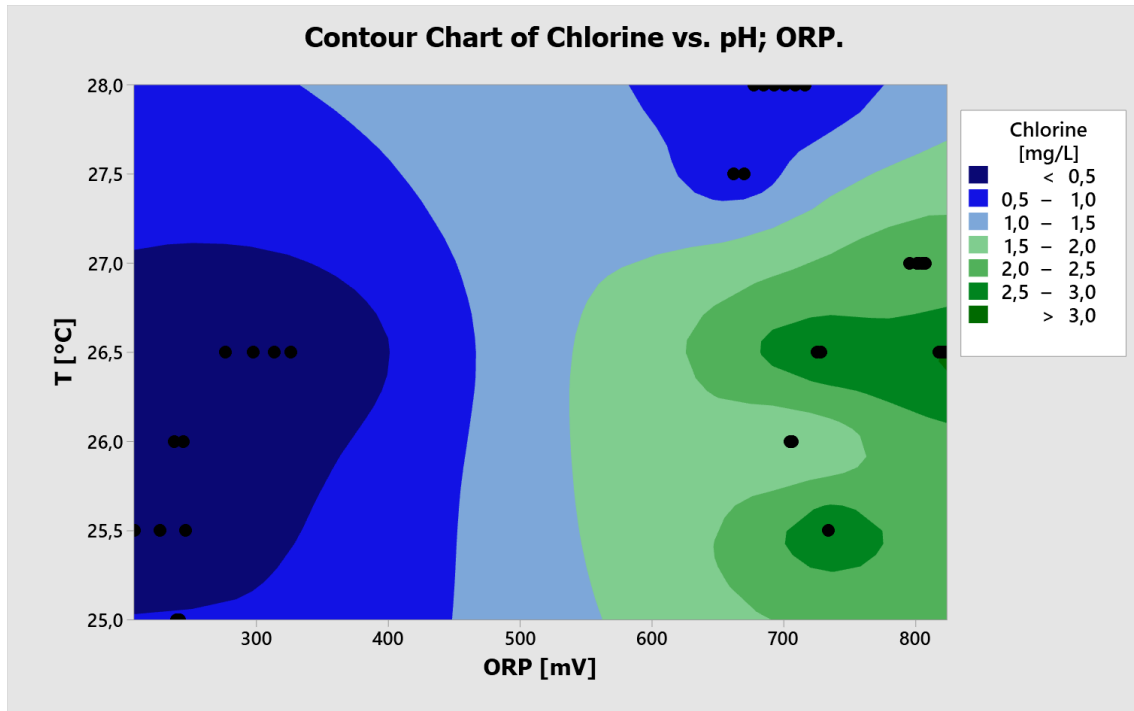


Gráfico 4.6: Gráfico de contorno de Cloro vs. pH; ORP.

- Equação Preditiva de Cloro

Ao identificar a relação do ORP, pH, temperatura em diferentes concentrações de cloro, foi possível determinar equações preditivas de cloro residual livre em mg/L. A variação do potencial redox diante a temperatura acarretou a necessidade de determinar equações para cada faixa de temperatura conhecida nos experimentos, a fim de manter uma maior precisão das estimativas.

Em software estatístico, o modelo foi ajustado para obter o cloro como resposta, o ORP e pH como preditores contínuos, e a temperatura como preditor categórico, além de um nível de confiança em todos os intervalos de 95%. As equações preditivas de cloro são apresentadas abaixo nas equações de 4.1 a 4.7.

$$T [^{\circ}C] = 25,0 \rightarrow \text{cloro} = -0,733 + 0,00418 * ORP + 0,000131 * (pH * ORP)$$

(4.1)

$$T [^{\circ}C] = 25,5 \rightarrow \text{cloro} = -0,925 + 0,00418 * ORP + 0,000131 * (pH * ORP)$$

(4.2)

$$T [^{\circ}C] = 26,0 \rightarrow \text{cloro} = -1,693 + 0,00418 * ORP + 0,000131 * (pH * ORP)$$

(4.3)

$$T [^{\circ}C] = 26,5 \rightarrow \text{cloro} = -1,181 + 0,00418 * ORP + 0,000131 * (pH * ORP)$$

(4.4)

$$T [^{\circ}C] = 27,0 \rightarrow \text{cloro} = -1,959 + 0,00418 * ORP + 0,000131 * (pH * ORP)$$

