

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA FLUMINENSE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À
ENGENHARIA E GESTÃO**

**PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE UMA ESTAÇÃO
DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA
NO RIO PARAÍBA DO SUL: MODELAGEM
MATEMÁTICA E COMPARAÇÃO DE DADOS.**

ELTON ALVARENGA PESSANHA JUNIOR

ORIENTADORA: CRISTINE NUNES FERREIRA.

COORIENTADORA: SIMONE VASCONCELOS SILVA.

Campos dos Goytacazes - RJ
2018

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA FLUMINENSE**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À
ENGENHARIA E GESTÃO

**PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE UMA ESTAÇÃO
DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA
NO RIO PARAÍBA DO SUL: MODELAGEM
MATEMÁTICA E COMPARAÇÃO DE DADOS.**

ELTON ALVARENGA PESSANHA JUNIOR

Dissertação para obtenção do grau de **Mestre**
no Programa de Pós-Graduação em Sistemas
Aplicados à Engenharia e Gestão, Área de
Concentração em Sistemas Computacionais.

Campos dos Goytacazes
2018

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA FLUMINENSE**

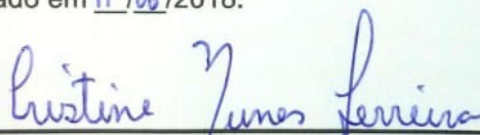
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À ENGENHARIA
E GESTÃO

**PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO DA
QUALIDADE DA ÁGUA NO RIO PARAÍBA DO SUL: MODELAGEM
MATEMÁTICA E COMPARAÇÃO DE DADOS.**

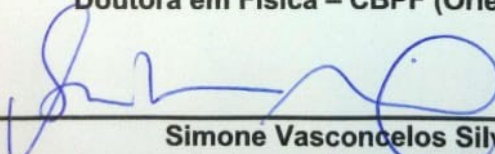
ELTON ALVARENGA PESSANHA JUNIOR

Dissertação para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em
Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Área de Concentração em Sistemas
Computacionais

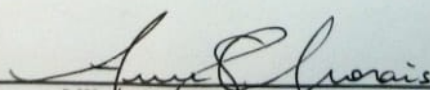
Projeto Apresentado em 11/06/2018.



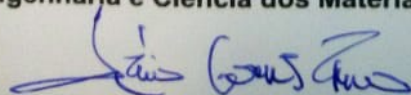
Cristine Nunes Ferreira
Doutora em Física – CBPF (Orientadora)



Simone Vasconcelos Silva
Doutora em Computação – UFF (Coorientadora)



Alline Sardenha Cordeiro Moraes
Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais – UENF (Examinador)



Hélio Comes Filho
Doutor em Políticas Públicas – UERJ (Examinador)

AGRADECIMENTOS

A DEUS por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A minha orientadora Cristine Nunes pelo suporte, orientação, dedicação e amizade, principalmente nos momentos de dificuldade que não mediu esforços para me ajudar.

A minha coorientadora Simone Vasconcellos, pelo suporte, suas correções e incentivos.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. A minha mãe que mesmo distante deixou sua memória, amor incondicional para que eu possa sempre seguir em frente.

E todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Os rios são as fontes de água potável mais importantes para sobrevivência humana, que leva em conta fatores sociais políticos e econômicos associados. O risco da escassez da água até 2050 é real, com previsão de 2,4 bilhões de pessoas sobrevivendo com extrema restrição hídrica. Nesta dissertação foi trabalhado seguindo a premissa que o desenvolvimento econômico pode estar aliado a sustentabilidade ambiental se for investido recursos visando o aumento de tecnologia voltada para esta área. Por esta razão, nesta dissertação o objetivo foi construir uma estação em bancada de monitoramento da qualidade água do rio Paraíba do Sul, localizada às vizinhanças de sua da foz visando a coleta e análise sistemática de parâmetros importantes da qualidade da água. O dispositivo de monitoramento foi composto por sensores que mensuram quatro parâmetros consistentes para a qualidade da água. Após aferição dos sensores os dados foram gravados em cartão micro SD, posteriormente analisados via modelagem matemática. Foi feito um estudo via método numérico e modelagem matemática relacionado parâmetros OD e DBO levando em conta dados da temperatura e vazão. Com a análise dos dados preexistentes coletados na PICG e estações em funcionamento da INEA, verificou-se que o método que forneceu um maior nível de confiança na descrição da relação entre oxigênio dissolvido e temperatura, usando o método da regressão linear. Através desse método pôde-se determinar a constante de saturação de OD do rio. Esse estudo forneceu dados reais para a validação do modelo de Streeter-Phelps que foi usado para avaliar a relação entre os parâmetros de OD e DBO. Neste trabalho, foi estudado a importância da pesquisa de monitoramento que fornecerá dados brutos para a validação de modelos teóricos que possam ser base de pesquisas científicas visando criação de novos modelos, promovendo o diagnóstico e posteriormente a previsão do comportamento do rio. Os modelos matemáticos ajudam na previsão de desastres ambientais e concessão de outorgas. Com os dados de pesquisas no PICG e estações do INEA pôde-se fazer alguns estudos de modelagem matemática e análise com sucesso. Futuras pesquisas, complexas, poderão ser desenvolvidas na área como por exemplo: a previsão de poluentes, antecipação de desastres naturais e alerta de acidentes ambientais

Palavras-chave: Monitoramento da Qualidade da água, Método dos Mínimos Quadrados, Modelo Streeter-Phelps, Concessão de outorgas.

ABSTRACT

Rivers are the most important sources of drinking water for human survival, which takes into account associated political and economic social factors. The risk of water scarcity by 2050 is real, with an estimated 2.4 billion people surviving with extreme water restriction. In this dissertation was worked following the premise that economic development can be allied to environmental sustainability if resources are invested aiming the increase of technology aimed at this area. For this reason, in this dissertation the objective was to construct a station in the water quality monitoring station of the Paraíba do Sul river, located in the vicinity of its mouth, aiming at the systematic collection and analysis of important water quality parameters. The monitoring device was composed of sensors that measure four parameters consistent with water quality. After measuring the sensors, the data were recorded on micro SD card, later analyzed via mathematical modeling. A numerical method and mathematical modeling related to OD and BOD parameters were carried out taking into account temperature and flow data. With the analysis of the pre-existing data collected in the IGCP and INEA operating stations, it was verified that the method that provided a higher level of confidence in the description of the relation between dissolved oxygen and temperature, using the linear regression method. Through this method, the OD saturation constant of the river was determined. This study provided real data for the validation of the Streeter-Phelps model that was used to evaluate the relationship between OD and BOD parameters. In this work, we studied the importance of monitoring research that will provide raw data for the validation of theoretical models that may be the basis of scientific research aiming at the creation of new models, promoting the diagnosis and later prediction of river behavior. Mathematical models help predict environmental disasters and grant awards. With the research data at the PICG and INEA stations it was possible to do some studies of mathematical modeling and analysis with success. Future complex investigations could be developed in the area such as: prediction of pollutants, anticipation of natural disasters and alert of environmental accidents

Keywords: Water Quality Monitoring, Least Squares Method, Streeter-Phelps Model, Granting of Grants.

LISTA DE FIGURAS

Figura1: Fluxo de massa q através das faces de um volume de controle.....	22
Figura 2: Os vórtices em oceanos.....	26
Figura 3: Sub-bacias do Rio Paraíba do Sul no estado do Rio de Janeiro/Brasil	33
Figura 4: Mapa da região hidrográfica que contém a região de Campos dos Goytacazes.....	34
Figura 5: Áreas com elevadas taxas de DBO	35
Figura 6: Mapa de localização PICG.....	36
Figura 7: Dados históricos da pluviosidade dividido por mês. A barra azul corresponde ao mês de 2013, vermelho 2014, cinza 2015 e verde 2016.....	38
Figura 8: Dados históricos da pluviosidade dividido por mês. A barra azul corresponde ao mês de 2013, vermelho 2014, cinza 2015 e verde 2016.....	38
Figura 9: Arduino Mega 2560.....	44
Figura 10: Real Time Clock (RTC).....	44
Figura 11: Sensor de Condutividade	45
Figura 12: Protótipo.....	46
Figura 13: Ligações físicas do projeto.....	48
Figura 14: Fluxograma do código.....	49
Figura 15: Sensor e aparelho para calibração.....	50
Figura 16: Teste de variação do sensor.....	51
Figura 17: Gráfico do OD X T para a estação PS439 durante os anos de 2014 -2017.....	53
Figura 18: Gráfico do OD X T para a estação MR370 em 2014	54
Figura 17: Gráfico do OD X T para a estação PS4442 durante os anos de 2014 -2017.....	56
Figura 20: Cálculo do OD x T para o PICG.....	57
Figura 21: O coeficiente de reação k_r em função da vazão.....	59
Figura 22: Curva do OD para diferentes k_r	60
Figura 23: Concentração k_d em função do volume.....	61
Figura 24: Concentração DBO x t.....	62
Figura 25: Concentração de DBO e OD x t.....	63
Figura 26: Classes de água doce e seus ponderantes.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índice de qualidade de água e seus parâmetros.....	18
Tabela 2: Artigos base da dissertação.....	31
Tabela 3: Dados coletados do (PICG).....	37
Tabela 4: Método da Regressão Linear para a estação da INEA PS439 nos anos de 2014-2017.....	52
Tabela 5: Método da Regressão Linear para a estação da INEA MR370 nos anos de 2014.....	54
Tabela 6: Método da Regressão Linear para a estação da INEA PS441 nos anos de 2014-2017.....	55
Tabela 7: Método da regressão linear para a estação do PICG no ano de 2013.....	56
Tabela 8: Comparação dos coeficientes a, b, c.....	58
Tabela 9: Limites da concentração para alguns parâmetros da qualidade da água segundo a resolução CONAMA nº 357/2005.....	64
Tabela 10: Relação dos parâmetros do modelo de Streeter-Phelps para o Rio Paraíba do Sul com a concentração de Demanda Bioquímica de Oxigênio inicial. Para a concentração do efluente $C_{ef} = 6 \text{ mg/L}$ e vazão do efluente $V_{ef} = 80 \text{ m}^3$	66
Tabela 11: Classes de usos preponderantes de água doce e sua concentração permitida de OD e DBO, respectivamente.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CE – Condutividade Elétrica

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

NMP - Coliformes Fecais Termotolerantes

No₃ – Nitrato

OD – Oxigênio Dissolvido

pH – Potencial Hidrogênico

PICG – Polo de Inovação Campos dos Goytacazes

INEA – Instituto Estadual do Ambiente

Po₄ – Fósforo Total

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais

T – Temperatura da água

TU – Turbidez

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução	11
Capítulo 2 - Referencial teórico	15
2.1 Qualidade da água.....	15
2.2 Parâmetros de qualidade da água.....	16
2.2.1 Oxigênio dissolvido.....	16
2.2.2 Demanda bioquímica de oxigênio.	17
2.2.3 Temperatura.....	17
2.3 Índice qualidade da água.....	18
2.4 Resolução CONAMA.....	19
2.5 Modelagem matemática.....	21
2.6 Sistema de monitoramento da qualidade da água.....	27
Capítulo 3 - Materiais e métodos	33
3.1 A Região de estudo.....	33
3.2 Métodos numéricos para análise dos dados experimentais.....	38
3.3 Modelagem matemática e relação entre OD x DBO.....	40
3.4 Estratégia de montagem da estação de monitoramento	42
3.4.1 Parte elétrica.....	42
3.4.2 Parte eletrônica.	47
Capítulo 4 - Resultados e discussões	47
4.1 Análise dos dados disponíveis.....	47
4.2 Modelagem matemática	49
4.2.1 Métodos numérico e modelo de Streeter-Phelps.....	49
4.2.2 Estudo de Caso: Modelo de Streeter-Phelps.....	54
4.3 Construção da estação de monitoramento para simulação em bancada.....	59
4.4 Análise da concessão de Outorgas de Lançamentos de Efluentes no Rio Paraíba do Sul Através do Estudo das Concentrações da Demanda Bioquímica de Oxigênio e Oxigênio Dissolvido.....	64
Capítulo 5 – Conclusão	68
Referências	70

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A água é um recurso mineral essencial a vida humana, a escassez da água doce no mundo aumenta a cada dia devido ao crescimento da poluição. Isto é uma grande motivação não só para incentivar a economia da água como também para descobrir novas técnicas de preservação desses mananciais. Problemas de quantidade e/ou de qualidade da água podem vir a comprometer a sobrevivência da biosfera e da própria existência humana no planeta.

Por esses motivos, existe um enorme esforço, de pesquisadores ao redor do mundo, para criar inovações tecnológicas que possam ajudar na manutenção da vida aquática em rios e desta forma contribuir para a melhoria na qualidade e aumento da quantidade da água doce.

Os recursos hídricos estão dispostos na natureza em dois principais estados da matéria: sólido e líquido, onde aproximadamente 97% corresponde as águas dos oceanos e apenas 3% estão disponíveis na forma doce, em rios, lagos, aquíferos subterrâneos, calotas polares e geleiras. É evidente que os recursos hídricos estão cada vez mais escassos, isso é o resultado da combinação da variabilidade hidrológica e do elevado consumo humano. O risco da escassez da água até 2050 é real, com previsão de 2,4 bilhões de pessoas sobrevivendo com extrema restrição hídrica, especialmente na África e Ásia Central. Em 2030 o mundo sofrerá um déficit hídrico de 40% (UNESCO, 2017).

Os rios são a forma de água potável mais importante para sobrevivência humana, que leva em conta fatores sociais políticos e econômicos associados. A título de exemplo pode-se citar: o abastecimento de água para cidades e indústrias, irrigação agrícola, pesca e como rota de navegação. No caso do consumo humano, é indispensável que a qualidade dessas águas estejam dentro dos padrões toleráveis. Alguns rios encontram-se seriamente comprometidos pois os mananciais límicos, lacustres ou fluviais estão eutrofizados e contém substâncias tóxicas para saúde humana. Como exemplo de rios que se enquadram nessas características pode-se citar o rio Tietê no Estado de São Paulo e o rio Paraíba do Sul (NASCIMENTO, 2003).

A partir da segunda grande guerra mundial, ocorreu uma mudança na base energética mundial, antes era o carvão que dominava o mercado depois passou a ser o petróleo. Tal processo de transformação, explorativa, conduziu o mundo para uma expansão histórica da

produção. Com essa expansão, a qualidade ambiental sofreu uma degradação a medida que o desenvolvimento econômico aumentava.

Por muito tempo, pesquisadores acreditavam que o desenvolvimento econômico estava diretamente ligado à degradação do meio ambiente, numa fase inicial da economia, as consequências ambientais são drásticas. Contudo pesquisas foram feitas sobre a emissão de CO₂ indicando, em alguns casos, que o desenvolvimento econômico aliado ao desenvolvimento tecnológico pode acarretar numa melhoria da qualidade ambiental, em oposição a muitos estudos que taxavam o crescimento econômico como maior perigo para o ambiente (SOHAG; BEGUM; ABDULLAH, 2015).

No Brasil, a partir da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, Eco-92, uma maior preocupação e mobilização foi feita referente a qualidade ambiental brasileira. Nessa conferência, organizada pelas Nações Unidas e realizada no Rio de Janeiro, houve a reunião de líderes de estado para debater os problemas ambientais mundiais. Detectou-se a necessidade de uma mudança de comportamento com relação ao cuidado das nações com o meio ambiente visando um panorama futuro. Essa preocupação vem desde da conferência de Estocolmo, realizada em 1972 na Suécia (FRANCISCO, 2017). O crescimento populacional, deve atingir 8,3 bilhões de habitantes em 2030, com 223 milhões de habitantes no Brasil. Neste período, a restrição hídrica chegará ao limite. Com o crescimento populacional, aumenta a preocupação com as condições ambientais e qualidades dos recursos hídricos (UNESCO, 2017).

Na comissão de Lancet, sobre a Governança Global para a Saúde realizada em Oslo no ano de 2011, foi levantada a necessidade de um envolvimento maior do setor da saúde como um modo de enfrentar os principais desafios da saúde global. Em todo o mundo as doenças infecciosas transmitidas pela água estão no ranque das principais causas da mortalidade infantil. Em 2012 contabilizou-se 842 mil mortes nos países de baixa e média renda como vítimas do consumo de água potável contaminada (UNESCO, 2017).

No Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos de 2017, sinalizou-se a preocupação com as águas residuais, segundo esse relatório existe um grande número de resíduos oriundos de atividades antrópicas, que produzem 2 milhões de toneladas destes. Os resíduos são despejados sem tratamento no meio ambiente, o que causa impactos não só na saúde humana como é também prejudicial aos ecossistemas, acarretando uma diminuição na produtividade econômica. Dois terços da população mundial hoje vivem em áreas com escassez de água (UNESCO, 2017).

O Brasil é responsável por 12% das reservas de água doce do planeta (PORTAL BRASIL, 2010) e corresponde ao quinto país com maior volume de água doce do mundo, por este motivo a preocupação, que as políticas públicas fiscalizem regularmente a proteção dos corpos hídricos nacionais é fato essencial para gerações futuras. Em 1997 foi sancionada a Lei das Águas, Lei nº 9.443/97, que estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh). Em 2000, foi criada a Agência Nacional de Águas (ANA), criada como desdobramento da lei nº 9.443/97 cujo objetivo foi de disciplinar a implementação, a operacionalização, o controle e a avaliação dos instrumentos de gestão criados para a política nacional de Recursos Hídricos. Deste 2007, o governo do estado do Rio de Janeiro criou, através da Lei nº 5.101, o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), que apresenta diversas estações medindo a qualidade da água.

Essas estações mensuram nove parâmetros importantes na aferição da qualidade da água. Tais parâmetros permitem calcular um índice chamado IQA, de qualidade da água, calculado por meio do produto ponderado dos nove parâmetros mensurados. Esse padrão foi estabelecido por pesquisadores da *National Sanitation Foundation*. No entanto, o número de estações ao longo do rio ainda são insuficientes para uma aferição precisa da qualidade da água do rio, principalmente em caso de acidentes ambientais, a região do médio Paraíba foi uma região bem prejudicada pelo crescimento industrial e acidentes químicos sendo seus afluentes alvos frequentes de emissões acidentais (FREITAS; PORTE; GOMEZ, 1995). As estações de monitoramento, são importantes para a medição mais apurada, não só dos impactos propagados de regiões distantes dos pontos de coleta, mas também das regiões ribeirinhas que impactam diretamente o rio. A partir dessas medições é possível fiscalizar mais pontualmente o funcionamento dos setores produtivos além de desenvolver modelos de previsão. Desta forma, uma outra fragilidade do sistema implementado pelo INEA, das estações de monitoramento, é a falta de disponibilidade dos dados brutos. Pois as aferições e os relatórios são disponibilizados em internet a cada 3 meses. Os dados são calculados através de indicadores ou médias trimestrais, impossibilitando uma análise mais apurada dos sistemas envolvidos (INEA, 2017). Os indicadores são importantes para a interlocução entre os atores envolvidos, traduzindo dados técnicos em índices que podem ser de fácil acesso para população, produtores e autoridades do governo entre outros. Os dados disponibilizados pelas estações atuais não são suficientes para análises acadêmicas e a confecção de modelos de previsão, importantíssimos em caso de desastres ou catástrofes naturais (SILVA, 2012). Países como os EUA, mantêm uma base de dados aberta, detalhada, propiciando aos profissionais dos meios acadêmicos estudarem os dados brutos para desenvolverem análises e elaborar modelos de previsão objetivando

contenção de impactos ambientais. Em 2018, foi verificado que as tabelas do INEA que deixam acessíveis os dados de avaliação da qualidade da água para a consulta pública se apresentam incompletos, acrescentando mais um problema ao sistema implantado pelo governo que é a falta de continuidade nos programas governamentais de aferição. Por este motivo ter estações de medições da qualidade da água sob domínio do setor acadêmico para dar suporte ao governo é de suma importância, pois além de gerar recursos humanos tem a capacidade de manter a qualidade e periodicidade da coleta.

Nesta dissertação foi trabalhado o monitoramento ambiental seguindo a premissa baseada no fato que o desenvolvimento econômico sustentável possa ser realidade se investimos esforços e recursos visando o aumento de tecnologia voltada para esta área. Por esta razão, nesta dissertação o objetivo foi estudar a metodologia para a construção de uma estação de monitoramento da qualidade água do rio Paraíba do Sul, localizada às vizinhanças de sua foz, via: análise de bancada da metodologia de construção, obtenção e análise de dados já existentes na região e modelagem usando modelos de difusão da relação entre os parâmetros de qualidade da água.