(4.5)

$$T [^{\circ}C] = 27,5 \rightarrow \text{cloro} = -2,618 + 0,00418 * ORP + 0,000131 * (pH * ORP)$$

(4.6)

$$T [^{\circ}C] = 28,0 \rightarrow \text{cloro} = -2,771 + 0,00418 * ORP + 0,000131 * (pH * ORP)$$

(4.7)

A regressão utilizada para determinar as equações preditivas obteve R² de 95,91%, R² ajustado de 95,60% e R² predito de 92,25%. A Análise de variância das equações preditivas é apresentada na tabela 4.6. Onde aceitou a hipótese em que ORP tem relação significativa com o cloro, através do Valor-P de ORP igual a 0,004 < 0,05. Além da ANOVA, foi determinado o índice da estatística de Durbin-Watson, no qual o valor foi de 1,009, retratando a autocorrelação positiva entre as variáveis.

Tabela 4.6: Análise de Variância.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	8	37,77	4,72	73,31	0,000
ORP [mV]	1	0,65	0,65	10,19	0,004
Ph.ORP	1	0,03	0,03	0,55	0,463
T [°C]	6	12,21	2,03	31,61	0,000
Erro	25	1,61	0,06		
Total	33	39,38			

Ao plotar as concentrações de cloro conhecidas em cada experimento com as concentrações estimadas pela equação de acordo a temperatura, foi obtido o gráfico 4.7, onde apresenta o comportamento com precisão satisfatória, como demonstrada através do coeficiente angular, coeficiente linear e R².

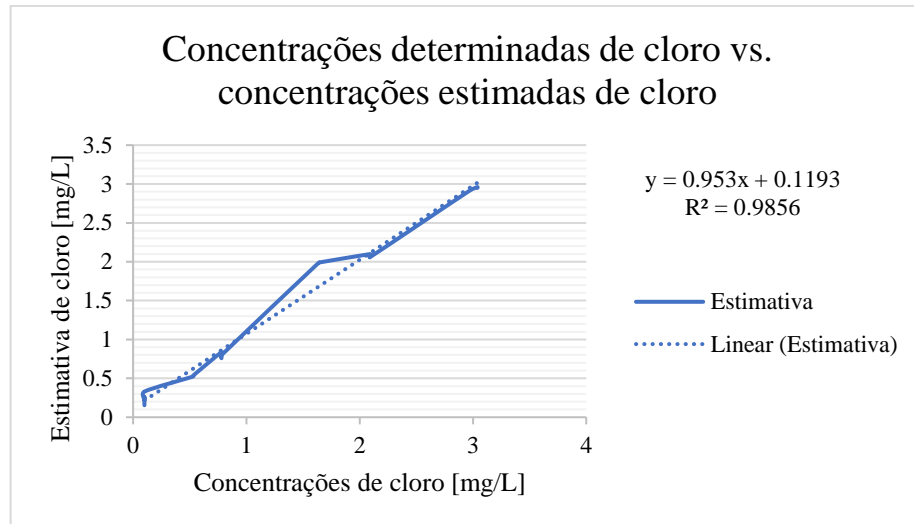


Gráfico 4.7: Concentrações conhecidas e estimadas de cloro.

- Avaliação da equação em 1 ponto extra:

Foi realizado uma sequência de experimentos em uma amostra de água do Tipo 1, com concentração de 1,95 mg/L de cloro residual livre, a fim de avaliar o funcionamento da equação preditiva de cloro obtida através dos demais experimentos.

Os valores medidas de ORP e pH na temperatura de 26 °C são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Características da amostra de água do ponto extra.

Medidas em Água Tipo 1 com 1,95 mg/L de cloro residual livre		
T [°C]	ORP [mV]	pH
26	675,2	8,376
26	676,6	8,375
26	679,1	8,371

Ao aplicar a Equação preditiva de cloro para a temperatura indicada (Eq. 3), foi obtido, respectivamente, os valores de cloro estimados apresentados na tabela 4.8.

Tabela 4.8: Cloro estimado com a equação 3 usando medidas da tabela 7.

Cloro estimado [mg/L]
1,870203
1,877503
1,89034

Foi alcançado estimativas muito próximas da concentração real, com uma variação de 0,0797, 0,0725 e 0,0596 respectivamente em cada medida. Com desvio padrão de 0,056, 0,051 e 0,042 respectivamente.