Esta dissertação foi organizada da seguinte forma: no Capítulo 2 foi feita uma análise bibliográfica tanto dos sistemas de monitoramento da qualidade da água como também dos modelos matemáticos, *softwares* de análise dos parâmetros de qualidade da água, sensores e parâmetros importantes neste diagnóstico. No Capítulo 3 foi analisado os materiais e métodos utilizados para alcance do objetivo proposto, em que foi feito um diagnóstico e delimitação da região de estudo, estudo dos dados existentes, construção da estação de monitoramento de bancada e sua metodologia de aquisição e análise de dados, análise do modelo matemático utilizado, escolha dos dados que foram analisados e sua justificativa. No Capítulo 4, discutiu-se os resultados da estação de bancada, a análise dos dados obtidos pelas estações pre-existentes. Por fim no Capítulo 5 foram feitas as considerações finais.

Capítulo 2

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Qualidade da água

A qualidade da água é o resultado da influência do homem sobre o meio, mas também dos fenômenos da natureza como: tempestades, secas, deslizamentos de terra e enchentes, entre outros. A utilização da água para funções específicas e sua qualidade estão diretamente relacionadas. Existe uma grande variação de atribuições para a utilização da água sendo as principais: consumo doméstico, consumo industrial, consumo agrícola e recreação. Pode-se considerar que o abastecimento doméstico é o mais rigoroso, pois requer a satisfação de propriedades organolépticas da água. (VON SPERLING, 1996).

Na literatura, existem variadas características que determinam a qualidade da água. Essas características são físicas, químicas e biológicas (BENETTI; BIDONE, 2001). Segundo Motta, 2006, as características de qualidade da água são:

- Físicas: cor, turbidez, sólidos, temperatura, sabor e odor;
- Químicas: pH, alcalinidade, dureza, cloretos, ferro e manganês, nitrogênio, fósforo, fluoretos, matéria orgânica, componentes orgânicos, componentes inorgânicos, metais pesados, demanda química de oxigênio, demanda Bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido;
- Biológicas: Coliformes e algas.

Nesse contexto infere-se que a expressão qualidade da água está correlacionado aos fatores físicos, químicos e biológicos. Em decorrência do crescimento populacional e poucos recursos destinados a políticas públicas afim de garantir a preservação dos mananciais, os recursos hídricos estão lastimavelmente mais escassos. Efluentes domésticos, industriais e deflúvios superficiais agrícolas e urbanos são os principais agentes contaminantes. (MERTEN et al, 2002).

Efluentes domésticos são compostos por matéria orgânica biodegradável, microorganismos (bactérias, vírus, etc.), nutrientes (nitrogênio e fósforo), óleos e graxas, detergentes e metais (BENETTI; BIDONE, 1995). Efluentes industriais são compostos principalmente, dentre os poluentes mais significativos, de: matéria orgânica, sulfetos, óleos e graxas, bactérias, ácidos, fenóis, cianetos, metais pesados e material em suspensão. (BENETTI; BIDONE, 2001).

Identificar os poluentes e parâmetros da qualidade da água, com intuito de comparar com os padrões (limite inferior e superior de cada substância) segundo Legislação vigente do Conselho Nacional do Meio Ambiente, ajuda e direciona os estudos da modelagem e gestão de recursos hídricos.

2.2 Parâmetros de qualidade da água

Dentro do campo geral existem diversos parâmetros importantes da qualidade da água, como foi citado na seção 2.3, mas optou-se em abordar apenas três parâmetros: Oxigênio dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Temperatura (T). Que são os parâmetros mais relevantes para essa dissertação.

2.2.1 Oxigênio dissolvido

O oxigênio dissolvido é um dos principais parâmetros em rios, sua presença é relevante para respiração dos organismos aquáticos. Esse gás é encontrado na água devido ao processo de fotossíntese de algas e ciano bactérias (PIVELI; KATO, 2001).

Além de ser essencial no processo de respiração esse parâmetro também é fundamental para controle de qualidade da água, através dele é possível detectar a poluição das águas por meio de despejos orgânicos. Sua importância é fundamental para a respiração dos organismo aquáticos e para decomposição da matéria orgânica presente na água. Durante a tentativa de estabilização do meio aquático, devido aos despejos de efluentes, as bactérias presentes na água fazem uso do oxigênio para realizar seus processos respiratórios reduzindo, assim, significativamente a concentração do mesmo no meio. (VON SPERLING, 1996).

A solubilidade do oxigênio dissolvido na água pode variar de acordo com a altitude e temperatura. A concentração de saturação indica a quantidade ideal no meio, valores superiores

a concentração de oxigênio dissolvido significa que há a presença de algas já valores bem inferiores a concentração de OD, indicam presença de matéria orgânica oriunda de esgotos. A variação da quantidade de oxigênio dissolvido em água influencia diretamente o meio, valores ente 4 e 5 mg/L peixes de maior porte morrem, abaixo de 2 mg/L todos os peixes morrem. (VON SPERLING, 2007).

Existe um padrão para saber a concentração de saturação de cada ambiente aquático. Este padrão é conhecido e está classificado pela Resolução CONAMA 357/22, dividindo os rios em classes e seus respectivos limites. Em águas doces, rios de classe 1 a quantidade de oxigênio dissolvido não pode ser inferior a 6 mg/L, para rios de classe 2, inferior a 5 mg/L e de classe 3 e 4 não pode ser inferior a 4 mg/L .

2.2.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio

No processo de decomposição dos poluentes *in natura*, esse parâmetro é responsável por indicar a quantidade de oxigênio consumido por micro-organismos aeróbicos em bioma aquático. A análise desse parâmetro é feita em laboratório, através de uma amostra diluída e misturada com pequenas soluções. Essas amostras possuem nutrientes que permitem a ação de micro-organismos com um tempo de incubação de cinco a vinte dias. Consultado outra fonte, o conceito de DBO é definido como: a quantidade de oxigênio necessário para que os micro-organismos presentes em cada amostra oxidem os poluentes (matéria orgânica) para uma forma inorgânica estável. (TEXEIRA, 2004).

Segundo a Resolução CONAMA 357/22, padroniza-se em 5 dias a análise da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅) . Para rios de Classe 1 o limite é de 3 mg/L de O₂ para a DBO₅, Classe 2 com um limite de 5 mg/L de O₂ para a DBO₅, Classe 3 o limite é 10 mg/L de O₂ para a DBO₅ e não havendo especificações para rios de Classe 4.

2.2.3 Temperatura

Esse parâmetro pode ser considerado o mais importante em biomas aquáticos, nos corpos hídricos pode alterar a solubilidade do oxigênio dissolvido em água. A temperatura influencia nas reações químicas, que ocorrem no meio aquático aumentando a velocidade dessas reações na faixa de variação a cada 10 °C de aumento de temperatura (BENETTI; BIDONE, 2001)

Ainda segundo os autores, a temperatura determina a existência e interdependência dos organismos e espécies aquáticas (bactérias, peixes, algas e plantas aquáticas, entre outros). O seu efeito não pode ser considerado isoladamente de outros fatores ambientais. Além disso, nas ETAs (Estações de Tratamento de Água), a temperatura influencia as unidades de floculação/sedimentação, deposição de lodos e estratificação térmica em reservatórios e diminuição da solubilidade do oxigênio.

2.3 Índice de qualidade da água

O Índice de Qualidade da Água foi criado em 1970 nos Estados Unidos pela *National Sanitation Foundation*. Desde 1975, tem sido utilizado pela CETESB (Empresa Ambiental do Estado de São Paulo). Nas décadas seguintes, outros estados brasileiros adotaram o IQA, que hoje é o principal índice de qualidade da água utilizado no país.

O IQA foi desenvolvido para avaliar a qualidade da água bruta para seu uso para suprimento público após o tratamento. Os parâmetros utilizados no cálculo do IQA são principalmente indicadores de contaminação causada pela liberação de esgoto doméstico.

A avaliação da qualidade da água do IQA tem limitações, uma vez que este índice não analisa vários parâmetros importantes para o abastecimento público, tais como substâncias tóxicas, metais pesados, pesticidas, compostos orgânicos, protozoários patogênicos e substâncias que interferem com as propriedades organolépticas da água.

O IQA é composto por nove parâmetros, com seus respectivos pesos (w), que foram fixados de acordo com sua importância para a conformação geral da qualidade da água.

Tabela 1 : Índice da Qualidade de Água e seus parâmetros

Parâmetros de qualidade da água	Peso
Oxigênio Dissolvido	0.17
Coliformes	0.15
Potencial Hidrogênico	0.12
Demanda Bioquímica de Oxigênio	0.10
Temperatura	0.10
Nitrogênio total	0.10
Fósforo total	0.10
Turbidez	0.08
Resíduo Total	0.08

Compreender a importância de proteger os corpos hídricos sendo este um recurso comum, é que é necessário restrições legais de uso. Assim, as características físicas e químicas da água devem ser mantidas dentro de certos limites, que são representados por normas que orientam valores de qualidade da água, estipuladas pela Resolução 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2005).

2.4 Resolução CONAMA

A resolução, criada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), tem como objetivo classificar os corpos hídricos assim como definir padrões e condições de lançamento de efluentes. Essa resolução delimita e orienta a legislação ambiental, verificando se os limites ambientais estão dentro dos padrões legais auxiliando assim na sua gestão.

Segundo a Resolução CONAMA a água é classificada no território nacional brasileiro em: Doce, salobra e Salina. É considerada como água doce quando o corpo hídrico tem salinidade igual ou inferior a 0,5%, água salobra quando tem salinidade superior a 0,5% e inferior a 30% e água salina com salinidade igual ou superior a 30%. A água doce é classificada, pela resolução CONAMA, em:

I. Classe especial

- a) destinada ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção;
- b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas;
- c) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.

II. Classe 1

O tipo de água que pode ser destinada:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000;

d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película;

e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.

III. Classe 2

O tipo de água que pode ser destinada:

a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;

b) à proteção das comunidades aquáticas;

c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho;

d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e

e) à aquicultura e à atividade de pesca.

IV. Classe 3

O tipo de água que pode ser destinada:

a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado;

b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;

c) à pesca amadora;

d) à recreação de contato secundário; e

e) à dessedentação de animais.

V. Classe 4

O tipo de águas que pode ser destinada:

a) à navegação; e

b) à harmonia paisagística.

Essa resolução também apresenta padrões para o lançamentos de efluentes nos corpos hídricos, regulado pela ANA, contribuindo assim para a concessão de outorgas em cenários

diferentes ao longo de todo território nacional. Esses padrões estão relacionados diretamente com o corpo hídrico receptor.

2.5 Modelagem Matemática

Pesquisadores ao longo dos anos vêm desenvolvendo inúmeros modelos matemáticos para estudar a qualidade da água em rios. A implementação adequada de cada modelo auxilia no processo de gestão dos recursos hídricos (OPPA, 2007). A escolha de cada modelo matemático depende basicamente de quatro fatores: características particulares do sistema a ser simulado, nível de precisão desejado pelo projeto, dados reais disponíveis para validação do projeto e disponibilidade efetiva de implementação da metodologia, para representar os processos simulados (TUCCI, 1998). Como já discutido, o primeiro modelo matemático usado para estudar a qualidade da água, levou em conta a relação entre Oxigênio Dissolvido e Demanda Bioquímica de Oxigênio (STREETER; PHELPS, 1925) utilizou as leis da hidrodinâmica, através das equações de difusão, para estudar a relação entre esses dois parâmetros.

Esse modelo ficou bem famoso, pois um dos parâmetros mais difíceis de se medir e calibrar é a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Com modelo de Streeter-Phelps é possível estimar essa relação de uma maneira bem simples e pode ser usado para estudar vários aspectos da dinâmica destes dois parâmetros.

O objetivo desta seção é discutir a hidrodinâmica necessária para o entendimento do comportamento de um efluente ao ser lançado em um corpo hídrico. Os rios que tem caráter longitudinal e substâncias são lançadas neste corpo hídrico ocorre um espalhamento linear no sentido horizontal da sua concentração. Para analisar como representar o sistema, em geral, considera-se uma pequena unidade de volume homogêneo e isotrópico como volume de controle, que está sujeito ao contato e penetração do efluente.

Para este volume de controle, a transferência de massa possui características permanentes, ou seja, a massa da substância que entra é igual a que sai. Usando as equações de continuidade pode-se analisar a transferência de massa nesse volume de controle para cada dimensão como mostra a Figura 1.

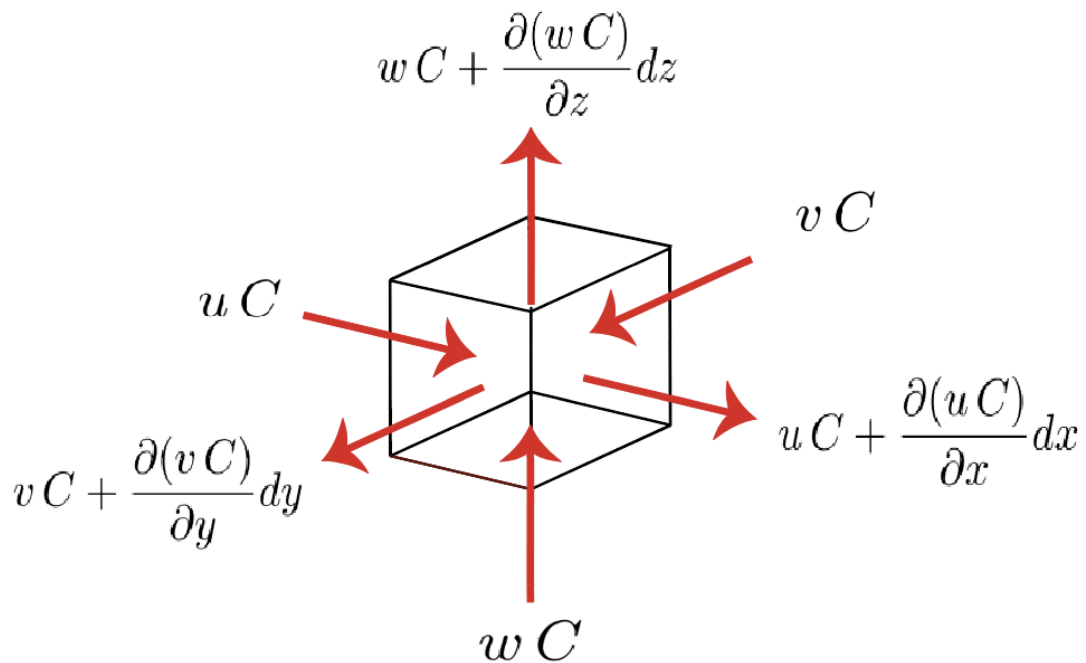


Figura1: Fluxo de massa \mathbf{q} através das faces de um volume de controle.

Fonte: (LOPES, 2009).

A lei de Fick é uma analogia da Lei de Fourier para o processo de transferência de calor. Segundo Fourier, o fluxo de calor que é transferido entre dois pontos é proporcional ao gradiente de temperatura entre os dois pontos, conforme Eq.(1):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -K \nabla T \quad (1)$$

Onde:

$T(x, y, z)$ representa o campo de Temperatura;

K representa a constante de proporcionalidade;

O operador diferencial é:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (2)$$

No caso da transferência de massa, lei de Fick, a analogia se faz considerando um processo advectivo, causado por um campo de velocidade como está representado na Figura 1, que nos dá

$$\mathbf{q} = \mathbf{v} C - D \nabla C \quad (3)$$

Onde:

\mathbf{q} é o fluxo de massa por unidade de área

$C(t, x, y, z)$ é a concentração da substância em análise, cuja unidade é $[M/L^3]$

u, v, w são as componentes do vetor velocidade, \mathbf{v} , do escoamento na direção x, y e z , respectivamente, t é o tempo e D é o coeficiente de difusividade molecular.

A lei de conservação das massas é dada pela equação da continuidade como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} C) = 0 \quad (4)$$

Combinando essas duas equações obtemos, Eq.(5):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} C) = D \nabla^2 C \quad (5)$$

onde o operador Laplaciano é

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (6)$$

Trabalhando com esses conceitos, detalhados aqui, no entanto, considerando as características de um rio, onde predomina a velocidade em uma dimensão; considerando a dispersão instantânea nas direções verticais e transversais; e aplicando as médias espaciais nestas direções, pode-se escrever a equação que representa a difusividade da substância ao longo do canal na forma da Eq.(7)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial C}{\partial x} \right) - k C + S_D, \quad (7)$$

onde C , é a concentração da substância ao longo do canal, em kg/m^3 , u é a velocidade ao longo do canal, em m/s , A é a área da seção transversal do canal, em m^2 , E é o coeficiente de dispersão longitudinal, k é o coeficiente de decaimento da substância em T^{-1} e S_D representa o lançamento distribuído ao longo do canal.

Essa equação pode ser usada para qualquer tipo de substância presentes nos efluentes, controlando os valores de k para cada substância. Por exemplo, se o modelo trata de estudar a relação entre DBO e OD, suas equações são apresentadas, considerando o acoplamento entre o DBO e OD (CHAGAS, 2005), que nos fornece para o DBO

$$\frac{\partial L}{\partial t} + u \frac{\partial L}{\partial x} + L \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial L}{\partial x} \right) - k_d L + S_d \quad (8)$$

e para o OD:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial LC}{\partial x} + L \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial C}{\partial x} \right) - k_d L + k_r (C_s - C) \quad (9)$$

Na próxima seção usaremos o caso onde a difusão efetiva é nula, com escoamento do rio permanente e dispersão longitudinal instantânea. Neste caso temos o modelo desenvolvido por Streeter e Phelps em 1925, que foi o modelo usado nessa dissertação.

A partir do surgimento do modelo de Streeter-Phelps (STREETER; PHELPS, 1925), foi desenvolvido uma gama de softwares de modelagem com o intuito de auxiliar os gerenciadores dos recursos hídricos na tomada de decisão (SEFFRIN, 2001).

O software BASINS foi desenvolvido em 1996, porém desde então vem sendo constantemente melhorado. A sua versão atual permite que os usuários acessem bases de dados ambientais e conjunto de dados especificados pelo usuário. Neste software, pode-se ainda aplicar ferramentas de avaliação e planejamento para avaliar a qualidade de água da bacia. O software DAFLOW, desenvolvido pelo US Geological Survey, é um software que simula o

regime não permanente de rios bem misturados, o destino e movimento dos constituintes dissolvidos, e também o fluxo em sistemas com maior declividade. Nessas condições pode-se aplicar diversos métodos de tratamento de dados entre eles o método dos mínimos quadrados, amplamente utilizado para a análise de precisão para aceleradores de partículas (JOBSON, 1989). O software dinamarquês MIKE 11 foi desenvolvido, pela Danish Hydraulic Institute (DH, 2005), para simular as variações na descarga e nível do corpo hídrico, especificamente, em rios. Essas simulações utilizam os dados das precipitações na bacia hidrográfica, relacionadas a características de entradas e saída do rio (LEITE, 2004). A vazão simulada pode ser relacionada diretamente como fluxo lateral de entrada para um rio ou mais canais (HAVANO et.al 1995). Esse utiliza um modelo hidrodinâmico que baseia-se na diferença de fluxos do corpo hídrico, através da equação de Saint Venant, podendo ainda ser aplicado para simulação bidimensional da descarga, prevendo assim altura e entrada da água no reservatório (JOGENSEN; HOST-MANDSSE, 1997). O QUAL2E é um modelo matemático unidimensional disponível como software livre (COX, 2003). A versão 3.0 foi desenvolvida em parceria entre o departamento de engenharia civil da universidade Tufts em Boston e o laboratório do meio ambiente da USEPA. Esse modelo, pode simular até 15 parâmetros relacionados a qualidade da água, prevendo a mistura dos cursos de diferentes rios com o intuito de calcular os mecanismos de transporte de poluentes, dispersão e advecção ao longo da direção principal do fluxo (direção longitudinal). Seu uso leva em conta a presença de múltiplas descargas de poluentes, considerando a descarga do efluente na bacia constante (PALMIERI; CARVALHO, 2006).

No caso de fluidos turbulentos temos que trabalhar com a equação em 3 dimensões, e envolve aspectos rotacionais podendo ter o aparecimento de vórtices. Os vórtices aparecem em diferentes contextos com diferentes nomes, seja em altas energias, gravitação com o nome de cordas cósmicas (FERREIRA; HELAYEL-NETO;LIMA, 2010), matéria condensada com o nome de defeitos (BAYONA; FERREIRA; OTOYA, 2011) e fluidos (FERREIRA;HELAYEL; NEY, 2008). Também pode-se incluir os efeitos da torção (FERREIRA,HELAYEL-NETO,GODINHO, 2017) que na linguagem da hidrodinâmica pode-se relacionar com as tensões de cisalhamento. Nestes casos as equações da difusão se tornam bem mais complicadas, e são importantes de estudar em caso de enchentes. É interessante estudar as equações de Navier-Stokes, que depende do número de Reynolds importante na análise se o escoamento é laminar ou turbulento. Também pode-se fazer o estudo do formalismo lagrangeano (HAFJIGHASEM, FARAZMAND,BLAZEVSKI, FROYLAND,

HALLER, 2017) para o estudo de vórtices lagrangeanos com uma simulação numérica da turbulência de Navier-Stocks (HALLER, HAFJIGHASEM, FARAZMAND, HUHN, 2016).

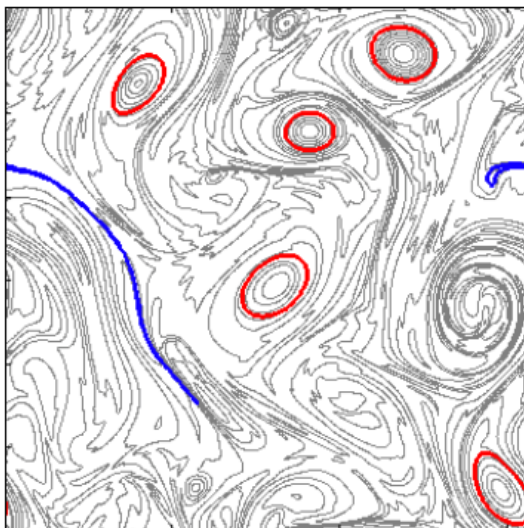


Figura 2: Os vórtices coerentes (vermelho) preservam sua forma durante um longo período de tempo em oposição a um vórtice não-coerente (azul). As curvas cinza mostram os contornos de vorticidade instantâneos.

Fonte: <http://georgehaller.com/research/projects.html>

Esses vórtices coerentes foram simulados usando um modelo tridimensional dinamicamente consistente do oceano. Pode-se também citar trabalhos recentes sobre barreiras de transporte elíptico para fluxos tridimensionais instáveis para detectar vórtices coerentes no vazamento de agulhas. Nestes trabalhos foram utilizados o campo de velocidade Southern Estimate (SOSE) do Sul, que é um modelo dinamicamente consistente que assimila as medidas físicas de temperatura e salinidade. As barreiras extraídas são limites de materiais afiados para vórtices de evolução coerente que não se misturam com seus arredores (HALLER, HAFJIGHASEM, FARAZMAND, HUHN, 2016). Uma ideia futura seria estudar tais configurações nas soluções das equações para rios.

Nesta dissertação, utilizou-se o modelo de Streeter-Phelps para analisar a relação entre o DBO e OD levando em conta a temperatura e métodos matemáticos de análise dos dados reais necessários para a sua validação. No entanto pode-se também criar softwares de simulação como os abordados na revisão de literatura que podem ser acoplados as equações de Streeter-Phelps, atuando no desenvolvimento de simulações com características específicas de cada corpo hídrico. Nesta dissertação, utilizou-se como dados para a validação de modelos teóricos, os dados coletados na região da implantação da estação e dados das estações do INEA. A

modelagem matemática e de suma importância para avaliar as características do rio e suas necessidades para monitoramento, como: tipo de sensores, qualidade dos sensores, tempo de medição, entendimento da evolução dos parâmetros em relação a região de estudo, entre outros.

Um ponto importante é que o modelo de Streeter-Phelps descreve a maioria dos processos físico, químicos e biológicos relevantes para modelar a qualidade da água por isso partimos deste modelo para entender as características do rio (MANNINA; VIVIANI, 2010).

Por outro lado, deve-se ter atenção para o fato que, para fazer uma modelagem matemática correta é preciso além de validar o modelo com os dados reais, também fazer uma vasta revisão de bibliografia. Essa revisão, serve não só para decidir quais os modelos, dos já existentes, que melhor se adequam às características do sistema como propor novos termos que possam atender uma determinada característica. Neste sentido tem-se que garantir que os dados sejam confiáveis. Com o monitoramento da qualidade da água proposto pela nossa estação será possível validar uma gama de modelagens incluindo as que estão analisadas nesta dissertação (HUANG; LIU, 2010).

2.6 Sistema de monitoramento da qualidade da água

Investimentos substanciais têm sido feitos na área de monitoramento da qualidade da água nas últimas duas décadas. Nos Estados Unidos, estes investimentos têm sido feitos pelo governos federal, estaduais e locais, tribos, serviços de água, universidades e muitos outros desde o início do monitoramento da qualidade da água no início do século XX (MYERS, 2015). Os fundos para o monitoramento estão lentamente se deteriorando ao longo do tempo (NRC, 2004). Por exemplo, o US Geological Survey (USGS) começou a monitorar uma rede de 505 sites de transmissão em todo os Estados Unidos em 1991, através do projeto Nacional de Avaliação da Qualidade da Água (NAWQA). Desde então, as reduções no financiamento levaram a uma redução na rede NAWQA para 117 sites, limitando a resolução espacial e temporal dos principais achados do programa (ROWE et al., 2013). Duas outras redes nacionais de monitoramento da USGS, a Rede Hidrológica de Referência (focada em rios pequenos) e a Rede Nacional de Contabilidade de Qualidade de Transmissão (focada em rios grandes) foram reduzidas de 54 para 15 sites e de 518 para 39 sites, respectivamente, entre os anos 1970 e 1990 (HOOPER et al., 2001). Desta forma, pode-se perceber que apesar dos avanços das técnicas de

mapeamento e monitoramento de ambientes subaquáticos monitorar estes ambientes é uma tarefa cara e difícil.

Apesar disso novas tecnologias têm sido criadas com intuito de baixar o custo das estações de monitoramento, recentemente Wen-Yaw dentre outros apresentaram um sistema para monitoramento da qualidade da água (VIEIRA, 2011). A comunicação entre os módulos do projeto foi feita utilizando o ar, por meio de rádio frequência. Nesse caso, apenas os módulos que contém sensores se encontram em contato com a água, ou seja, o controle, a parte elétrica e eletrônica, e a comunicação se encontram fora da água. Esta característica implica em restrições com relação à profundidade em que um sensor poderá operar, pois os dados serão transmitidos via cabo até a superfície e estarão sujeitos às limitações deste tipo de comunicação. Em (VIEIRA, 2009), é descrito um trabalho envolvendo aplicação de Rede de Sensores Aquáticos para sistemas de vigilância. Nesta aplicação os sensores ficam submersos e enviam, via cabo, todos os dados coletados para uma bóia dotada de um módulo de comunicação sem fio. Este trabalho teve como objetivo apresentar como a distribuição dos nós sensores afetou o desempenho da rede. No trabalho de Lu, foi apresentado um projeto de nó sensor cujo objetivo é analisar a viabilidade, em ambientes aquáticos, da comunicação acústica (VIEIRA, 2008). O projeto não leva em consideração as implicações de variação e transmissão de dados. As características de baixo consumo do nó limitam a comunicação a um intervalo de 3 metros de distância, tornando sua aplicação inviável no mundo real. Até onde sabemos, o sistema computacional constitui a primeira plataforma para Rede de Sensores Aquáticos dotada de: baixo custo, eficiência energética, adequação a diversas aplicações, compatível com diversos tipos de sensores analógicos e digitais, comunicação a grandes distâncias em ambientes aquáticos e projeto aberto.

Na China, por exemplo, foi realizado uma pesquisa por Zhang *et al.*(2011) no Rio Songhua, que por meio de um software integrado com um sistema de posicionamento geográfico, neste caso, foi possível simular a evolução da concentração de poluentes ao longo do tempo. A importância deste sistema de monitoramento visa não só fornecer informações quantitativas das concentrações dos poluentes a decisores políticos, como também montagem de bancos de dados, que possam armazenar séries temporais para análises de gerações futuras.

No trabalho de Domagalski (1997), na Califórnia, foi feito um estudo de caso sobre a concentração de pesticidas no Rio San Joaquin. Três amostras por semana, ao longo de 6 semanas eram coletadas para análise em laboratórios, esse processo tinha um tempo lento de resposta. No Brasil, pesquisadores utilizaram esse mesmo princípio de coleta manual realizando

diversas amostragens ao longo do ano com objetivo de fazer uma avaliação de parâmetros físicos e químicos da água (BOTELHO, 2013).

O desenvolvimento de pesquisas de monitoramento a tempo real torna-se uma ferramenta muito adotada nos últimos anos. A justificativa para isso vem do fato que o método de monitoramento com coleta manual da água e análise em laboratório é uma técnica muito lenta e com custo muito elevado (HANGAN et al., 2013). Desta forma, o grande desafio é criar novas ferramentas de monitoramento em tempo real de baixo custo sabendo das limitações e dificuldades da implementação desses sistemas. Portanto, pesquisou-se diferentes tipos de monitoramento com metodologias variadas. O estudo realizado por Peixeiro, Postalache, Dias Pereira (2012), propõe um instrumento virtual de “baixo custo” para medição de variáveis importantes para qualidade da água através de células eletrônicas, tecnologia baseada na condutividade elétrica dos líquidos que advém da quantidade de íons dissolvidos na água. O sistema de aquisição de dados é habilitado pela placa DAQ NI USB-6008 e processado pelo software LabView. Zhang, Zhang, Hong, (2013), criaram um protótipo baseado no protocolo *Modbus* e estação de rádio sem fio para transmitir informações. O protocolo *Modbus* com barramentos mestre escravo é uma tecnologia bastante eficiente pois sua fiação pode estende-se por longas distâncias porém os transdutores que se comunicam ao protocolo são de custo muito elevado.

Uma outra alternativa foi a desenvolvida por Vijayakumar, Ramya, (2015), que desenvolveram um sistema para monitoramento em tempo real, utilizando transdutores, Raspberry Pi + B como controlador e modulo (USR-WIFI232-X-V4.4) de internet para transferir dados. Esse modulo é capaz de enviar os dados para a internet utilizando computação em nuvem. Hongpin et al. (2015), criou um sistema de monitoramento em tempo real da qualidade da água para aquicultura. Através de uma rede de sensores sem fio utilizando agrupamento hierárquico e controlador lógico programável disponibilizando os dados coletados através do protocolo *Zigbee* e módulos GPRS.

No trabalho de JO, BALOCH, (2017) pesquisadores utilizaram tecnologias com técnica de Internet das coisas IOT, microncotrolador (arduino) e módulo de sensores para monitorar a qualidade da água. Ainda relatam que fatores físico-químicos da água como: temperatura, potencial hidrogênico e taxa de oxigênio dissolvido são de extrema importância para o monitoramento dos ecossistemas marinhos. Técnicas de estatística e métodos matemáticos também foram aplicadas na pesquisa para analisar o fluxo de dados, afim de minimizar erros e fazer o controle desses parâmetros no córrego Jungnangcheon do rio Han. Esse rio passa pelo centro de Seul região metropolitana da coreia do Sul.

No trabalho de BARDAJI et al., (2016) um parâmetro crítico para avaliar o estado da água é a quantidade de luz refratada em seu meio, a turbidez pode indicar grande quantidade de matéria orgânica e sedimentos suspensos, aumentando significativamente a produção de fitoplânctons desregulando o equilíbrio do ecossistema aquático. O parâmetro utilizado para avaliar a transparência foi o coeficiente de autenticação difusa. O equipamento construído foi considerado de baixo custo chamado de KdUINO, como componente principal desse protótipo um arduino MEGA2560 R3. Pesquisadores desenvolveram uma grande pesquisa utilizando ferramentas tecnológicas e conceitos de física aplicada. O Kdunio apresentou resultados satisfatórios comparados à radiômetros profissionais. O sistema permite o monitoramento de transparência da água em regiões costeiras, lagos e rios.

Como já foi falado, segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2017) os índices ocorrência de mortes associadas a veiculação hídrica ainda é muito elevada. No Brasil cerca de 28 mil pessoas morrem por ano provocadas por doenças relacionadas a água contaminada. Na maior parte dos casos essas doenças desenvolvem-se por falta de saneamento básico em regiões mais pobres. A ausência de recursos financeiros nesse setor é notório. Para melhorar esse quadro é de grande importância que o governo invista mais nesse setor. Atualmente conhecer a fonte de contaminação dos recursos hídricos, é essencial para o controle e monitoramento dos focos vetores.

Outro ramo comum no uso de tecnologias de suporte de baixo custo é o da agricultura. Com os problemas atuais de escassez de água mundial, a idealização de projetos que utilizam água de forma eficiente vem aumentando. Sistemas de irrigação e controle de cultura no campo costumam ser de custo elevado. Os componentes de *hardware* e *softwares* são comerciais o que dificultam a manutenção tornando a atividade onerosa. No trabalho de MASSERONI et al., (2016) pesquisadores utilizaram um projeto com tecnologia de suporte para monitoramento contínuo do potencial hídrico do solo na zona de raiz. A finalidade do modelo desenvolvido foi projetar melhor o fluxo de irrigação no campo sem desperdício de água. Para isso foi utilizado microcontrolador (arduino), cartão micro SD, painel solar, bateria 12V, placa GSM arduino para transmissão de dados via protocolo Tcp/IP. Os parâmetros aferidos por sensores foram potencial hídrico do solo e temperatura. Esse processo repetia-se a cada cinco minutos. O projeto consta três grandes etapas. Etapa 1, apenas limitou-se em gravar os dados dos sensores em cartões micro SD. Na etapa 2, além de armazenar dados no micro SD eles eram enviados para um servidor *web*. Na etapa 3 os dados são enviados para servidor *web* e podem ser controlados por um servidor móvel como: celular, *tablet* ou até mesmo computador portátil. No

trabalho BITELLA et al., (2014) autores relatam que o monitoramento da quantidade de água no solo é fator crucial para técnicas de agricultura sustentável.

Na Tabela 2 foi feito um comparativo das tecnologias utilizadas. A semelhança desses artigos é que todos são técnicas de monitoramento da qualidade da água em rios utilizando sensores e placas microcontroladoras.

Tabela 2: Artigos base da dissertação

Título	Microcontrolador	Parâmetros	Autores
<i>Remote Delay Tolerant Water Quality Monitoring</i>	Arduino uno	TEMP, PH, DO,CE,ORP	(RITTER et al., 2014)
<i>A Wireless Sensor Network Solution for Monitoring Water Quality in Botswana</i>	ATmega 1281 8-bit	PH, NTU, ORP, CE	(PULE; YAHYA; CHUMA, 2016)
<i>Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring</i>	PIC32MX220F032B	TEMP, PH, CE, ORP , N, OD, NTU, CL	(CLOETE; MALEKIAN; NAIR, 2016)
<i>Multi-Sensor System for Remote Environmental (Air and Water) Quality Monitoring</i>	Arduino uno	PH, DO, CE,ORP	(SIMIC et al., 2016)

Pode-se perceber que na maioria das pesquisas relacionadas ao monitoramento em ambiente aquático os parâmetros escolhidos são: TEMP, PH, CE, ORP , N, OD, NTU, CL. Segundo Cutrim, (2013) através da taxa de potencial hidrogênico e condutividade elétrica é possível detectar resíduos industriais e lançamento de esgoto sem tratamento em rios. Segundo Ashbolt (2004) em rios contaminados por redes de esgoto é comum o desenvolvimento de

agentes patógenos microbianos como: *Shigella*, *Escherichia coli*, *Vibrio vulnificus*, *Entamoeba histolytica*, principalmente em regiões subdesenvolvidas. A transmissão dessas doenças é causada pela ingestão da água com resíduos fecais. Porém a água contaminada nos rios não é o único foco de vetores de doenças. Disposição final inadequado de resíduos sólidos e baixo nível de água em períodos de estiagem também são potenciais vetores de doenças.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 A Região de Estudo

O município de Campos dos Goytacazes localiza-se na região Norte do Rio de Janeiro, Brasil e tem uma população estimada em 483.970 habitantes, área territorial de 4.043,22 Km² corrido pelo Rio Paraíba do Sul que abastece o município (IBGE, 2016). Esse rio possui uma extensão territorial de 20.900 km². Esse flume é formado pela união dos Rios Paraibuna e Paraitinga, seu comprimento é de aproximadamente 1.100 km onde apresenta formadores de margem direita e esquerda, curso inferior no território fluminense com 250 km de extensão. Na Figura 3, está sinalizada a região do município de Campos dos Goytacazes.

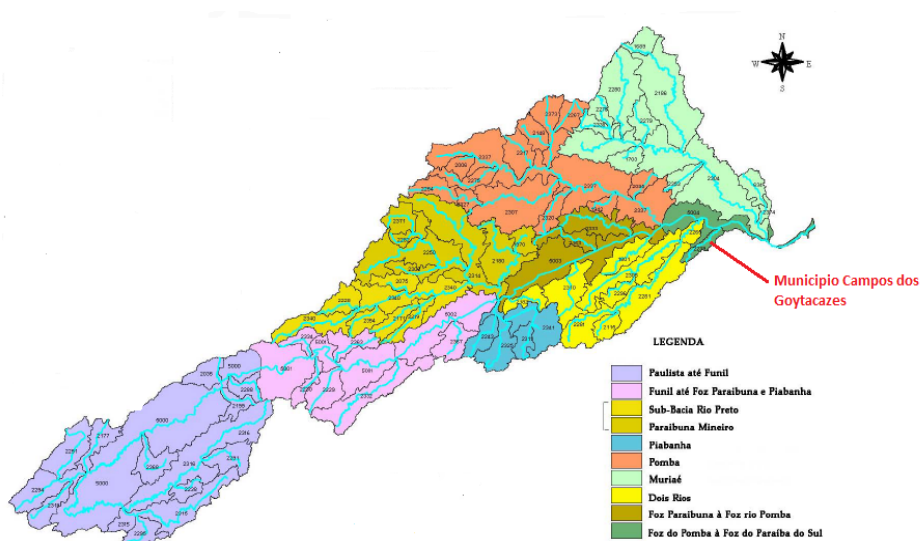


Figura 3: Sub-bacias do Rio Paraíba do Sul no Estado do Rio de Janeiro/Brasil,.
Fonte: (AGEVAP, 2017).

O Rio Paraíba abrange 84 municípios, sendo 39 localizados no Estado de São Paulo, 57 no Estado do Rio de Janeiro e 88 em Minas Gerais. Aproximadamente 14,2 milhões de pessoas, se abastecem das águas de sua Bacia (AGEVAP, 2012).

O Rio Paraíba do Sul, é responsável por abastecimento de água e energia elétrica de boa parte dos moradores da região fluminense. Parcela de sua vazão é desviada para o Rio Guandu, manancial que abastece a cidade do Rio de Janeiro (TOGORO, 2006). Tendo em vista a

importância social e econômica do Rio Paraíba do Sul para o estado do Rio de Janeiro, bem como a grande diversidade de peixes, é essencial tomar medidas de controle da qualidade da água e a educação ambiental, propondo ações preventivas contra poluição e acidentes ambientais (TOGORO, 2006).

Em 2009, foi instalado, através do decreto nº 41.628, o Instituto Estadual do Ambiente (INEA) vinculado a Secretaria de Estado do Ambiente. Esse órgão nasceu da junção da Fundação Estadual de Engenharia de Meio Ambiente (Feema), Superintendência Estadual de Rios e Lagos (SERLA) e o Instituto Estadual de Florestas (IEF). A sua missão passa a ser a de proteger, conservar e recuperar o patrimônio ambiental visando promover o desenvolvimento sustentável. Devido a sua ampla missão foi notório a dificuldade de um monitoramento minucioso da qualidade da água. A partir de então, surgiu a necessidade da utilização de uma metodologia de indicadores ambientais para o controle da qualidade da água, através da implantação de diversas estações de monitoramento.

Dentre as estações criadas, algumas estão localizadas ao longo do Rio Paraíba do Sul. Neste documento de dissertação escolheu-se a região hidrográfica IX, denominada Baixo Paraíba do Sul e Itabapoana, representada no gráfico da Figura 4.

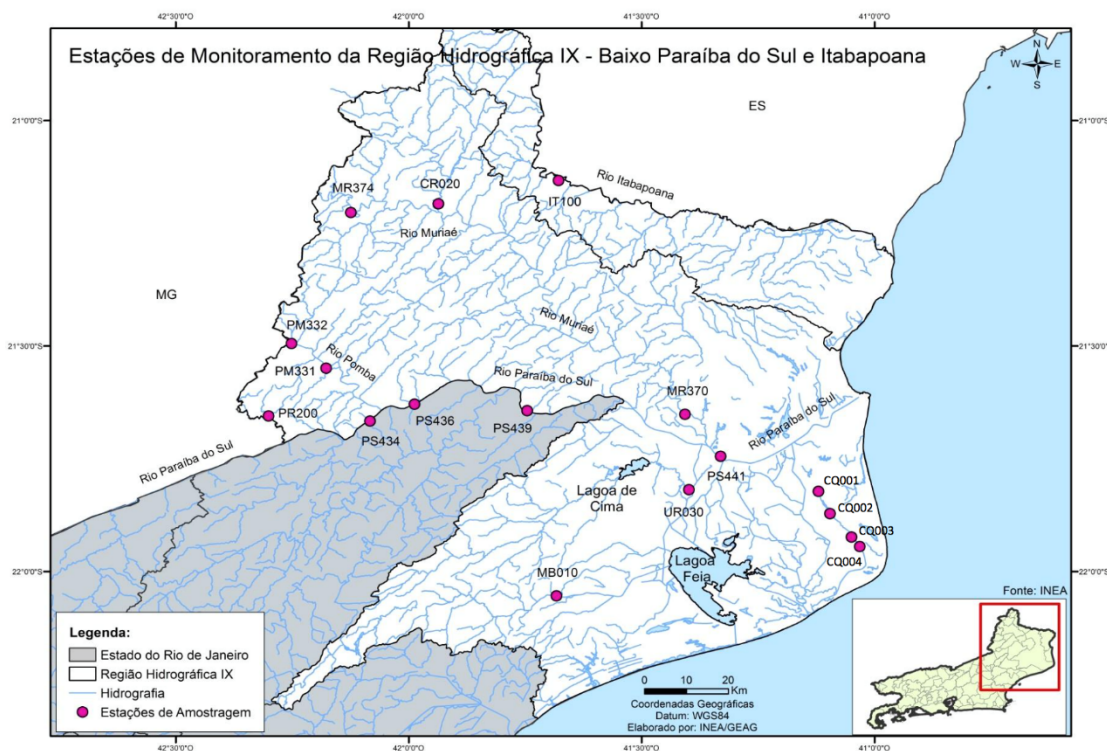


Figura 4: Mapa da região Hidrográfica IX, que contém a região de Campos dos Goytacazes. Fonte: (INEA, 2016)

A importância de um indicador ambiental, no caso em questão, Índice da Qualidade de Água é a tradução dos dados técnicos em um indicador visando promover a interlocução entre os diversos atores envolvidos.