4.4. DISCUSSÃO

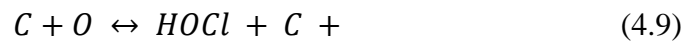
- Relação inversamente proporcional de ORP e pH

A relação inversamente proporcional entre ORP e pH em águas contendo agentes de desinfecção ocorre devido a liberação de íons H^+ no processo da oxidação da matéria orgânica e de minerais oxidáveis na água, fazendo com que o pH do meio aquático diminua com o aumento das atividades oxidativas (Krauskopf, 1972; Clark et al., 1998).

E isto pode ser explicado pela influência do pH no equilíbrio estequiométrico das reações do cloro na água, nas quais são regidas pela equação 4.8.



Pois, é através das reações de hidrólise e ionização que as espécies de cloro são modificadas e transformadas na espécie de cloro residual livre demonstrada na equação 4.9 e 4.10.



$$\text{Cloro residual livre} = [HOCl] + [OCl^-] \quad (4.10)$$

O pH tem forte influência na relação cloro vs. ORP. De acordo Zhou et al (2014), o pH é um dos parâmetros mais importante no processo de detecção de cloro através do ORP. Copeland & Lytle (2014) afirmam que o efeito do pH e da concentração de oxidante no ORP estavam em concordância com a equação de Nernst. Logo, equação de Nerst (Amman, 2018), que aborda o princípio do potencial redox, consegue retratar essa relação negativa entre pH e ORP, como demonstrado nas Equações 4.11 e 4.12.

$$E_H = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{\{red\}}{\{ox\}} \right] \quad (4.11)$$

$$E_H = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{[Cl^-]}{[HOCl][H^+]} \right] \quad (4.12)$$

Por isso, Van Haute et al. (2014) constatou que o valor de ORP em águas residuais com certo resíduo de cloro livre diminuiu com o aumento do pH da água. Onde, também identificou que para encontrar uma correlação eficiente entre ORP e cloro residual livre é necessário um controle rigoroso do pH ou a inclusão dele na modelagem.

- Comportamento dos parâmetros de qualidade da água

Em soluções diluídas, o ácido hipocloroso está sujeito a dissociação parcial, mantendo algum grau de suas diferentes espécies presentes no meio, de maneira que o pH é o agente determinante da maior atuação do HOCl e do OCl no processo de desinfecção. O pKa do HOCl é pH 7,5 e o ORP de HOCl é mais alto que o do OCl, logo, em ambientes com pH abaixo de 7,5, predomina o HOCl e acarreta um ORP mais alto, quando o pH está acima de pH 7,5, há maior concentração de OCl, tornando o ORP mais baixo. (White, 2010).

A figura 4.2, abaixo, apresenta o comportamento da porcentagem de cloro na forma de HOCl em função do pH e da temperatura.

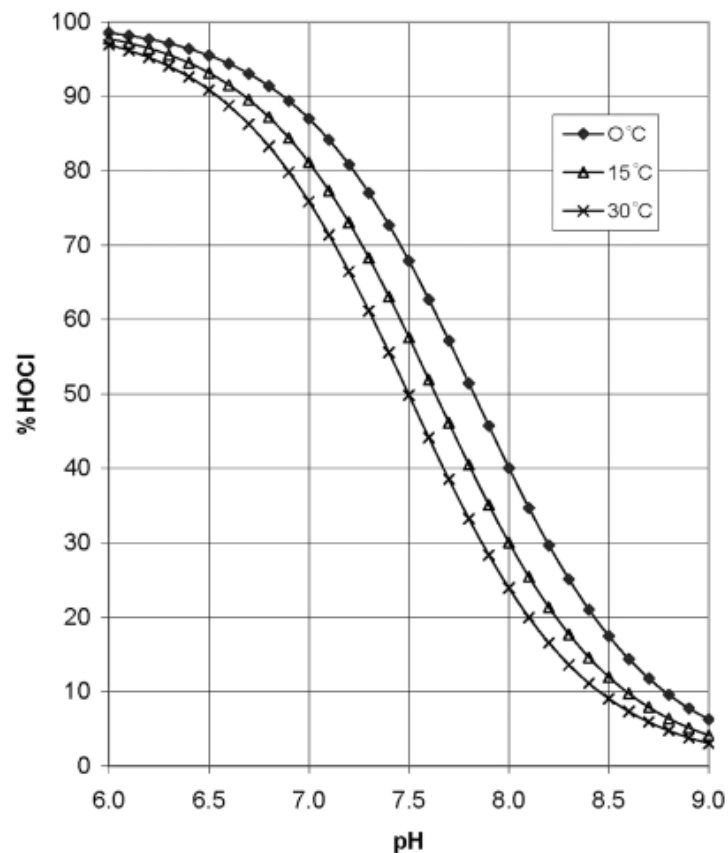


Figura 4.2: Percentual de cloro presente como HOCl em função do pH e da temperatura (FONTE: White, 2010).