A região do médio Paraíba é uma região que sofre por muita poluição de indústrias e despejo de esgoto residenciais sem tratamento adequado. Alguns resultados de estudo de caso e aferições ao longo do rio superou os limites definido pela resolução CONAMA 357/2005 entre os trechos da região paulista (Jacareí e Canas) e trechos Parainuna e Muriaé. Os responsáveis pelos lançamentos de carga orgânica nos corpos hídricos são resultados de despejos de esgoto in natura. A poluição gerada nessa região do Rio Muriaé é transportada até a foz do Rio Paraíba do Sul. Na Figura 5 é possível visualizar as áreas mais críticas com elevadas taxas de DBO mg/L (AGEVAP, 2012).

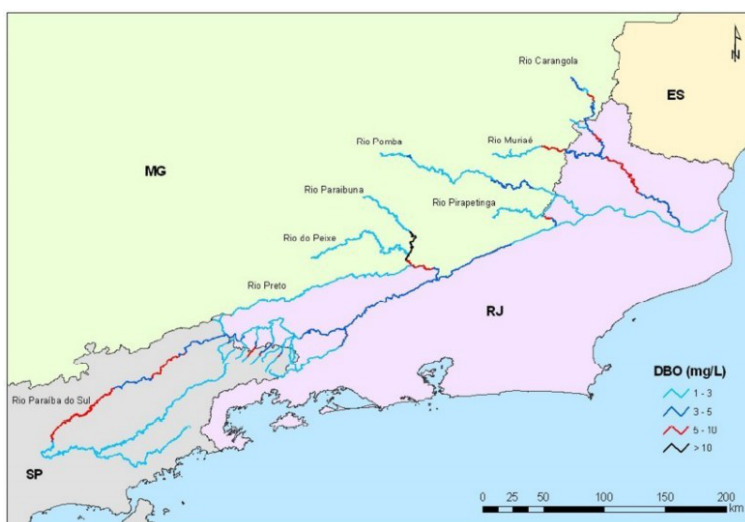


Figura 5: Áreas com elevadas taxas de DBO.

Fonte: <http://agevap.org.br/downloads/110815%20-%20Anexo%20plano>

Esses relatórios disponibilizados em portais eletrônicos da AGEVAP, indicam grande carência de projetos nas áreas de captação e transposição, setor elétrico, vazão e hidrometria, cartografia, demanda de água, qualidade da água e modelagem hidrodinâmica. Por esse motivo novos projetos de estações de monitoramento da qualidade da água que supram essas demandas são essenciais para assegurar a manutenção desse extenso corpo hídrico (AGEVAP, 2012). O problema de poluição que começa no alto do rio Muriaé é transportado até a foz. A localização da estação proposta é estratégica para o desenvolvimento de pesquisas de controle ambiental e supre duas áreas que estão em déficit essas são: controle de qualidade da água e modelagem hidrodinâmica.

Com o intuito de atender a um número maior de pontos e melhorar o monitoramento para reforçar a manutenção desse rio e preservá-los de acidentes e degradação ambiental é que a ideia desta dissertação é a criação de mais uma estação de monitoramento ao longo do rio Paraíba do Sul, na região de Campos dos Goytacazes. No município de Campos dos Goytacazes existe uma unidade chamada Polo de Inovação Campos dos Goytacazes (PICG) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Essa unidade situa-se a margem direita do Rio Paraíba do Sul, com coordenadas geográficas de latitude $21^{\circ}44'22''$ Sul e longitude de $41^{\circ}12'26''$ Oeste, na estrada BR-356, em bioma de Mata Atlântica.



Figura 6: Mapa de localização do PICG.

Fonte: Adaptado Google Maps, 2016 & Google Earth, 2016,

Como demonstrado na Figura 6, no ponto A, a localização escolhida para montagem da estação é próxima da foz do Rio Paraíba do Sul recebendo águas de diversas regiões, fato este reafirma a escolha da região. Com a validação da metodologia empregada pretende-se posteriormente aumentar a área de estudo construindo novos pontos de estações.

3.2 Dados Disponíveis Utilizados

Neste trabalho, foram utilizadas duas fontes de dados importantes para mensurar a qualidade da água: dados provenientes da PICG e provenientes das estações do Instituto INEA. Segundo Mayer (2005), a combinação de dados da qualidade da água de várias fontes pode ajudar a contrabalançar a diminuição de recursos para monitoramento de fluxo e levar a

importantes percepções regionais e nacionais que, de outra forma, não seriam possíveis. Organizações de monitoramento individuais entendem muito bem seus próprios dados, mas podem surgir problemas quando seus dados são combinados com dados de outras organizações que usaram métodos diferentes para relatar os mesmos elementos comuns de metadados. Esse uso de dados de várias fontes é denominado “uso secundário” que são os dados usados além da intenção original determinada pela organização que os coletou.

No PICG, são realizadas pesquisas tecnológicas e ambientais. Nesta unidade, também são realizadas estudos da qualidade da água, através de ensaios físico-químicos das variáveis de: pH, turbidez, temperatura, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, cloro total, microbiológicos de coliformes termotolerantes e coliformes totais. Nesta dissertação utilizou-se os dados provenientes desses ensaios, Tabela 3 (Oliveira et al, 2014), juntamente com os dados disponibilizados no portal eletrônico INEA (INEA, 2015), para validar os modelos teóricos propostos.

Tabela 3: Dados coletados do (PICG).

Parâmetros/Mês	OD (mg/L)	Temp (°C)	Vazão (m ³ /s)
Fevereiro	6,20	25,80	865,30
Março	5,45	26,60	776,60
Abril	7,80	26,30	653,20
Mai	7,90	24,30	392,70
Junho	7,20	23,70	277,40
Julho	8,30	22,70	334,90
Agosto	8,20	20,70	261,10
Setembro	8,60	26,40	234,30
Outubro	8,10	24,20	244,50
Novembro	8,10	26,00	239,20
Dezembro	7,30	25,40	1551,10
Fevereiro	9,70	17,80	291,10

Os dados da Tabela 3 foram obtidos através da coleta manual por meio de garrafa de Van Dorn com análises feitas em laboratório (PICG).

No caso das estações do INEA, pesquisou-se 17 estações da região IX, destas estações muitas delas apresentam dados faltantes. Para o estudo do comportamento do Rio Paraíba do Sul e validação do modelo teórico utilizou-se os dados da estação PS441, PS439, MR370 e UR030 conforme Figura 4, comparando com os dados PICG. Foi feito também um diagnóstico da região incluindo os dados da pluviosidade da região.

Neste trabalho é importante levar em conta os dados da pluviosidade da região, pois está ligado aos dados da qualidade da água. Na Figura 7, pode-se observar os dados de pluviosidade.

Pluviosidade

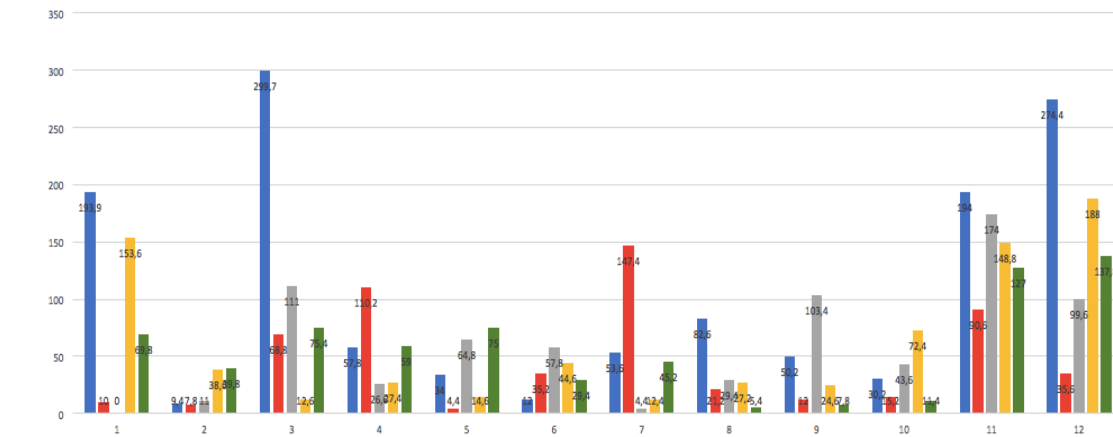


Figura 7: Dados históricos da pluviosidade dividido por mês. A barra azul corresponde ao mês de 2013, vermelho 2014, cinza 2015 e verde 2016.

Para as quatro estações da INEA, obteve-se os dados anuais de Oxigênio Dissolvido (OD), Figura 8.

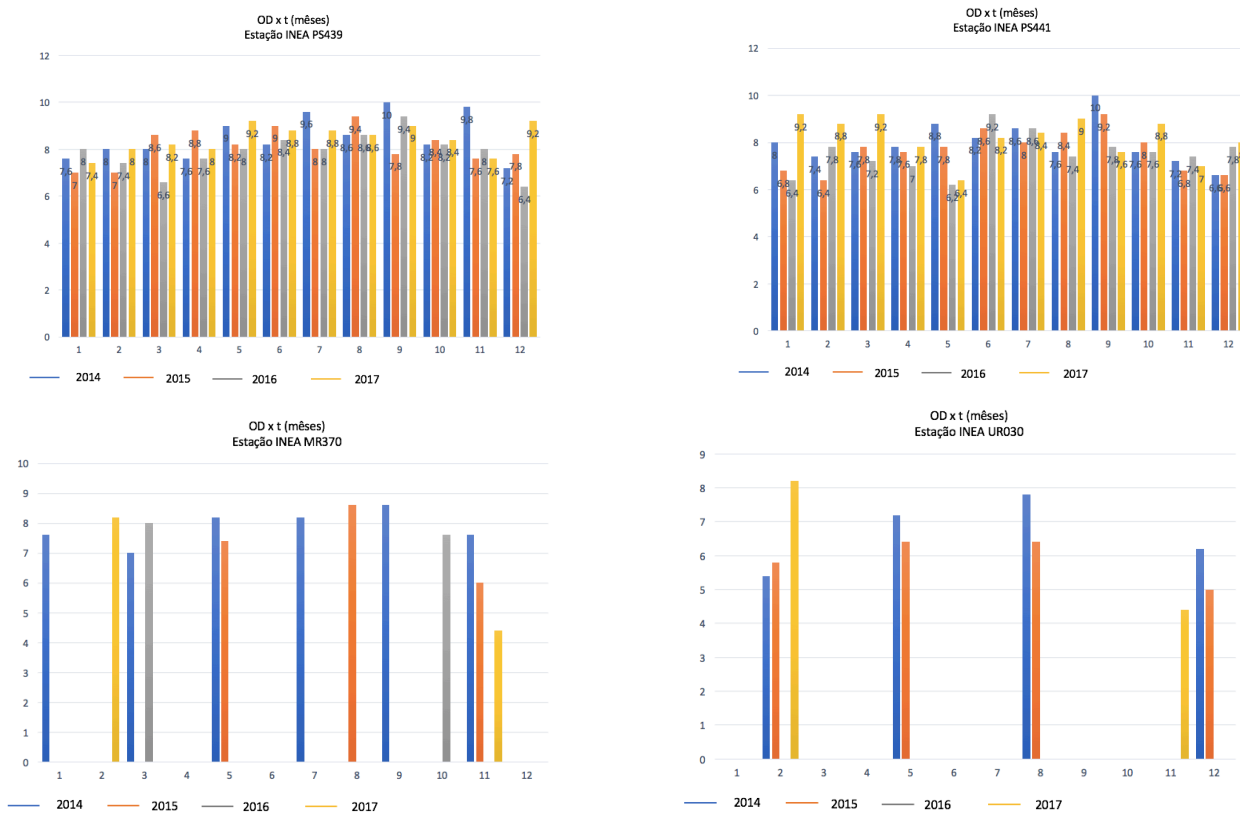


Figura 8: Dados do Oxigênio Dissolvido para a estação PS439, PS441, MR370 e UR030 entre os anos de 2014-2017.

O INEA coleta amostras mensais de água de superfície usando métodos padronizados (ANA, 2009). Na Figura 8, estão os dados anuais de quatro das 17 estações de qualidade da água da região IX (PS439, MR370, PS441 e UR030), conforme Figura 4. Optou-se por estas estações pela relevância de sua localização comparada com suas posições relativas ao PICG, e porque tinham registros mais completos de amostragem de qualidade da água durante todo o período do estudo: 2014-2017. Exceto a MR370 e UR030 que apresenta lacunas de aferições em diversos meses, no entanto devido à sua importância também foram analisadas. É válido ressaltar que a estação PS439 e MR370 ficam localizadas antes da PS441 sendo que a PS439 fica no Rio Paraíba do Sul e a MR370 na região do Rio Muriaé formando uma bifurcação que deságua na PS441 e na UR030, como mostra na Figura 4. Por consequência é possível comparar o transporte de poluentes de uma região a outra.

Para o estudo do lançamento do efluente e comparação da demanda de Oxigênio Dissolvido (OD) X Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) via modelagem matemática, utilizou-se os dados mensais, quando houver. Para a análise dos dados da medição no PICG tem-se somente os dados para o ano de 2013.

3.3 Métodos Numéricos para a análise dos dados experimentais

Para se estabelecer um diagnóstico da região como um todo, analisou-se os dados utilizando a melhor curva que passa pelos pontos de um determinado parâmetro pelo método da regressão linear.

A metodologia para análise dos dados foi estruturada a fim de obter uma função que se aproxime melhor dos dados utilizados, após um estudo bibliográfico, verificou-se que o método mais usado na literatura quando tem-se um número grande de dados foi o método dos mínimos quadrados. Muitas vezes o uso de uma função complexa, com cálculo complicado, pode ser evitado se for utilizada uma outra função que possa substituí-la, dentro de uma determinada margem de erro em um determinado trecho. Para a análise de tendência foi usado o método da regressão linear pois, com base nos dados experimentais, foi o método que mais se adequou.

Quando a função aproximadora, $g(x)$, é uma reta, o método dos mínimos quadrados reduz-se a uma reta. Desta forma, o objetivo da Regressão Linear é aproximar uma função $f(x)$ por uma função $g(x) = a + bx$, de forma que a soma dos quadrados dos erros e cada ponto $f(x)$ seja menor possível, isso é feito através de um sistema linear dado por:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n 1 & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

Desta forma, o objetivo deste método é encontrar uma função $g(x)$ que mais se aproxima de outra função $f(x)$. A aproximação é feita da seguinte maneira:

Sejam $f(x)$ a função original, $g(x)$ a função que irá aproximar $f(x)$, e $E(x)$ a função erro, que exprime as diferenças entre $f(x)$ e $g(x)$. Assim o erro é dado por:

$$E(x) = f(x) - g(x) \quad (11)$$

Teoricamente, a melhor aproximação será aquela em que $E(x) = 0$. No entanto em geral não conhecemos a função segundo os dados experimentais que representa, então será calculado ponto a ponto. A função aproximadora foi calculada usando o método da regressão linear, segundo dados experimentais devido ao comportamento do OD x T da região estudada. Essa função será necessária para calcular o coeficiente de saturação do oxigênio dissolvido em função da temperatura. O método usado para o cálculo do erro foi o do “*square error*”, ou seja, o desvio quadrático do erro no cálculo do OD que é dado por:

$$SE_{reta} = \sum_{i=1}^n [OD_i - (a + bT_i)]^2 \quad (12)$$

e o desvio quadrático da média de OD

$$SE_{\bar{OD}} = \sum_{i=1}^n [OD_i - \bar{OD}]^2 \quad (13)$$

Onde o OD médio;

$$OD_{med} = \sum_{i=1}^n (OD_i) / n \quad (14)$$

Desta forma, o erro da função aproximadora em relação aos dados experimentais é dado por:

$$R^2 = 1 - \frac{SE_{reta}}{SE_{OD_{med}}} \quad (15)$$

Neste capítulo, estudou-se os métodos numéricos que foram usados para a validação da modelagem matemática feita no capítulo 4. Esses métodos são importantes para a análise da tendência do rio, inserção e evolução dos poluentes ao longo dos anos.

3.5 Modelagem Matemática e a Relação entre OD x DBO

A estação de medida da qualidade da água desta dissertação é capaz de medir quatro parâmetros (CE, OD, T e pH) importantes para a avaliação de sua qualidade. A dinâmica desses parâmetros respeita a equações de difusão como a Eq.(5). Nesta dissertação foi investigado o comportamento do Oxigênio Dissolvido (OD) com a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Em geral a medida do DBO é bem mais complexa que do OD, esse e um dos motivos da modelagem matemática ser um ótimo artifício para estimar os valores do DBO usando equações de difusão.

Streeter e Phelps usaram a Eq.(5) para estudar a relação entre a DBO e o OD. Assumindo-se uma completa e instantânea homogeneização na seção transversal, regime permanente de escoamento e que o transporte difusivo seja de magnitude desprezível, a Eq.(8) pode ser escrita na forma da Eq.(16)

$$\frac{dC_{DBO}}{dt} = -k_d C_{DBO}, \quad (16)$$

para DBO, onde C_{DBO} é a concentração de DBO e k_d é o coeficiente de remoção de DBO efetiva do rio. Para OD tem-se a Eq.(8) escrita como

$$\frac{\partial C_{OD}}{\partial t} = -k_d C_{DBO} + k_r (C_S - C_{OD}), \quad (17)$$

onde k_r é o coeficiente de reaeração e C_S é a concentração de saturação do gás. Esta concentração depende da temperatura e pode ser calculada usando os dados da regressão linear. A última demanda bioquímica, DBO total ao final da estabilização, ou DBO remanescente para $t = 0$ pode ser calculada por:

$$C_{DBO_0} = \frac{(V \times C_r + V_{ef} \times C_{ef})}{V + V_{ef}} \quad (18)$$

onde V é a vazão do rio, C_r é a concentração no rio, imediatamente a montante do ponto de mistura, V_{ef} é a vazão do efluente e C_{ef} é a concentração do constituinte analisado no efluente.

Desta forma, pelas equações de Streeter-Phelps, pode-se calcular a concentração de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), o déficit de OD (Oxigênio Dissolvido), e a concentração de OD presente na água. Uma vez definidas estas variáveis de controle, é possível entender os principais processos que permeiam um sistema hídrico, bem como fazer a análise dos parâmetros físicos, químicos e biológicos envolvidos nas equações.

Esse sistema de equações de primeira ordem é importante para entender o que acontece com o Efluente quando este entra em contato com o corpo hídrico. Do ponto de vista da gestão de recursos esta equação é muito importante. Pois dependendo das condições do Rio, o efluente depura o esgoto sobre ação do oxigênio dissolvido na água, diminuindo a sua taxa. Por este motivo, depois de um certo valor de OD os peixes começam a morrer, tornando-a muito importante. Um outro fator que será considerado neste trabalho é a contribuição devido outras fontes de poluentes em um determinado despejo. No caso do rio isto é muito importante, sendo um meio altamente dinâmico que sofre influência de varias áreas de despejo.

Na parte de modelagem a metodologia empregada, foi considerar vários cenários para fontes pontuais e comparar com a lei vigente para as outorgas na região.

A concentração de saturação de oxigênio pode ser calculada com base em certas considerações teóricas ou através de fórmulas empíricas. O valor de C_S é em função da temperatura e da altitude, sendo que:

- Quanto maior a temperatura, menor a concentração de saturação: devido às moléculas estarem em um estado mais agitado os gases dissolvidos tendem a ser "expulsos" de meio líquido indo para meio gasoso.