Os resultados da Tabela 4.3 mostram com as medidas obtidas nos experimentos com a água Tipo 1 obtiveram maiores valores de pH e menores valores de ORP quando comparadas as medidas da água de Tipo 2, que esteve com baixo pH e alto ORP.

A água de Tipo 1 possui originalmente pH mais alto que a água Tipo 2, como mostrada na tabela 4.2 (característica da fonte). E isto deve-se principalmente a composição química da água amostrada, na qual possui alta concentração de Bicarbonato quanto comparada ao outro tipo de água, com concentração de 110,78 mg/L, enquanto na água Tipo 2 a concentração de bicarbonato é 7,67 mg/L.

O aumento das concentrações de bicarbonato e carbonato na água, aumentam a alcalinidade, na qual, é capaz de ajudar no controle das variações do pH da água ao longo do dia através de seu poder de tamponamento, onde, a alcalinidade refere-se à concentração total de bases tituláveis capazes de neutralizar cátions de hidrogênio (Green, 1949; Furtado et al., 2011).

Os íons carbonato em águas subterrâneas e superficiais são derivados principalmente de rochas carbonáticas de cálcio, na qual a solubilidade tende a ser baixa, mas vai aumentando significativamente na presença de CO₂, acarretando os bicarbonatos altamente solúveis (Ghandour et al., 1985).

- Atividades oxido-redutoras em diferentes concentrações

Nos experimentos com amostras de água do Tipo 1, a faixa de medidas da água sem cloro e da água com baixa quantidade de cloro são semelhantes, indicando um processo de oxidação pouco significativo, no entanto, ao aumentar a concentração de 0,53 para 1,64 m/L de cloro residual livre, as medidas de ORP obtiveram um salto de aproximadamente 460 mV. Copeland & Litle (2014) também identificaram um aumento do ORP de 300 mV para 400 mV quando a solução de cloro foi adicionada pela primeira vez a água residual estudada, e em seguida, também identificou que o perfil de ORP tornou-se relativamente plano, devido ao NH₂Cl oriundo da oxidação de NH₄⁺ que domina o estado redox do efluente. Bem como, Yu (2004) também observou que os valores de ORP aumentaram muito à medida que o cloro foi adicionado e, em seguida, tornaram-se relativamente planos.

Ressaltando que a velocidade da maioria das reações redox é influenciada pelo pH e temperatura e pode ser influenciada por substâncias com efeitos catalíticos ou inibitórios (White, 2010).

- Perspectivas e limitações

Copeland & Lytle (2014), em sua pesquisa, identificaram que os eletrodos redox podem produzir valores de ORP relativamente semelhantes em diferentes tipos de água quando um oxidante forte como o cloro está presente. Compreendendo que O ORP irá variar até certo ponto com diferentes fontes de água porque reflete a composição química da água, no entanto, tende a leituras semelhantes no processo de oxidação. De maneira a concordar com os resultados obtidos neste trabalho, onde a faixa de leituras do potencial redox tendem a aproximar-se nos dois tipos de água à medida que aumentava as concentrações de cloro residual livre.

No entanto Van Haute et al. (2014), ao estudar águas residuais do setor de alimentos, afirma que mesmo que o ORP possa ser dominado pela presença de um oxidante forte, a presença de outras substâncias pode alterar o ORP em algum grau, citando outros dois fatores além das características da fonte, como, orgânicos lavados do produto e o acidulante utilizado durante o processamento. Os quais não são relevantes quando direcionados para água de abastecimento. Sendo assim, ainda Van Haute et al. (2014), acredita que uma curva de previsão para todas águas e situações para estimar o cloro residual livre através do ORP e pH não é realista e segura. Em concordância a isto, White (2010) destaca que investigações na área da desinfecção de águas demonstraram que o ORP tem sérias deficiências como medida desinfecção.