- Quanto maior a altitude, menor a concentração saturação. A redução da pressão atmosférica reduz a pressão exercida para que o gás se dissolva na água (VON SPERLING, 2005).

O Cálculo para achar a Concentração de Saturação do Oxigênio Dissolvido baseia-se nos dados experimentais extraídos das estações da INEA e Polo de Inovação. Com o método dos mínimos quadrados calculou-se a melhor curva que passa por esses pontos por ano.

3.6 Estratégia de Montagem da Estação de Monitoramento

Nesta sessão, serão detalhados a divisão dos componentes do protótipo de simulação da estação de monitoramento para simulação em bancada. Os testes de bancada podem ser construídos com diferentes tipos de placa de aquisição, sensores e fonte de alimentação. A sua descrição está dividida em 2 partes, essas são: elétrica e eletrônica. Ela pode funcionar com diferentes tipos sensores. A plataforma é capaz de suportá-lo e controlá-lo automaticamente. O detalhamento desses componentes está apresentado nos próximos tópicos.

3.6.1 Parte Elétrica

A parte elétrica da plataforma flutuante é constituída por duas baterias de 9V (Pilhas Alcalinas). As pilhas estão associadas em série e constituem a fonte de alimentação das partes elétrica e eletrônica da plataforma flutuante, providenciando uma tensão de alimentação de 5V ao sistema. Este modelo de bateria foi escolhido em função da facilidade com que é encontrado no mercado.

3.6.2 Parte Eletrônica

A parte eletrônica da plataforma flutuante é constituída por uma placa chamada Arduino MEGA 2560, como mostra a Figura 9. Esta placa é ideal para projetos que exigem mais portas de entradas e saída.

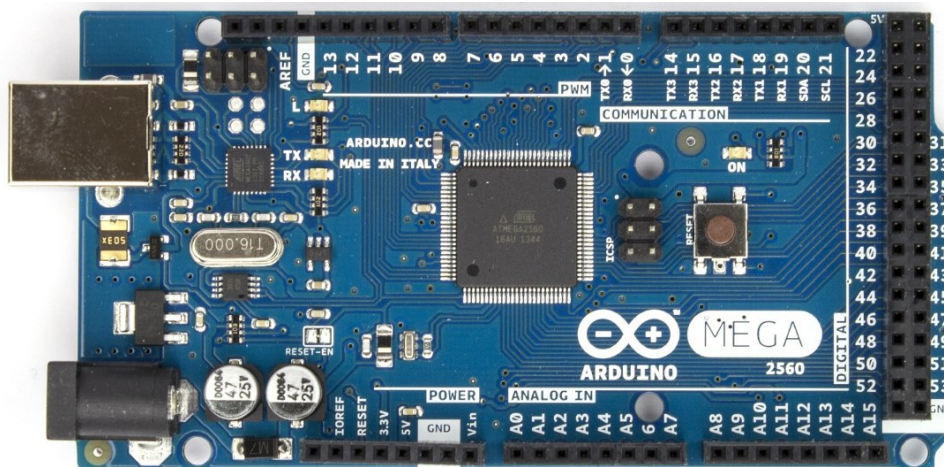


Figura 9: Arduino Mega 2560.

Fonte: <https://www.arduino.cc>

Essa placa possui mais espaço de memória para escrita, mais memória RAM e contém 54 pinos de entrada, saída digitais e 16 entradas analógicas. Para processamento, o microcontrolador pode operar com economia de energia, com periféricos mantidos em funcionamento com um consumo de energia consideravelmente baixo, além de poder se comunicar com um grande número de dispositivos externos.

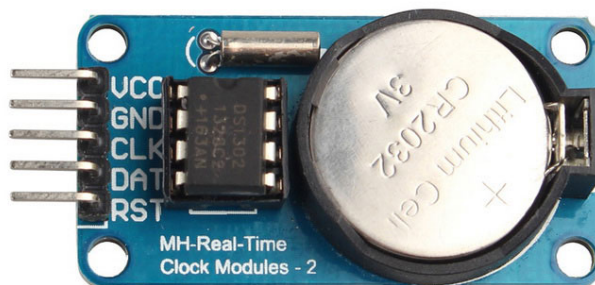


Figura 10: Real Time Clock (RTC) .

Fonte: <https://www.arduino.cc>

A placa Datalogger possui um relógio de tempo real (*Real time Clock – RTC*), conforme Figura 10, para controle e sincronização das operações e para registrar a data em que foram obtidos os dados enviados pelos sensores.

A placa possui também um conversor digital-analógico (DAC), responsável por gerar um sinal de tensão analógico, entre 0 e 2,5V e um amplificador de instrumentação. Esse amplificador é encarregado de amplificar o sinal de tensão gerado pelo DAC, para um valor que varia de 0 a 10V. Ambos os dispositivos são utilizados para controle dos sensores. Há também, na placa Datalogger, um cartão microSD, utilizado para armazenar as medições feitas,

com todos os parâmetros necessários. O microcontrolador se comunica com o RTC, pelo protocolo de comunicação mestre escravo simples e fácil de implementar. Para se comunicar com um computador e com as placas do sensor, é utilizado o protocolo de comunicação serial RS-232, por ser também simples e, além disso, universal.

Para aferir a condutividade elétrica, foi utilizado um sensor, conforme mostra a Figura 11, da capaz de aferir a condutividade elétrica em soluções aquosas, normalmente em aquicultura e sistemas de água doce.



Figura 11: Sensor de Condutividade.

Fonte: <https://www.atlas-scientific.com>

Dentro da sonda existem dois eletrodos posicionados de paralelamente. Quando a corrente elétrica contínua é aplicada nos eletrodos, os cátions se movem carregando o eletrodo negativo, enquanto os ânions carregam o eletrodo positivo. Quanto mais livre estiver o líquido entre as placas, maior será a condutividade elétrica do sistema.

Para conectar um conjunto de sensores foi utilizado uma placa multiplexadora onde é possível conectar outros sensores importantes para qualidade da água como Oxigênio Dissolvido, conforme Figura 12.

O algoritmo desenvolvido para que o software possa atender a todas as funcionalidades da placa *Datalogger*, placa multiplexadora, é consideravelmente complexo e por isso foi disponibilizado no Anexo A. O software foi desenvolvido utilizando Linguagem C e foi detalhado na seção 4.4 assim como sua montagem e principais observações. Na Figura 12 é mostrado os equipamentos conectados, essas conexões foram detalhas na seção 4.4.

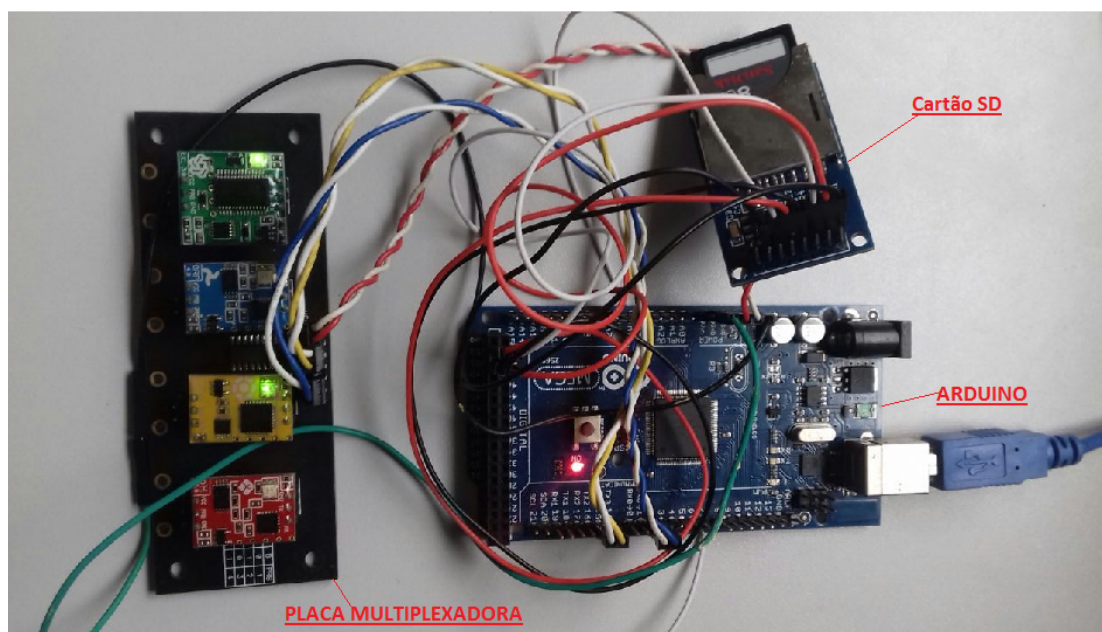


Figura 12: Protótipo

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 12 sensores (CE, OD , T e PH) são acoplados a uma placa multiplexadora sendo assim possível aferir esses quatro parâmetros. O Oxigênio dissolvido é importante para indicar a presença de matéria orgânica no meio aquático. A temperatura altera velocidade das reações químicas e biológicas da água. O potencial hidrogênico mensura a intensidade da condição ácida ou básica do rio. O resultado de pH muito ácido pode significar a presença de despejos industriais. A condutividade elétrica é capaz de relacionar a quantidade de sólidos totais dissolvidos na água, fator importante para detecção de efluentes lançados na água.

Nesta dissertação, ficará claro que a construção de uma estação de monitoramento da qualidade da água a tempo real em rios é de grande importância para entender o comportamento do despejo de efluentes fora dos padrões especificados e através de uma análise mais detalhada dos dados coletados fazer estudos sobre cenários futuros, validar modelos teóricos para estudo do rio e fazer um plano de gestão eficaz para proteger os mananciais hídricos. Sendo assim na dissertação foi simulada a construção de um protótipo em bancada que futuramente pode ser base para uma implementação real as margens do rio.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Construção da estação de monitoramento para simulação em bancada

A montagem física do protótipo foi o primeiro resultado obtido, para o funcionamento deste. A comunicação serial tipo UART na plataforma Arduino é um recurso que possibilita a comunicações mais complexas entre dispositivos, como por exemplo: conexão de placa multiplexadora a sensores. O microcontrolador Arduino Mega possui um canal físico de comunicação serial por *hardware*, esse canal está ligado aos pinos digitais 13 (RX) e 14 (TX). Esses mesmos pinos estão ligados a placa mutiplexadora, responsável pela transmissão do sinal de sensores para o microcontrolador. O multiplexador (mux) é um dispositivo que possui diversas entradas e como resposta uma única saída sendo assim possível coletar cada informação aferida pelos sensores. Através da porta serial é feito o canal de transmissão de dados entre o microcontrolador e os sensores. A Figura 13 demonstra as ligações entre o arduino, a placa multiplexadora, os sensores, cartão de memória e bateria. Utilizou-se o software livre *fritzing* encontrado no portal eletrônico <http://fritzing.org/home/>. Na etapa de montagem do *hardware* encontrou-se algumas dificuldades que levaram tempo para ser solucionadas sendo válido evidenciá-las. A plataforma de desenvolvimento do arduino possui uma função chamada monitor. Quando utilizou-se esse recurso para ver os dados gerados pelo sensor encontrou-se dificuldade em visualizar as leituras dos sensores. A velocidade da taxa de transmissão é chamada *baud rate*. Inicialmente utilizou-se a velocidade de 9600 bits. Porém os bits não são lidos corretamente no monitor serial da IDE na plataforma arduino. Pesquisou-se outra plataforma para ler o dado no monitor serial chamado *Terminate 2.9*. Após instalação e teste de leitura nessa plataforma percebeu-se que as leituras dos sensores estavam bastante defasadas no monitor serial. Descobriu-se a taxa de transmissão pela *baud rate* era insuficiente. Passou-se utilizar uma *baud rate* 38400. Em algumas plataformas do Windows existe restrição de usar a *baud rate* 38400. Sendo assim foi necessário baixar um programa chamado *Terminate 2.9* para fazer a leitura no monitor serial. Vale ressaltar quando a velocidade da *baud rate* é

reduzida em 9600 bits os dados não são convertidos de forma correta. Dessa forma teve-se que utilizar a função *Serial.begin(38400)*.

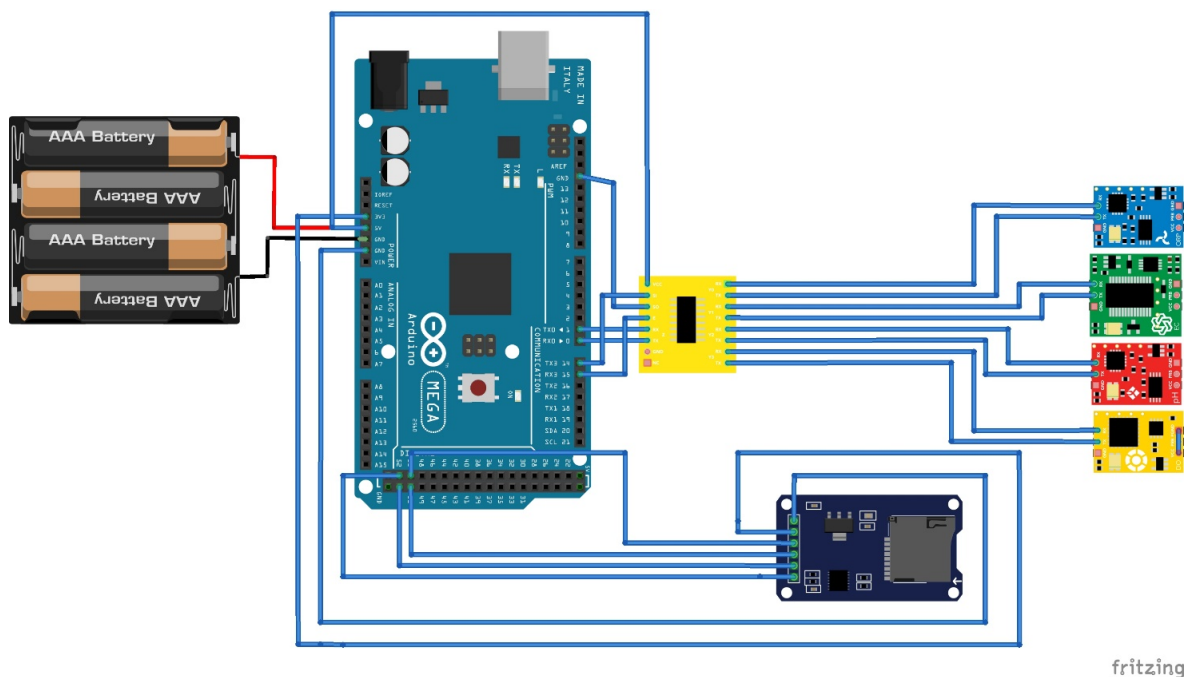


Figura 13: Ligações físicas do projeto
Fonte :Elaboração própria

Outro problema encontrado foi a conversão dos dados armazenados no *buffer* da porta serial. Para ler o dado que vem do sensor é preciso convertê-lo pois o dado é disponibilizado no padrão da tabela ASCII. Sendo assim foi necessário utilizar a função *Serial.parseFloat()*, que converte os dados disponibilizados no padrão da tabela ASCII em números do tipo ponto flutuante também conhecidos como números decimais. A função *Serial.parseFloat()*, retorna o primeiro número de ponto flutuante válido do buffer. Quando utiliza-se essa função caracteres que não são dígitos (sinal de menos) são ignorados. A função *ParseFloat()* é terminada pelo primeiro caracter que não é um número de ponto flutuante gerando resultados do tipo $x=3,6 - x1=4,5$. Para melhor compreensão do código de programação que está disposto no Anexo A, optou-se por desenvolver um fluxograma como as principais características do código fonte. Demonstrado na Figura 14. O código baseia-se na escrita dos dados lidos pelo sensor em um cartão SD.

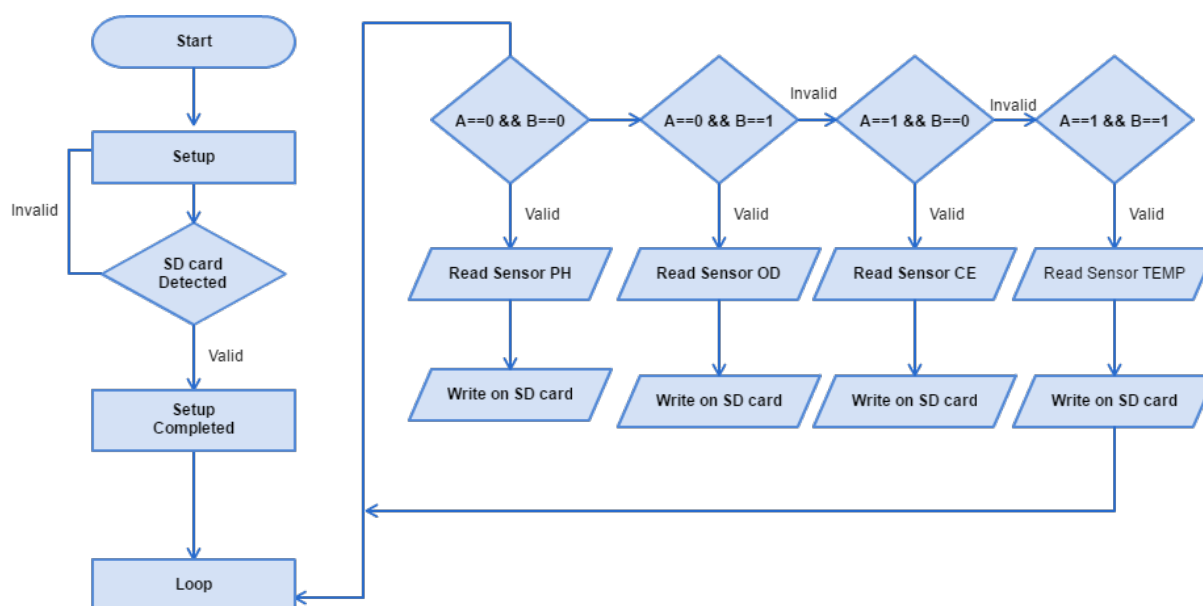


Figura 14: Fluxograma do código
Fonte: Elaboração própria

Para tal fato foi utilizado técnicas de escrita de arquivos através das ferramentas de programação. Assim os sensores quando leem um determinado parâmetro escrevem esse valor em um arquivo no formato .txt. Para cada parâmetro foi atribuído combinações lógicas. Por exemplo o sensor de PH só é acessado quando o nível lógico da variável A e B forem iguais a zero ($A = 0 \ \&\& \ B = 0$). Após escrita os dados são gravados no cartão SD. É importante ressaltar que o programa não tem sequência lógica *END* a intenção é fazer leituras contínuas durante o período de uma hora, sendo uma leitura de cada sensor por segundo.

O sensor de condutividade elétrica precisou ser calibrado antes de aferir os dados, a Figura 15 ilustra uma parte desse processo. Nessa ocasião utilizou-se os seguintes materiais: bécker de 500 ml para descarte, pissete com água destilada, papel fino secante, condutímetro Tecnal Tec- 4MP, e solução padrão de condutividade $155.5 \ \mu\text{S}/\text{cm}$.

Primeiro retirou-se a solução de condutividade elétrica da geladeira para estabilizar com a temperatura ambiente e obedeceu-se os padrões protocolados pelo equipamento. Dessa forma, escolheu-se no aparelho escala da variável desejada ($\mu\text{S}/\text{cm}$), o padrão da solução de condutividade ($155.5 \ \mu\text{S}/\text{cm}$), temperatura (25°C) e a margem de erro da calibragem (2,2%). Na segunda etapa do processo é feita a limpeza do eletrodo lavando com água destilada e secando com papel fino. Em seguida, imerge-o em solução padrão de condutividade nesse momento é feito a primeira leitura e o aparelho da Tecnal Tec oferece a opção para calibração concluindo assim a primeira calibração. A seguir retira-se o eletrodo da solução de condutividade lavando-

o novamente com água destilada e emergindo-o em solução de condutividade. Neste momento averigua-se a efetiva calibração verificando se o valor padrão foi $155.5 \mu\text{S}/\text{cm}$. Para Finalizar o procedimento e minimizar erros o ciclo completo de calibração é feito 3 vezes retirando a média dos valores obtidos, conforme Figura 15.



Figura 15: Sensor e aparelho para calibração
Fonte: Elaboração própria

Com sensor calibrado obteve-se aferições piloto. Nesse momento utilizou-se recipientes plásticos como volume total de 200 ml. As soluções testadas foram: água da torneira e água salobra (mistura de 200 ml de água com meia colher de sopa com sal de cozinha). O intuito desse teste piloto foi averiguar a variação de condutividade elétrica da água quando adicionando a solução reagente.

Os outros sensores (OD, T e pH) também foram testados no entanto, não apresentaram valores coerentes com os padrões especificados pelo fabricante. É válido ressaltar que o sensor de OD apresentou problemas na conexão física (cabo partido). Ainda tentou-se trocar o cabeamento mas os valores continuaram incoerentes chegando a conclusão que o sensor apresentava mau funcionamento.

O gráfico da Figura 16, demonstra o resultado da variação do sensor de condutividade elétrica. Percebe-se que a variação da condutividade foi mínima durante o período de aferição, utilizando somente a água como variável.

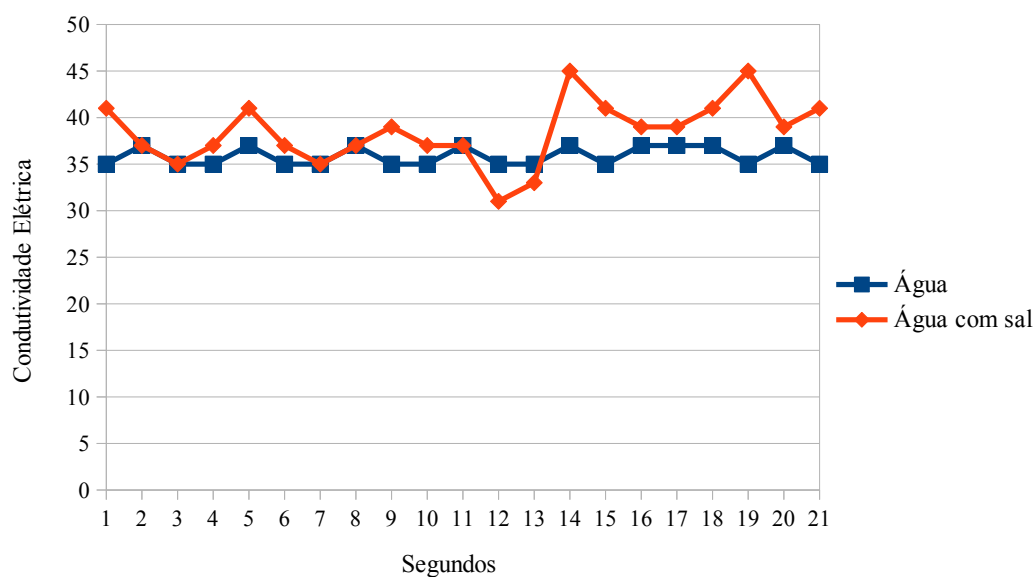


Figura 16: Teste variação do sensor

Fonte: Elaboração própria

Logo em seguida ao trocar o sensor para o recipiente com solução salobra, percebeu-se que o sensor apresentava respostas diferentes do valor inicial. Concluiu-se que a variação da condutividade não era maximizada porque utilizou-se pouca quantidade de reagente.

Convém reforçar que, neste trabalho foi feita a análise somente para o oxigênio dissolvido, como análises anteriores. Uma das fontes de dados para o OD foi obtida na PICG, pelo método laboratorial e a outra pelas estações do INEA (PS439, MR370, UR030 e PS441) conforme pode ser consultado na seção 3.2.

4.2 Modelagem Matemática

Nesta seção, são apresentados os resultados do comportamento do OD e DBO pelo modelo de Streeler-Phelps. A relação entre os parâmetros apresentados foi importante para a determinação do nível de qualidade da água, como descrito nas seções anteriores. Primeiramente será analisada a relação entre os dados experimentais e o modelo matemático, posteriormente, estudou-se os casos particulares para cada dado coletado.

4.2.1. Métodos numéricos e o modelo de Streeler-Phelps

Levando em consideração os dados da seção 3.2, pôde-se calcular a concentração de saturação de oxigênio (C_s) que aparece na Eq. 17 do modelo de Streeler-Phelps. Neste trabalho, será considerado como C_s , a relação anual do oxigênio dissolvido com a temperatura (THOMANN, 1989). Essa função foi calculada pelo método da regressão linear (BURIAN; LIMA; HETEM JUNIOR, 2007). Nesta dissertação, foi utilizado os dados de oxigênio dissolvido de duas fontes em separado: das estações da INEA PS439, MR370 e PS441 entre os anos de 2014 – 2017, Figura 8, e os dados medidos no PICG no ano de 2013, Tabela 3. Com base nesses dados experimentais obteve-se as regressões, elencadas nas Tabelas 4-6, para os dados INEA e Tabela 7 para o do PICG. O método está revisado na seção 3.3, com o cálculo do coeficiente linear e coeficiente angular da reta dado pelo sistema da Eq. 10 e o cálculo do R^2 dado pela Eq. (15).

Tabela 4: Método da Regressão Linear para a estação da INEA PS439 nos anos de 2014-2017

PS439	2014	2015	2016	2017
Regressão Linear	$8,17 + 0,013 T$	$7,84 + 0,012 T$	$7,16 + 0,028 T$	$5,12 + 0,14 T$
R^2	0,999176	0,999741	0,999046	0,723453

Como pode ser visto na Figura 8, as estações, PS439 e PS441, apresentam dados em todos os meses, mas a MR370, apresentam dados faltosos. Desta forma utilizou-se no método da regressão linear no caso das estações PS439 e PS441 com 12 pontos e na MR370 somente 6 pontos.

Na equação de Streeler-Phelps o coeficiente de saturação de oxigênio dissolvido C_s está relacionado com a qualidade da água do rio. Se C_s é alto, tem um poder de recuperação alto, se é baixo o rio se recupera para um valor baixo de OD. Esse fato foi analisado, para estas estações do INEA e os dados coletados no PICG, na próxima seção com auxílio do modelo de Streeler-Phelps.

Como o oxigênio dissolvido tem haver com a respiração do rio e por conseguinte a respiração de toda vida marinha, esse coeficiente está intimamente ligado a mortandade de peixes. Essas curvas podem ser relevantes para a gestão das águas do rio e desta forma tem um impacto direto na concessão de outorga.

O erro associado à regressão está relacionado com a confiabilidade de descrição dos dados experimentais por esse método. Os valores de R^2 pode ser entre 0 e 1.

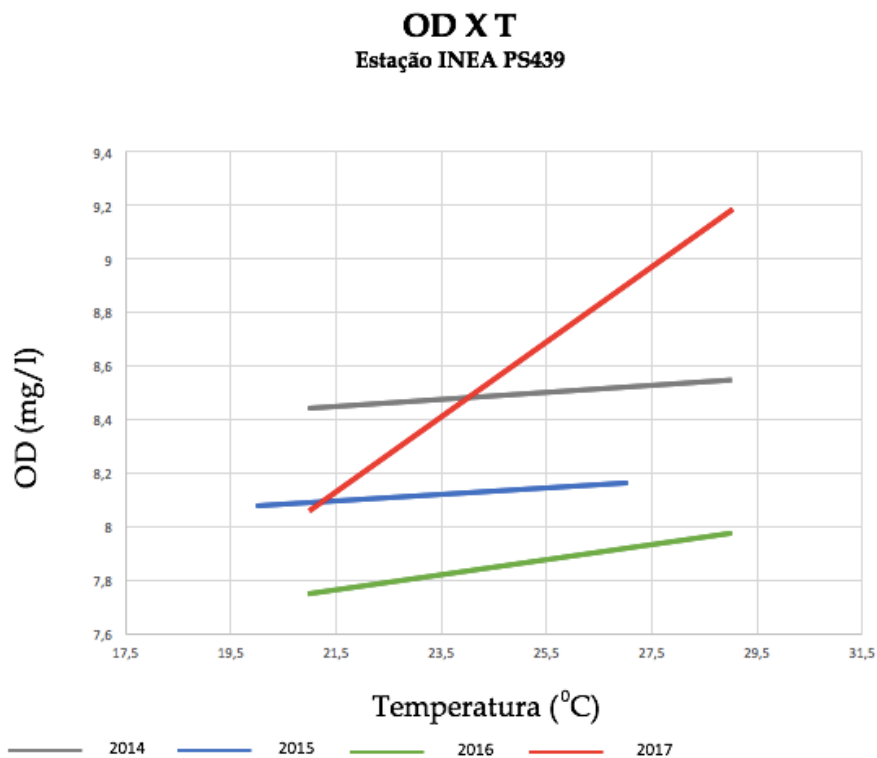


Figura 17: Gráfico do OD X T para a estação PS439 durante os anos de 2014 -2017.

O gráfico da Figura 17, representa os dados experimentais da estação PS439. Na Tabela 4, pôde-se verificar que o nível de confiança para os anos de 2014-2016, são de quase 100%. Este fato indica que a curva representa a qualidade da água anual do rio, no caso do ano de 2017, essa confiabilidade diminui passando a ser de 72 %, que ainda é um dado aceitável.

Como pode ser visto no gráfico da Figura 17, para o caso da estação PS439, que todas as curvas são crescentes, isso indicar um aumento significativo da qualidade da água para tempos mais quentes nessas regiões. O interessante desta curva é que a concessão de outorga, deve respeitar também esse comportamento, para que não ultrapasse os limites do rio.

Apesar de termos um nível de confiança mais baixo para o ano de 2017, vemos que houve uma melhoria na qualidade da água relacionando para este ano. Essa estação reflete os despejos de poluentes vindo do estado de São Paulo, mostrando um grau de melhora para este indicador.

Apesar dos poucos dados coletados para a estação MR370, pôde-se aplicar o método para esta estação. Isto foi feito considerando 6 pontos no ano de 2014, com um grau de confiabilidade de 97% na aplicação do método.

Tabela 5: Método da Regressão Linear para a estação da INEA MR370 no ano de 2014.

MR370	2014
Regressão Linear	$9,75 - 0,079 T$
R^2	0,97

OD X T Estação INEA MR370/2014

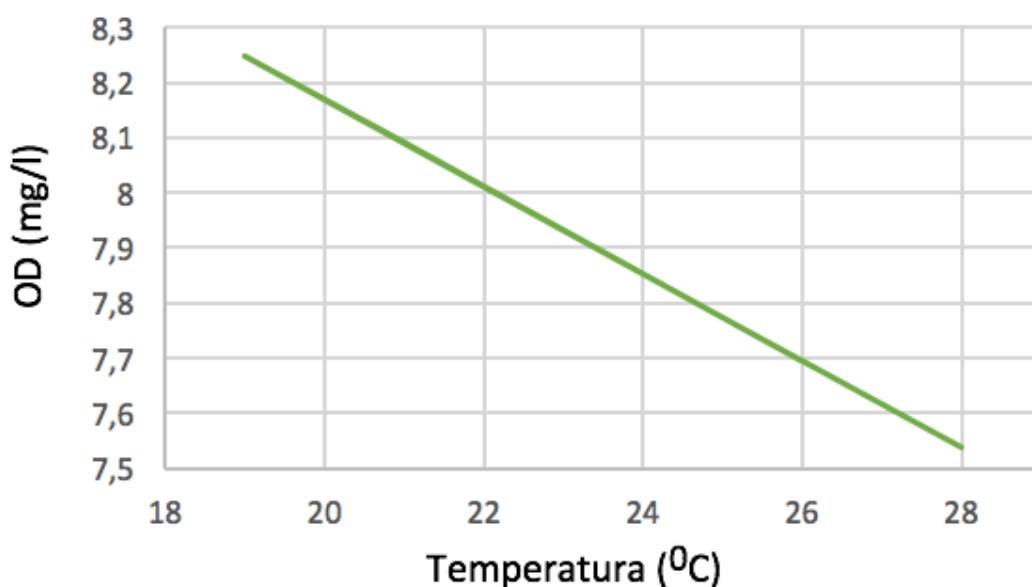


Figura 18: Gráfico OD x T para a estação MR370 em 2014.

Analisando o gráfico da Figura 18, pode ser verificado, que a reta é decrescente, nos dando um coeficiente de saturação decrescente com a temperatura. Isso indica, que mais poluentes são lançados. A temperatura, está intimamente relacionada com a depuração do poluente lançado, se a curva de OD está diminuindo com a temperatura, indica que mais oxigênio está sendo usado na depuração então mais poluentes existem para serem depurados. Esse rio vem do estado de Minas Gerais, que apresenta vários focos de poluição, como, indústria de papel, que já causou acidentes no passado (ALMEIDA, 2015).

Na Tabela 6 pode ser verificado o método da regressão linear para a estação PS441. Os graus de confiabilidade do método para os meses de 2015 a 2017 são excelentes, apresentando uma confiabilidade de 71 % para o ano de 2014, que pode ser considerada boa. Outros fatores podem interferir no desvio alto dos valores da reta para o ano de 2014, um fator importante é o

nível de pluviosidade, pois este interfere nos índices de vazão do rio. Na próxima seção esse nível de pluviosidade foi levado em consideração para a validação dos parâmetros do modelo.

Tabela 6: Método da Regressão Linear para a estação da INEA PS441 nos anos de 2014-2017.

PS441	OD/2014	OD/2015	OD/2016	OD/2017
Regressão Linear	$11,37 - 0,15 T$	$14,87 - 0,30 T$	$11,74 - 0,17 T$	$7,07 + 0,05 T$
R^2	0,71	1,00	0,95	0,97

No gráfico da Figura 19 pode-se visualizar o comportamento do Rio Paraíba do Sul, estação PS441, em função da temperatura para diversos anos.

Se compararmos a posição das estações na figura 4, pode-se verificar que a estação PS441, recebe águas diretamente de duas fontes, uma é a PS439 a outra é a MR370.

Com base na Figura 19, para o ano de 2014, houve um decréscimo do nível de OD com a temperatura. Fazendo um rastreamento das águas pode ser visto que a PS439 apresenta um aumento do nível de OD com a temperatura e a MR370 um decréscimo nos dando duas possibilidades: a primeira delas que o rio Murié é poluidor e outra que aconteceu alguma coisa entre essas estações. Isso por que existe a estação UR030 que recebe as águas da PS439 e MR370. A estação UR030, está localizada no rio Ururaí, que deságua na lagoa Feia, escoando por esta bifurcação os poluentes do rio Murié. Os dados da estação UR030, são insuficientes para a análise como mostra os gráficos da Figura 8.

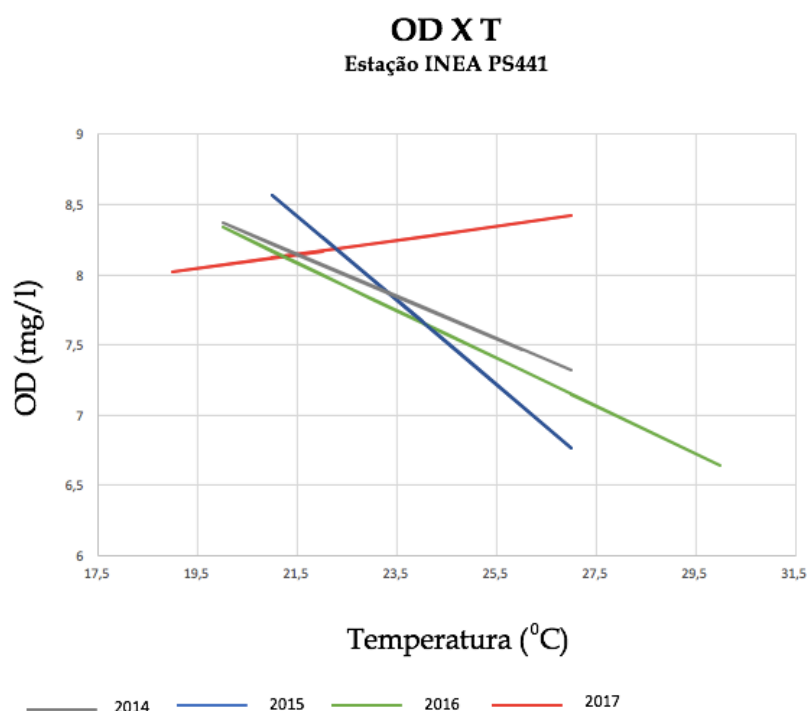


Figura 19: Gráfico do OD X T para a estação PS441 durante os anos de 2014 -2017.

Em geral, pode-se verificar que as águas do rio Paraíba do Sul que passam pela estação PS441 são bem mais poluídas do que a PS439, revelando a importância de termos mais estações nessa região.

Esses padrões, devem ser perpetuados na foz, onde fica o PICG que pode ser acrescido de uma carga de poluentes vindos da própria região.

Esse fato, revela um motivo para a construção de uma estação de monitoramento nas proximidades do PICG. Na Tabela 7, pode-se verificar os dados da qualidade da água feito pela coleta no PICG em 2013.

Tabela 7: Método da regressão linear para a estação do PICG no ano de 2013.

PICG	2013
Regressão Linear	$12,48 - 0,22 T$
R^2	0,97

Verificou-se um alto índice de confiabilidade em analisar os dados com o método da regressão linear. Na Figura 20, pode-se ver a barra de erro do método no gráfico. Pode ser

verificado que para temperaturas maiores o erro passa ser maior, apesar disso a confiabilidade do dado é alta, pois nenhum ponto ficou fora do ajuste.

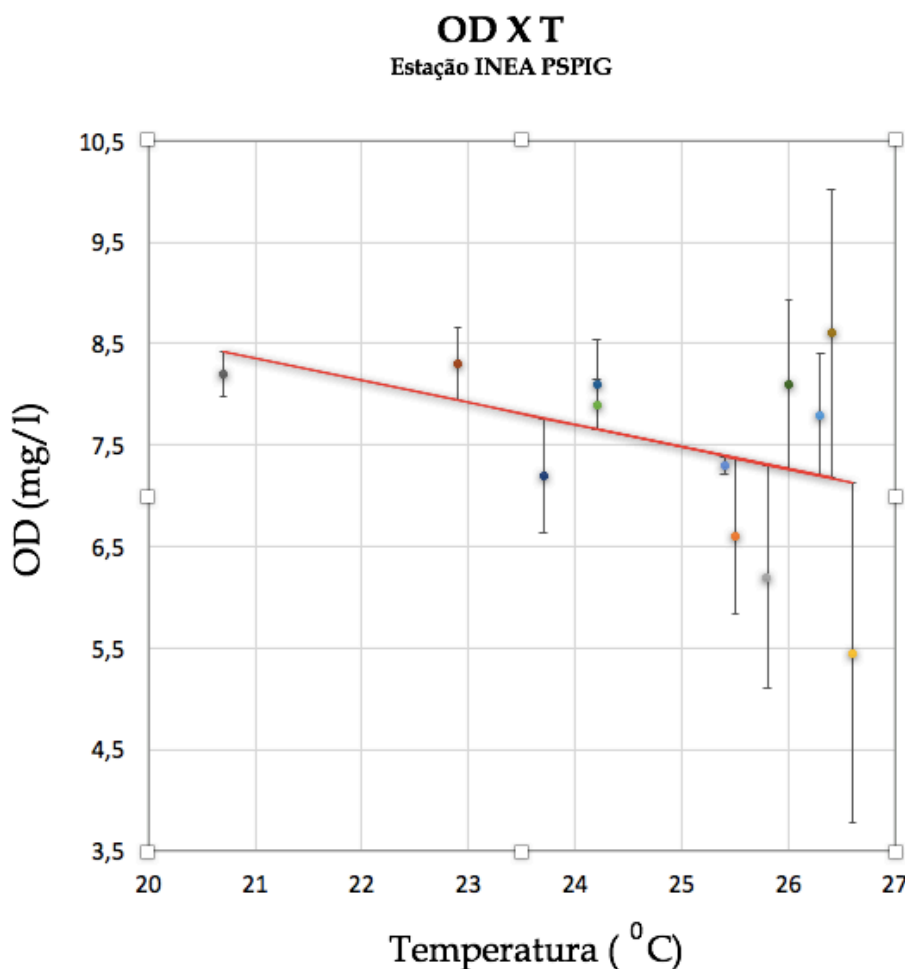


Figura 20: Cálculo do OD x T para o PICG.

O gráfico da Figura 19 apresenta um comportamento decrescente, tendo um oxigênio dissolvido mínimo de 5,45 com uma temperatura de 26,5 no mês de março. O valor máximo obtido foi de 8,60 com uma temperatura de 26,60 no mês de setembro. As vazões tem seu mínimo no mês de setembro e seu máximo no mês de dezembro.

4.2.2. Estudo de Caso: Modelo de Streeter-Phelps

Nesta seção, foram feitos estudos de caso para entender o comportamento do OD x DBO pelo modelo de Streeter-Phelps. Em analogia com algumas das metodologias revisadas no referencial teórico, vamos aliar a análise numérica da seção anterior com o modelo de Streeter-Phelps para entender o comportamento do OD x DBO anual do rio. Considerou-se aqui que o coeficiente de saturação do rio pode ser considerado com representado pelos pontos do gráfico

da Figura 19. Cujas funções da temperatura foram determinadas pelo método da regressão linear dado pela equação da Tabela 6.

O coeficiente de reeração, k_r , pode quantificar o processo de transferência de oxigênio da atmosfera para a massa líquida. Este foi calculado utilizando dados experimentais de acordo com a Eq.(19),

$$k_r = \frac{av^b}{h^c} \quad (19)$$

onde a, b e c foram avaliados por diversos pesquisadores, dados pela Tabela 8. Esse parâmetro foi importante para calibrar o modelo. Esse coeficiente está relacionado com o OD crítico. Na Figura 22, pode-se observar que o coeficiente k_r influencia na curva de oxigênio dissolvido. Verifica-se que o ponto de mínimo da curva de OD aumenta de acordo com o aumento do k_r , para os mesmos k_d e DBO em $t=0$, independentemente dos outros parâmetros.