4.5. CONCLUSÃO

A utilização de sensores comerciais de baixo-custo de ORP, pH e Temperatura como alternativa do monitoramento de cloro residual livre demonstrou-se uma estratégia promissora, capaz de trazer benefícios significativos aos sistemas de saneamento, contribuindo com a segurança hídrica e podendo proporcionar água segura e livre de contaminação a todos em um futuro próximo, de maneira a ser um instrumento da concretizando do 6º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável estabelecido pela ONU, referente a água potável e saneamento.

Foi observado que o ORP tem alta correlação com o cloro residual livre em água de abastecimento, de maneira a permitir identificar um padrão em amostras de água com características da fonte distintas. Em relação ao comportamento dos parâmetros analisados, foi

perceptível que o pH e o ORP em água clorada se comportam de maneira inversamente proporcional, como prevista pela equação de Nerst, devido a ação de oxidação.

A equação desenvolvida para estimar o cloro na água de abastecimento foi satisfatória, possuindo baixo desvio padrão e bom ajuste, além de autocorrelação positiva segundo o índice de Durbin-Watson, e de acordo a ANOVA, indicou ser possível concluir que existe uma associação significativa entre o ORP e o cloro (valor-p =0,004<0,05). A estimativa do cloro obtida pela equação preditiva e o experimento de validação obteve um coeficiente determinístico alto de 0,98.

4.6. REFERÊNCIAS

- Ammam, Malika. Applications of Nernst Equation: Basic Concepts with Resolved Questions and Problems. CreateSpace Independent Publishing Platform. March 5, 2018. ISBN-10: 1986184080; ISBN-13: 978-1986184083
- Atlas Scientific, 2022. <https://atlas-scientific.com/>
- Bergendahl, J. A., & Stevens, L.. (2005). Oxidation reduction potential as a measure of disinfection effectiveness for chlorination of wastewater. *Environmental Progress*, 24(2), 214–222. <http://doi.org/10.1002/ep.10074>
- Bhardwaj, Jyotirmoy; Gupta, Karunesh K ; Khatri, Punit. (2018). Real Time Assessment of Potable Water Quality in Distribution Network based on Low Cost Multi-Sensor Array. OP Conf. Series: Materials Science and Engineering 331 (2018) 012027 doi:10.1088/1757-899X/331/1/012027
- Bonola, Beatriz; Aguilar, Dania; Fuentes-Camargo, Iliana; Sosa-Rodríguez, Fabiola S.; Altamirano, Raul Hernández; Luna-Sánchez, Rosa; Vazquez-Arenas, Jorge (2020). Implications to enhance sulfamethoxazole degradation using statistical optimization of either active chlorine concentration or ORP in an electrochemical reactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Volume 8, Issue 5, 2020, 104179, ISSN 2213-3437 <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104179>.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria Gm/Ms N° 888, De 4 De Maio De 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n° 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 04 maio. 2021. Acesso: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>
- Chowdury, M. S. U., Emran, T. B., Ghosh, S., Pathak, A., Alam, M. M., Absar, N., ... Hossain, M. S.. (2019). IoT Based Real-time River Water Quality Monitoring System. *Procedia Computer Science*, 155, 161–168. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.025>
- CLARK, M. W.; MCCONCHIE, D.; LEWIS, D. W.; SAENGER, P. Redox stratification and heavy metal partitioning in Avicennia-dominated mangrove sediments: a geochemical model. *Chem. Geol.* v. 149, p. 147–171, 1998.
- Copeland, A., & Lytle, D. A.. (2014). Measuring the oxidation-reduction potential of important oxidants in drinking water. *Journal AWWA*, 106(1), E10–E20. <http://doi.org/10.5942/jawwa.2014.106.0002>
- Di Bernardo, L. **Métodos e Técnicas de tratamento de água**, volume II - Rio de Janeiro: ABES, 1993. ISBN: 85-7022-112-6
- Di Bernardo, L. **Métodos e Técnicas de tratamento de água**, volume II - Rio de Janeiro: ABES, 1993. ISBN: 85-7022-112-6