Tabela 8: Comparação dos coeficientes a, b, c.

Pesquisadores	A	b	c
Churchill, Elmore, Buckingham	2,18	0,97	1,67
Owens, Edwards, Gibbs	2,31	0,67	1,85
Langbein, Dorum	2,23	1,00	1,33
Isaacs, Gaudi	2,07	1,00	1,50
Negulescu, Rojanski	4,74	0,85	0,85
Padden, Gloyna	1,96	0,70	1,05
Bansal	0,79	0,60	1,40

Fonte: (VON SPERLING, 2007)

Na Figura 21, pode se observar a variação do k_r em função da vazão utilizando dados da Tabela 3,

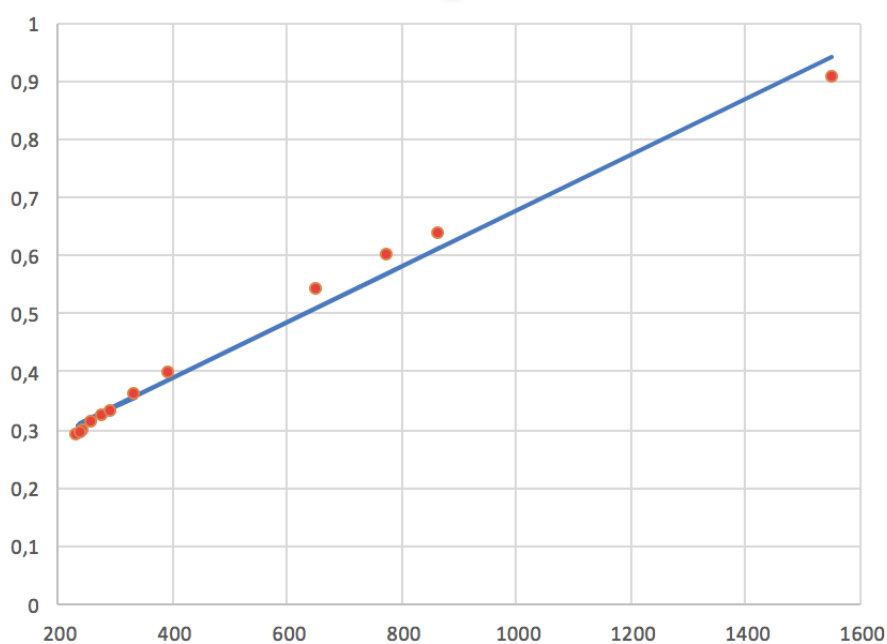


Figura 21: O coeficiente de reação k_r em função da vazão.

A reta sólida foi calculada usando o método da regressão linear dada por:

$$k_r = 0,20 + 4,81 \times 10^{-4} V \quad (20)$$

Na figura 22, pode-se observar que o coeficiente k_r influencia na curva de oxigênio dissolvido. Verifica-se que o ponto de mínimo da curva de OD aumenta de acordo com o aumento do k_r , para os mesmos k_d e DBO em $t=0$, independente dos outros parâmetros.

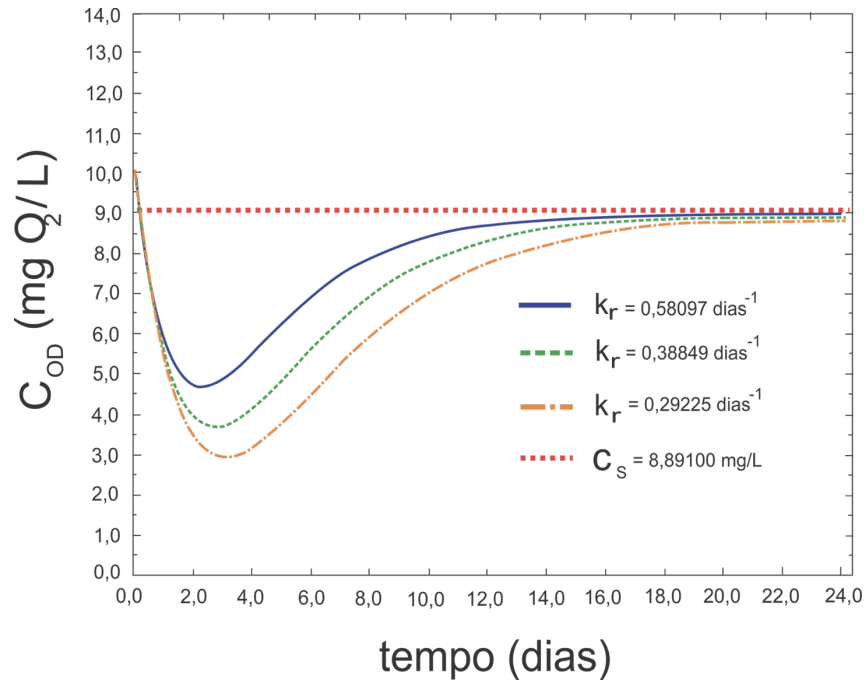


Figura 22: Curva do OD para diferentes k_r .

Neste gráfico a concentração de OD t , e mg/L, $k_{r1} = 0$; 29 dias $k_{r2} = 0$; 39 dias e $k_{r3} = 0$; 58 dias com $C_S = 9,59$ mg/L, $C_{DBO_0} = 15,0$ mg/L, $k_d = 0$; 40 dias e $C_{DBO_0;20} = 2$ mg/L em $t_d = 5$ dias. O outro coeficiente do modelo e k_d , importante para estudar a concentração de DBO. A relação do k_d com: a concentração inicial de DBO, C_{DBO_0} , o DBO de depuração, C_{DBO_0} e o tempo de depuração t_d e:

$$k_d = \ln\left(\frac{C_{DBO_0}}{C_{DBO_d}}\right)t_d^{-1} \quad (21)$$

onde C_{DBO_0} é dado pela Eq. 18. Usando a Eq. 20 com os dados da vazão da Tabela 3 obtém-se os pontos vermelhos do gráfico mostrado na Figura 22. A relação entre eles é dada pela Eq.21.

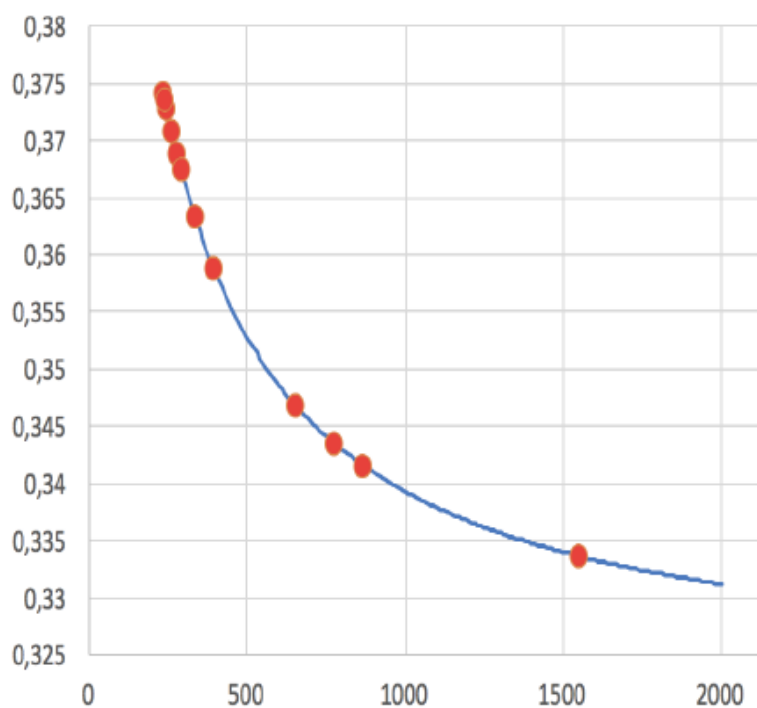


Figura 23: Concentração de k_d em função do volume.

A curva sólida representa k_d , em função do modelo teórico. Com esse cálculo pode-se obter o gráfico da Figura 23 que nos fornece a evolução do DBO com o tempo, para diferentes concentrações de efluente como mostra. Pode-se verificar que apesar de diferentes concentrações de efluente, em 5 dias tem-se o mesmo valor de DBO que chama-se de $C_{DBO5;20}$, ou seja e , é o DBO em 5 dias para uma temperatura de 20°C. Essa curva foi plotada para $C_{DBO0} = 16; 67$, $C_{DBO0} = 13; 33$ e $C_{DBO0} = 11; 67$ mostrando que o modelo está calibrado, conforme Figura 24.

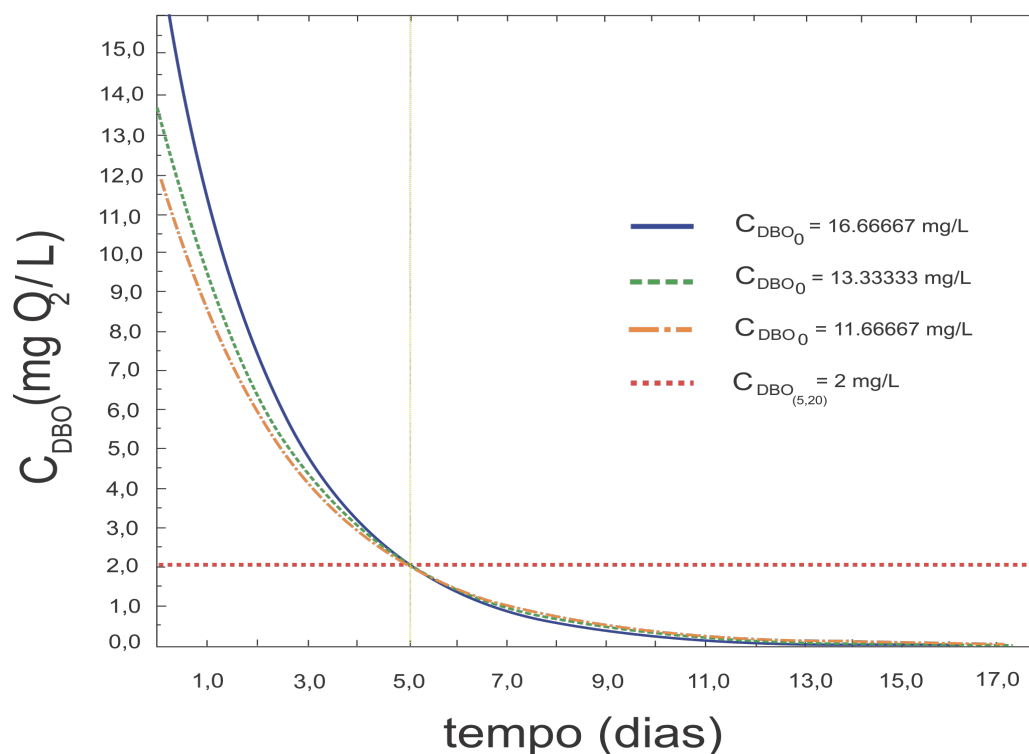


Figura 24: Concentração de DBO x t.

No gráfico da Figura 24, pode-se verificar que a concentração de saturação do OD foi de 9,59 mg/L. Considerando que foi lançado um montante de esgoto com DBO de 13,33 mg/L, com o passar do tempo, esse valor vai se invertendo e a DBO remanescente vai diminuindo até desaparecer por completo, à medida que a matéria orgânica decompõe-se. A curva em vermelho pontilhada e decrescente é a concentração de DBO, em mg/L. A curva sólida laranja é a concentração de OD, em mg/L para $CS = 9,59 \text{ mg/L}$, $k_r = 0$; 58 dias, $k_{d1} = 0$; 38 dias, e $C_{\text{DBO}_{5;20}} = 2 \text{ mg/L}$ em 5 dias. Na figura 25, pode-se ver claramente a dinâmica entre o DBO e OD.

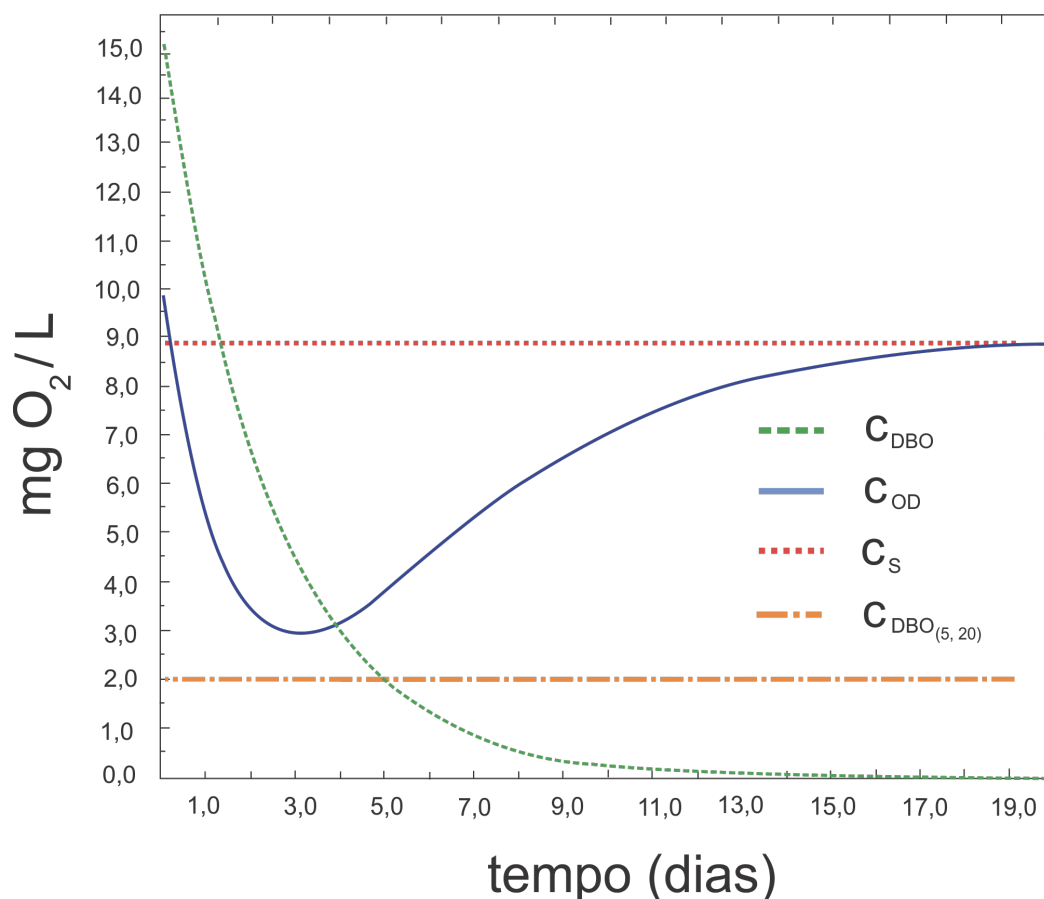


Figura 25: Concentração de DBO e OD x t.

Para uma concentração inicial, $C_{OD0} = 10,00$ mg/L, foi visto que com o passar do tempo o oxigênio vai sendo consumido para estabilizar a matéria orgânica que foi lançada no rio. Percebe-se, pelo gráfico, que enquanto a DBO vai sendo reduzida o OD também até chegar a um valor crítico, e depois o OD começa a crescer. Este fato, representa a recuperação do rio, até um valor que corresponde a concentração de saturação.

4.4 Análise da concessão de Outorgas de Lançamentos de Efluentes no Rio Paraíba do Sul Através do Estudo das Concentrações da Demanda Bioquímica de Oxigênio e Oxigênio Dissolvido

O objetivo desta seção foi o desenvolvimento de uma metodologia para a gestão de recursos hídricos, com base no estudo da concentração de oxigênio dissolvido (OD) e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), para estudar a concessão de outorgas no Rio Paraíba do Sul, mais especificamente na região que passa no município de Campos dos Goytacazes. A concessão de outorga para uso dos corpos hídricos é um dos instrumentos tratado no Plano Nacional de Recursos Hídricos que propõe bases jurídicas para o disciplinamento dos usos

desses recursos. Neste trabalho, propõe-se o uso da modelagem matemática como ferramenta para analisar o comportamento desses dois parâmetros de qualidade da água, com o objetivo de estudar vários casos visando entender a dinâmica envolvendo a concentração bioquímica de oxigênio dissolvido, no rio. Sabemos que os efluentes despejados no rio, vindos do setor produtivo, ou do uso familiar, causam grandes impactos no meio aquático. Os resultados mostram que para alcançar as condições ideais, para rios de classe 3, em regiões perto de sua Foz, como é o caso da Região de Campos dos Goytacazes, há necessidade de um tratamento prévio ao lançamento, de modo que impactos drásticos possam ser evitados.

Os parâmetros dos modelos foram simulados a fim de se obter resultados diversos, para que se fosse possível a análise da possibilidade da concessão da outorga dentro de diversos cenários, dentro dos limites de concentração da resolução nº 357/2005 do CONAMA, conforme é mostrado na Tabela 9.

Tabela 9: Limites da concentração para alguns parâmetros da qualidade da água segundo a resolução CONAMA nº 357/2005.

Classes	Especial	1	2	3	4
Cliformes fecais (NMP/100ml)	Ausentes	<200	<1000	<4000	-
Cliformes totais (NMP/100ml)	Ausentes	<1000	<5000	<20000	-
PH	-	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
OD	-	>6	>5	>4	>2
DBO	Ausentes	<3	<5	<10	-
Sólidos totais dissolvidos	Ausentes	500	500	500	-

Fonte: (ANA, 2016)

O enquadramento das águas doces, assim como água salgada, é classificado em classes de uso preponderantes, Tabela 9, sendo devidamente caracterizadas conforme a mesma resolução acima mencionada, a Resolução CONAMA nº 357/2005. Entretanto, é de interesse deste trabalho os valores mínimos dos enquadramentos da água doce.

Usos preponderantes		Classes de águas doces				
		E	1	2	3	4
Abastecimento doméstico	com desinfecção					
	após tratamento simplificado					
	após tratamento convencional					
	após tratamento convencional ou avançado					
Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas						
Proteção às comunidades aquáticas						
Harmonia paisagística						
Recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho)						
Recreação de contato secundário						
Irrigação	hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvem rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película					
	de hortaliças e plantas frutíferas					
	de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras					
Aqüicultura e pesca						
Dessedentação de animais						
Navegação						

Figura 26: Classes de águas doces e seus usos preponderantes.

Fonte: (ANA, 2016)

Logo, os resultados obtidos pelos modelos foram comparados a esta legislação, está representado nas Tabela 9 e Figura 26.

Foi realizada a análise da resistência do rio, definindo-se um parâmetro de controle, e representado por ϕ . Nestas condições, quando ϕ torna-se negativo, o sistema falha e não há possibilidade da concessão de outorga. Deve ficar claro que este parâmetro está, sempre, relacionado com a concentração de oxigênio disponível no rio. Sua formulação é a seguinte:

$$\phi = \frac{C_t - C_{perm}}{C_{perm}} \quad (22)$$

onde, representa a resistência do rio (adimensional), C_{perm} , representa a concentração permitida ou substância em análise pela legislação pertinente, C_t , representa a concentração de Oxigênio Dissolvido em um determinado tempo (mg/L)

Na Tabela 3, pode-se observar os parâmetros de Oxigênio Dissolvido (OD), temperatura e vazão medidos no polo IFF/PICG vide seção 3.2. A partir destes dados experimentais foi possível, com a criação da plataforma de simulação e modelagem, estudar o comportamento do OD com o modelo de Streeter-Phelps. Outros métodos matemáticos foram incorporados à plataforma para obter as funções que representam as relações entre os dados experimentais necessários para validar o modelo.

Os dados experimentais para a DBO são difíceis de se aferir com precisão adequada. Com o modelo de Streeter-Phelps foi possível analisar o comportamento da DBO através do OD.

O coeficiente de reaeração, k_r , pode quantificar o processo de transferência de oxigênio da atmosfera para a massa líquida. Este foi calculado utilizando dados experimentais de acordo com a Eq.(19), onde v é a velocidade do rio e h é a profundidade média do rio, a , b e c são parâmetros determinados por diversos pesquisadores, dados pela Tabela 7.

Esse coeficiente está relacionado com o OD crítico. Utilizou-se os resultados da vazão medida pelo experimento, Tabela 3, a altura média é dada por $h = 4,45$ m e a largura média é dada por $8,5$ m. Os parâmetros a , b , e c escolhidos para este trabalho foram dados por Bansal, Tabela 7. Com essas especificações foi possível calcular a relação de k_r em função da vazão como pode ser visto na Tabela 10.