- Furtado, P. S., Poersch, L. H., & Wasielesky, W. (2011). Effect of calcium hydroxide, carbonate and sodium bicarbonate on water quality and zootechnical performance of shrimp *Litopenaeus vannamei* reared in bio-flocs technology (BFT) systems. *Aquaculture*, 321(1-2), 130–135. doi:10.1016/j.aquaculture.2011.08.034
- Geetha, S., & Gouthami, S.. (2016). Internet of things enabled real time water quality monitoring system. *Smart Water*, 2(1). <http://doi.org/10.1186/s40713-017-0005-y>
- Ghandour, MFM, Khalil, JB, & Atta, SA (1985). Distribuição de Carbonatos, Bicarbonatos e Valores de pH em Águas Subterrâneas da Região do Delta do Nilo, Egito. *Água Subterrânea*, 23(1), 35–41. doi:10.1111/j.1745-6584.1985.tb02777.x
- Green, J.. (1949). Effect of Temperature on pH of Alkaline Waters - Waters Containing Carbonate, Bicarbonate, and Hydroxide Alkalinity. *Industrial & Engineering Chemistry*, 41(8), 1795–1797. <http://doi.org/10.1021/ie50476a064>
- Khatri, P., Gupta, K. K., Gupta, R. K., & Panchariya, P. C.. (2021). Towards the Green Analytics: Design and Development of Sustainable Drinking Water Quality Monitoring System for Shekhawati Region in Rajasthan. *MAPAN*, 36(4), 843–857. <http://doi.org/10.1007/s12647-021-00465-x>
- Kim H, Kwon S, Han S, Yu M, Kim J, Gong S, Colosimo MF. (2006). New ORP/pH based control strategy for chlorination and dechlorination of wastewater: pilot scale application. *Water Sci Technol.*;53(6):145-51. doi: 10.2166/wst.2006.188. PMID: 16749451.
- Koparan, C., Koc, A., Privette, C., & Sawyer, C.. (2019). Autonomous In Situ Measurements of Noncontaminant Water Quality Indicators and Sample Collection with a UAV. *Water*, 11(3), 604. <http://doi.org/10.3390/w11030604>
- KRAUSKOPF, K. B. 1972. Introdução à geoquímica I. São Paulo: Polígono S.A. 294p. Tradução de Michal Lando e Paulo S.C. Bogus.
- Lambrou, T. P., Anastasiou, C. C., Panayiotou, C. G., & Polycarpou, M. M.. (2014). A Low-Cost Sensor Network for Real-Time Monitoring and Contamination Detection in Drinking Water Distribution Systems. *IEEE Sensors Journal*, 14(8), 2765–2772. <http://doi.org/10.1109/jsen.2014.2316414>
- Liao, Long B., Chen, Wei M., Xiao, Xian M. (2007). The generation and inactivation mechanism of oxidation–reduction potential of electrolyzed oxidizing water. *Journal of Food Engineering*, Volume 78, Issue 4, Pages 1326-1332, ISSN 0260-8774, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.004>.
- Lin, J.-Y., Tsai, H.-L., & Lyu, W.-H.. (2021). An Integrated Wireless Multi-Sensor System for Monitoring the Water Quality of Aquaculture. *Sensors*, 21(24), 8179. <http://doi.org/10.3390/s21248179>
- Liu, G., Zhang, Y., Knibbe, W.-J., Feng, C., Liu, W., Medema, G., & Van Der Meer, W.. (2017). Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: A review. *Water Research*, 116, 135–148. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2017.03.031>
- Magrani, Eduardo. A internet das coisas - Rio de Janeiro: FGV Editora, 2018. ISBN: 978-85-225-2005-3