Este coeficiente está intimamente ligado a concentração de efluentes que pode ser despejada no rio, pois depende de $C_{DBO(0)}$ inicial, considerando a concentração de efluente depurado $C_{DBO(d)} = 2$ mg/L em $t = 5$ dias. Desta forma, com o Modelo de Streeter-Phelps foi possível fazer uma boa análise do montante de poluente que pode ser lançado sem violar os limites da lei CONAMA.

Tabela 10 – Relação dos parâmetros do modelo de Streeter-Phelps para o Rio Paraíba do Sul com a concentração de Demanda Bioquímica de Oxigênio inicial. Para a concentração do efluente $C_{ef} = 6$ mg/L e vazão do efluente $V_{ef} = 80$ m³.

Parâmetro/Mês	k_r (t ⁻¹)	k_d (t ⁻¹)	$C_{DBO(0)}$ (mg/L)	ϕ
Fevereiro	0,63908075	0,34160214	6,18307416	0,002737448
Março	0,59892735	0,34349286	5,50136587	0,009336929
Abril	0,53986282	0,34682022	7,60360065	0,025829782
Mai	0,39782517	0,35884516	7,57844299	0,042430485
Junho	0,32293832	0,36889740	6,93139340	0,038752180
Julho	0,36158033	0,36328032	7,85651964	0,056447432

Agosto	0,31141522	0,37077958	7,83711522	0,071822956
Setembro	0,29182271	0,37422693	7,93821190	0,083367402
Outubro	0,29938017	0,37285878	7,58228043	0,068280193
Novembro	0,29546934	0,37356058	7,57368421	0,069492703

Nessas condições, utilizou-se nesse trabalho a Tabela 11, que apresenta os limites permitidos pela lei 357/2005 CONAMA.

Tabela 11: Classes de usos preponderantes de água doce e sua concentração permitida de OD e DBO, respectivamente.

Classe	OD Mínimo (mg/L)	DBO Máxima (mg/L)
Especial	Não são permitidos lançamentos, mesmo tratados	Não são permitidos lançamentos, mesmo tratados
1	6,0	3,0
2	5,0	5,0
3	4,0	10,0
4	2,0	-

No caso da Tabela 10, com vazão $V_{ef} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ e $C_{ef} = 6 \text{ mg/L}$ conforme Tabela 3, percebe-se que não se pode manter a mesma quantidade de poluente lançada, pois quando o nível da concentração de OD é baixo não há possibilidade de se obedecer o limite mínimo de oxigênio dissolvido em rios de água doce, classe 3, segundo a legislação 357/2005 CONAMA, dando um ϕ negativo, sendo necessário, portanto, o tratamento prévio do efluente.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível averiguar que a análise dos parâmetros de qualidade da água é importante para o controle e gestão dos recursos hídricos, além desse fato, também foi possível entender como a modelagem matemática pode ser uma ferramenta valiosa para o entendimento do comportamento do rio, funcionando como uma forma de avaliar e fornecer parâmetros para a sua gestão. Desta forma, antes de se construir uma estação de monitoramento da qualidade da água é necessário analisar os dados existentes para entender o comportamento do rio e a forma de intervenção. Por este motivo utilizamos os dados já coletados da região de estudo e os dados das estações vizinhas INEA.

O rio Paraíba do Sul, com sua abrangência, apresenta diversas regiões com um alto índice de poluição como visto na seção 3.1. Além desse fato, os órgãos ambientais não disponibilizam estações de monitoramento suficientes para um controle de qualidade em sua grande extensão.

Por outro lado, observou-se que as estações já existentes possuem diversos problemas entre eles pode-se citar: dados poucos confiáveis, falta de manutenção de operação, pouca precisão e falta de periodicidade das coletas. Foi possível fazer um estudo a partir dos dados das estações PS441, PS439 e MR370 e verificar que muitas delas além de apresentar poucos dados de medição tais, dados não apresentam periodicidade sendo difícil de se obter uma análise do comportamento do rio nessas regiões. Uma estação muito importante da qual não conseguimos dados o suficiente foi a MR370, que se localiza no rio Muriaé, pois esta impacta diretamente a região de estudo. Desta forma, um projeto futuro seria aplicar a tecnologia analisada neste trabalho para a região da estação MR370. A tecnologia proposta, que foi a de implantação de uma estação de monitoramento, pode auxiliar de diversas formas, entre elas: minimizar os custos vindos da necessidade de profissionais para realizar as coletas de dados, minimizaria o problema da periodicidade na coleta de dados, aumentaria a precisão.

Verificou-se também que a utilização de métodos numéricos para a análise dos dados reais é importante para entender o comportamento do rio. Na plataforma do INEA, o foco foi disponibilizar os dados de indicadores da qualidade da água, mas verificou-se, com esse

trabalho, que isso não é o suficiente, é necessário entender a característica do rio e para isso temos que simular modelar e estudar os vetores poluentes.

Uma forma de analisar o impacto de um determinado parâmetro da qualidade da água é através de modelos matemáticos. Um modelo matemático se confrontado com os dados reais pode ser uma ferramenta poderosa para avaliação da qualidade da água e até mesmo projeções futuras. Um modelo usado para o estudo e gestão em rios é o modelo de Street-Phelps.

O modelo de Street-Phelps leva em consideração os dados de oxigênio dissolvido e a partir desses dados é possível aferir a demanda bioquímica de oxigênio dissolvido, na Figura 25, fica explícita que a relação desses parâmetros são inversamente proporcionais. Outro ponto é que o parâmetro DBO é de difícil aferição.

No protótipo de simulação em bancada foi utilizado os sensores de CE, PH, OD e T. Analisando os sensores disponíveis no PICG ao implementar, verificou-se que apenas o sensor CE apresentava valores compatíveis com os padrões especificados pelo fabricante. Por esse motivo na seção 4.1 foi utilizado o parâmetro de condutividade elétrica, para demonstrar sua calibração e implementação. Esse fato mostra que é necessário analisar periodicamente a funcionalidade dos sensores que serão utilizados no processo de construção de uma plataforma real. Além deste fato existe uma necessidade de investir na confecção nacional de sensores para se criar tecnologia nacional na área.

Outra observação importante é a necessidade de investir não só na confecção de sensores mas também em placas de aquisição de dados com mais portas para aferições para controle de qualidade. Pois no protótipo de bancada foi possível apenas aferir quatro parâmetros sendo necessário nove parâmetros para uma análise mais completa da qualidade da água, conforme seção 2.3.

Completo-se com sucesso a modelagem matemática através do Streeter-Phelps, podendo analisar diversas características do rio assim como cálculo para outorgas na seção 4.4.

É notório que os modelos matemáticos acoplados com tecnologias de implementação (Sensores e protótipos) são um grande ferramenta para o monitoramento ambiental. Deve-se investir mais nessa área pois a quantidade de dados ainda é insipiente para um controle mais rigoroso da qualidade da água.

REFERÊNCIAS

AGEVAP, Associação Pró-Gestão das águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. (2012), Sistema Hidráulico da Bacia do Rio Paraíba do Sul, Resende, RJ. Disponível em: <<http://www.agevap.org.br/noticias.php?id=1>>. Acesso em: 05 mai. 2017.

ALMEIDA, B.,) Em Cataguases, barragem rompida foi desativada após acidente em 2003. (2005), Disponível em <http://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2015/11/em-cataguases-barragem-rompida-foi-desativada-apos-acidente-em-2003.html>. Acesso 06/11/2017

ANA,(2015). Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Agência Nacional de águas Acesso em: 07 jun. 2017.

ASHBOLT, N. J. Microbial contamination of drinking water and disease outcomes in developing regions. **Toxicology**, Toxicology in the New Century, Opportunities and Challenges - Proceedings of the 5th Congress of Toxicology in Developing Countries. v. 198, n. 1–3, p. 229–238, 20 maio 2004.

BARDAJI, R. et al. Estimating the Underwater Diffuse Attenuation Coefficient with a Low-Cost Instrument: The KdUINO DIY Buoy. **Sensors**, v. 16, n. 3, p. 373, 15 mar. 2016.

BENETTI, A.; BIDONE. F. O meio ambiente e os recursos hídricos. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. p. 849-876.

BITELLA, G. et al. A Novel Low-Cost Open-Hardware Platform for Monitoring Soil Water Content and Multiple Soil-Air-Vegetation Parameters. **Sensors**, v. 14, n. 10, p. 19639–19659, 21 out. 2014.

BOTELHO, R. G. **Avaliação da qualidade da água do rio Piracicaba (SP) e efeito da vinhaça para os organismos aquáticos antes e após a correção do pH**. Universidade de São Paulo, 13 set. 2013.

BAYONA, C. A. B, FERREIRA, C. N. & OTOYA, V. J. V., **A Conical deficit in the AdS(4)/CFT(3) correspondence**, Class.Quant.Grav. 28, 015011 (2011);

BRASIL - CONAMA N°357, Ministério do Meio Ambiente, RESOLUÇÃO de 17 de Março de 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>.

BRASIL, **Política Nacional de Recursos Hídricos**, 1997. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em 14 de maio de 2017.

BRASIL, **Política Estaduais de Meio Ambiente, de Recursos Hídricos e Florestais**, Lei Estadual n° **5.101/2007**, 2007. Disponível em <

<http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/CONTLEI.NSF/e9589b9aabd9cac8032564fe0065abb4/674aaff783d4df6b8325736e005c4dab?OpenDocument>>. Acesso em 14 de maio de 2017.

BURIAN, R.; LIMA, A. C.; HETEM Junior, A. (2007), Cálculo Numérico . Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2007.

CLÁUDIO, D. M., MARINS, J. M., Cálculo Numérico Computacional: Teoria e Prática, ed. Atlas, São Paulo, 1989.

CLOETE, N. A.; MALEKIAN, R.; NAIR, L. Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring. *IEEE Access*, v. 4, p. 3975–3990, 2016.

COX, B. A. **A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers.** *Science of The Total Environment*.v.314-316, n.1, p.335-377, out. 2003.

CUTRIM, A. L. F. Avaliação da qualidade ambiental do Rio Uberabinha (MG) utilizando parâmetros físico-químicos e comunidades de macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores. 18 fev. 2013.

DHI, Danish Hydraulic Institute. A modeling system for rivers and channels. Horsholm Danish Hydraulic Institute, 2005. Pg.454.

DOMAGALSKI, J. Results of a prototype surface water network design for pesticides developed for the San Joaquin River Basin, California. *Journal of Hydrology*, v. 192, n. 1–4, p. 33–50, maio 1997.

FERREIRA, C. N., HELAYEL-NETO & NEY, W. G., Global-string and vortex superfluids in a supersymmetric scenario, *Phys.Rev. D77*, 105028 (2008);

FERREIRA, C.N. HELAYEL-NETO, LIMA, C. E. C., Discussing Cosmic String Configurations in a Supersymmetric Scenario without Lorentz Invariance, *New J.Phys.* 12, 053029, (2010);

FERREIRA, C. N., GODINHO, F. L. C., HELAYEL-NETO, J. A., A landau-lifshitz-gilbert-type equation and torsion effects on the dynamics of magnetization, *Annalen Phys.* 529 no.4, 1600186, (2017);

FRANCISCO, Wagner de Cerqueira e. "Eco-92"; *Brasil Escola*. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/geografia/eco-92.htm>>. Acesso em 13 de maio de 2017.

HADJIGHASEM, A., FARAZMAND, M., BLAZEVSKI, D., FROYLAND, G. & HALLER, G., **A Critical Comparison of Lagrangian Methods for Coherent Structure Detection.** *Chaos* 27, 053104 (2017).

HALLER, G., HADJIGHASEM, A., FARAZMAND, M. & HUHN, F., Defining coherent vortices objectively from the vorticity. *J. Fluid Mech.* 795 (2016) 136-173

HANGAN, A. et al. **A Prototype for the Remote Monitoring of Water Parameters.** *IEEE*, maio 2013Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6569331>>. Acesso em: 16 ago. 2016

HAVNO, K.; Madsen, M.N; DORGE, J. Mike 11 a generalized river modeling package In: SINGH, V.P (Ed.). Computer models of watershed hydrology. Colorado: Water Resources Publications, 1995. cap. 21, p.7733-782.

HONGPIN, L. et al. Real-time remote monitoring system for aquaculture water quality. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 6, p. 136–143, 31 dez. 2015.

HOOPER, R.P., Aulenbach, B.T., Kelly, V.J., 2001. The National Stream Quality Accounting Network: a flux-based approach to monitoring the water quality of large rivers. *Hydrol. Process.* 15, 1089e1106. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.205>.

HUANG, Y; LIU, L. **Multiobjective Multiobjective Water Quality Model Calibration Using a Hybrid Genetic Algorithm and Neural Network–Based Approach**. *Journal of environmental engineering*. v.136, n.10, p. 1020-1031, out. 2010

IBGE, (2016). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em:<<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=330100>>. Acesso em: 29 ago. 2016.

JO, B.; BALOCH, Z. Internet of Things-Based Arduino Intelligent Monitoring and Cluster Analysis of Seasonal Variation in Physicochemical Parameters of Jungnangcheon, an Urban Stream. **Water**, v. 9, n. 3, p. 220, 16 mar. 2017.

JOBSON, H. E. D. Users manual for an open-channel streamflow model based on the diffusion analogy. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4133, pg.73 (1989).

MANNINA, G. & VIVIANI, G. Water quality modelling for ephemeral rivers: Model development and parameter assessment. *Journal of Hydrology* (2010), 393, p. 186-196.

MASSERONI, D. et al. Irrig-OH: An Open-Hardware Device for Soil Water Potential Monitoring and Irrigation Management: Open-Hardware Device for Soil Water Potential Monitoring. **Irrigation and Drainage**, v. 65, n. 5, p. 750–761, dez. 2016.

MERTEN, Gustavo H., MINELLA, Jean P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. Porto Alegre, 2002. *Agroecol. e Desenvol. Rur. Sustent. Porto Alegre*, v.3, n.4, out/dez 2002.

MYERS, D.N., 2015. Foundations of water quality monitoring and assessment in the United States. In: Ahuja, Satinder (Ed.), *Food, Energy and Water – the Chemistry Connection*. Elsevier, Amsterdam, pg. 21 – 79.

National Research Council, 2004. Confronting the Nation's Water Problems: The Role of Research. Committee on Assessment of Water Resources Research. **National Academies Press**, Washington, D.C., p. 324. <http://dx.doi.org/10.17226/11031>

OPPA, L. F. Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do Rio Vacaí Mirim Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PALMIERI, V.; de CARVALHO, R. J. Qual2e model for the Corumbataí River. *Ecological Modelling* v. 198, n. 12, p. 269 -275, set. 2006.

PEIXEIRO, R.; POSTOLACHE, O.; DIAS PEREIRA, J. M. **Virtual instrument for water quality parameters measurement**. IEEE, out. 2012 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6463829>>. Acesso em: 28 ago. 2016

PORTAL BRASIL, Saiba mais sobre água, consumo consciente e recursos hídricos no Brasil, Ciência e Tecnologia, Portal Brasil, 2010. Disponível em < <http://www.brasil.gov.br/ciencia-e-tecnologia/2010/10/agua-e-consumo-consciente>>. Acesso em 14 de maio de 2017.

PULE, M.; YAHYA, A.; CHUMA, J. **A wireless sensor network solution for monitoring water quality in Botswana**. IEEE, set. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7725635/>>. Acesso em: 13 maio. 2017.

RITTER, C. et al. **Remote delay tolerant water quality monitoring**. IEEE, out. 2014 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6970323/>>. Acesso em: 13 maio. 2017.

ROWE, G.L., Belitz, K., Demas, C.R., Essaid, H.I., Gilliom, R.J., Hamilton, P.A., Hoos, A.B., Lee, C.J., Munn, M.D., Wolock, D.W., 2013. Design of Cycle 3 of the National Water-quality Assessment Program, 2013.

U.S. Geological Survey Open-file Report 2013, p. 110. <http://pubs.usgs.gov/of/2013/1160/>.

SEFFRIN, G. F. F. Simulação atual e previsão futura da qualidade das águas do rio Ibicuí utilizando o modelo QUAL2E Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

STREETER, H. W.; PHELPS, E. B., A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. *Public Health Bulletin* (1925) , 3, pg.146.

SILVA, L. M. **Indicadores ambientais e a gestão de bacias hidrográficas de economia agrícola: diagnóstico e reflexões sobre o caso da bacia do rio Preto, noroeste de Minas Gerais**. 249 p. UFMG/IGC, Doutorado, Análise Ambiental, 2012. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/MPBB-8YSLYT>. Acesso em: 13 maio. 2017

SIMIC, M. et al. **Multi-sensor system for remote environmental (air and water) quality monitoring.** IEEE, nov. 2016 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7818711/>>. Acesso em: 13 maio. 2017.

SOHAG, K.; BEGUM, R. A.; ABDULLAH, S. M. S. **Dynamic impact of household consumption on its CO₂ emissions in Malaysia.** *Environment, Development and Sustainability*, v. 17, n. 5, p. 1031–1043, out. 2015.

TEXEIRA, C. A Gerenciamento integrado de qualidade e quantidade de água. São Paulo, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

TOGORO, E. S. **Qualidade da água e integridade biótica: Estudo de caso num trecho fluminense do rio Paraíba do Sul** Universidade do Rio de Janeiro, jan. 2006.

TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento dos recursos Hídricos no Brasil. Global Water Partnership. South América. Asociacion Mundial del Agua. SAMTAC Comite Tecnico Asesor Sud America. 2006. Disponível em: <<http://www.eclac.cl/DRNI/proyectos/samtac/InBr00404.pdf>>. Acesso em 10 abr. 2017.

UNESCO, **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2017: Águas Residuais. O recurso inexplorado**, Resumo Executivo, ed. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization e World Water Assessment Programme, 2017.

VIEIRA, L, F, M. *Mobile Ad hoc Networks: Current Status and Future Trends.*, 2011

VIEIRA, L. F. M. “Underwater sea swarm,” Ph.D. dissertation, Los Angeles, CA, USA, 2009.

VIEIRA, L. F. M; LEE.U; GERLA.M. “Phero-trail: a bio-inspired location service for mobile underwater sensor networks,” in Proceedings of the third ACM international workshop on Underwater Networks, ser. WuWNeT ’08. New York, NY, USA: ACM, 2008, pp. 43–50

VIJAYAKUMAR, N.; RAMYA, R. **The real time monitoring of water quality in IoT environment.** IEEE, mar. 2015 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7193080>>. Acesso em: 28 ago. 2016.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.* 2ª Ed, Belo Horizonte, 1996.

VON SPERLING, M. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios.* Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007.

ZHANG, B. et al. SD–GIS-based temporal–spatial simulation of water quality in sudden water pollution accidents. **Computers & Geosciences**, v. 37, n. 7, p. 874–882, jul. 2011.

ZHANG, Y.; ZHANG, F.; HONG, Z. H. Real-Time Wireless Water Quality Monitoring System Based on MODBUS Protocol. *Applied Mechanics and Materials*, v. 336–338, p. 1703–1707, jul. 2013.

APÊNDICE A

Código em linguagem C - Software

```
#include <SD.h>
File myFile;
int Pin_x = 2;           //Arduino pino 2 para controlar pino x
int Pin_y = 3;           //Arduino pino 3 para controlar pino y

float x;

void setup()
{
  Serial3.begin(38400);   //define a baud rate em 38400
  Serial.begin(38400);    //define a baud rate em 38400
  pinMode(Pin_x, OUTPUT); //define o pino x de saída
  pinMode(Pin_y, OUTPUT); //define o pino y de saída
}

void read_sensor(int a, int b) //passa a variável por função
{
  digitalWrite(Pin_y, b);
  SD.begin(53);
  myFile = SD.open("test.csv", FILE_WRITE); // cria um arquivo txt. para
escrita
  x=Serial3.parseFloat();

  if (a==LOW && b ==LOW) // Leitura do sensor, se nível lógico dor 0 & 0
  x=Serial3.parseFloat();

  {
    myFile.print("Sensor de Condutividade eletrica,");
    myFile.println(x); // Escreve valor do sensor, no arquivo.txt
    Serial.print("Sensor de Condutividade eletrica: ");
    Serial.println(x);
  }
  if (a==LOW && b ==HIGH)
  {
    myFile.print("Sensor de ORP,");
```

```
        myFile.println(x);
        Serial.print("Sensor de ORP: ");
        Serial.println(x);
    }
    if (a==HIGH && b ==LOW)
    {
        myFile.print("Sensor de OD,");
        myFile.println(x);
        Serial.print("Sensor de OD: ");
        Serial.println(x);
    }

    if (a==HIGH && b ==HIGH)
    {
        myFile.print("Sensor de PH,");
        myFile.println(x);
        Serial.print("Sensor de PH: ");
        Serial.println(x);
    }
    myFile.close();
}

void loop(){

    read_sensor(LOW, LOW);

    delay(200);

    read_sensor(LOW, HIGH);

    delay(200);

    read_sensor(HIGH, LOW);

    delay(200);

    read_sensor(HIGH, HIGH);

    /delay(200);
}
```