- Mohd Akmal Helmi, A. H., Hafiz, M. M., & Shah Rizam, M. S. B.. (2014). Mobile buoy for real time monitoring and assessment of water quality. <http://doi.org/10.1109/spc.2014.7086223>
- Musz-Pomorska, A., Widomski, M. K., Matczuk, A., & Sadura, K.. (2019). Modeling chlorine distribution in water supply system utilizing empirically determined chlorine decay rate. *E3S Web of Conferences*, 100, 00054. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/201910000054>
- Pandian, DR, & Mala, K. (2015). Dispositivo inteligente para monitorar a qualidade da água para evitar poluição no ambiente IoT. *Int J Emerging Tech Comput Sci Electron* , 12 (2), 120-125.
- Pangloli, Philipus; Hung, Yen-Con (2013). Effects of water hardness and pH on efficacy of chlorine-based sanitizers for inactivating *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes*. *Food Control*. Volume 32, Issue 2, Pages 626-631, ISSN 0956-7135, <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.01.044>.
- Silva Junior, A., Lima Sa, S., Santos, D., Negreiros, Á., Souza Silva, J., Álvarez Jacobo, J., & Garcia Gonçalves, L.. (2016). Towards a Real-Time Embedded System for Water Monitoring Installed in a Robotic Sailboat. *Sensors*, 16(8), 1226. <http://doi.org/10.3390/s16081226>
- Siyang, S., & Kerdcharoen, T.. (2016). Development of unmanned surface vehicle for smart water quality inspector. <http://doi.org/10.1109/ecticon.2016.7561370>
- Steininger, J. M, & Pareja, C. (1996). ORP SENSOR RESPONSE IN CHLORINATED WATER. NSPI Water Chemistry Symposium, Phoenix, AZ published in NSPI Symposium Series, Vol. I.
- Van Haute, S., Zhou, B., Luo, Y., Sampers, I., Vanhaverbeke, M., & Millner, P.. (2019). The use of redox potential to estimate free chlorine in fresh produce washing operations: Possibilities and limitations. *Postharvest Biology and Technology*, 156, 110957. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110957>
- Vijayakumar, N., & Ramya, R.. (2015). The real time monitoring of water quality in IoT environment. <http://doi.org/10.1109/iciiecs.2015.7193080>
- White ,G.C. (2010). White's Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants. (5th ed.), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
- Yu, R.-F., Chen, H.-W., Cheng, W.-P., Shen, Y.-C. (2008). Dynamic control of disinfection for wastewater reuse applying ORP/pH monitoring and artificial neural networks. *Resources, Conservation and Recycling* 52 (8-9), 1015-1021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.03.007>
- Yu, R.-F.. (2004). Feed-forward dose control of wastewater chlorination using on-line pH and ORP titration. *Chemosphere*, 56(10), 973–980. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.03.015>
- Zhou, B., Luo, Y., Turner, E. R., Wang, Q., & Schneider, K. R.. (2014). Evaluation of Current Industry Practices for Maintaining Tomato Dump Tank Water Quality during Packinghouse Operations. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(6), 2201–2208. <http://doi.org/10.1111/jfpp.12200>

5. CONCLUSÃO GERAL

O objetivo desta pesquisa foi apresentar o protótipo de um sistema de monitoramento de qualidade da água em tempo real, avaliando um panorama geral do funcionamento e analisando a possibilidade do sistema de extrair parâmetros além dos detectados diretamente pelas sondas instaladas, para que assim, maximize a eficiência e o caráter de custo-benefício.

A apresentação do sistema ocorreu por meio do primeiro artigo, no qual aborda os detalhes da configuração de comunicação interna e externa do protótipo, bem como, as características dos dispositivos utilizados. De maneira que foi exposto também as características de funcionamento, tornando possível identificar as melhores condições de uso.

Diante o direcionamento do sistema para o monitoramento de água de abastecimento, o cloro foi determinado como o parâmetro adequado para propor uma determinação indireta, apresentada no segundo artigo, visto que, a inclusão do sensor de cloro no sistema aumentaria o custo de montagem.

Por ser fruto de tecnologias emergentes, o sistema obteve sucesso e demonstrou-se satisfatório a nível de laboratório, tanto no requisito de funcionamento quanto na determinação indireta do parâmetro de desinfecção. No entanto, há possibilidade de otimizações do funcionamento e detecção de mais parâmetros em pesquisas futuras, para assim, ser avaliado em campo.

Esta pesquisa representa a mudança no processo de monitoramento de água e destaca o avanço do Brasil no empenho em acompanhar desenvolvimentos de tecnologias de monitoramento ambiental. Onde, neste primeiro momento, foram utilizados dispositivos eletrônicos comercializados internacionalmente, no entanto, serve de incentivo para o desenvolvimento de dispositivos brasileiros e inserção das pesquisas e tecnologias nacionais neste promissor mercado de tecnologias ambientais.

5.1. Outras possíveis aplicações

- Utilização dos dados de monitoramento de qualidade da água no ensino infantil, como um meio de inserir educação ambiental nas escolas.
- Utilização dos dados de monitoramento de qualidade da água no ensino de jovens e adultos aplicados em disciplinas de ciências exatas, como estatística, modelagem de poluição ambiental e afins.

- Contribuir com elaboração de Plano de Segurança Alimentar.
- Contribuir com elaboração de Plano de Recursos Hídricos.
- Contribuir com elaboração de Plano de Saneamento Básico.