



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA APLICADA

VICTOR MATHEUS FALCÃO FONSECA

SISTEMA PARA AERAÇÃO NA AQUICULTURA 4.0
BASEADO EM IOT COM ÊNFASE EM EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA

RECIFE – PE

2023

VICTOR MATHEUS FALCÃO FONSECA

**SISTEMA PARA AERAÇÃO NA AQUICULTURA 4.0
BASEADO EM IOT COM ÊNFASE EM EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada - Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre.

ORIENTADOR: Danilo Ricardo Barbosa Araújo

CO-ORIENTADOR: Obionor de Oliveira Nóbrega

CO-ORIENTADOR: Luis Otavio Brito da Silva

RECIFE – PE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F676s

Fonseca, Victor

SISTEMA PARA AERAÇÃO NA AQUICULTURA 4.0 BASEADO EM IOT COM ÊNFASE EM EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA / Victor Fonseca. - 2023.

84 f. : il.

Orientador: Danilo Ricardo Barbosa Araujo.

Coorientador: Obionor de Oliveira Nobrega.

Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada, Recife, 2023.

1. Eficiência energética. 2. Aquicultura 4.0. 3. Internet das Coisas. I. Araujo, Danilo Ricardo Barbosa, orient. II. Nobrega, Obionor de Oliveira, coorient. III. Título

CDD 004

VICTOR MATHEUS FALCÃO FONSECA

SISTEMA PARA AERAÇÃO NA AQUICULTURA 4.0 BASEADO EM IOT COM ÊNFASE EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Dissertação submetida à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em Informática
Aplicada - Universidade Federal Rural de
Pernambuco, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do grau de Mestre.

Aprovada em: xx de xx de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Danilo Ricardo Barbosa Araújo (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Departamento de Computação - DC

Fernando Antonio Aires Lins
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Departamento de Computação - DC

Obionor de Oliveira Nobrega
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Departamento de Computação - DC

Luis Otavio Brito da Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Departamento de Pesca e Aquicultura - DEPAQ

Marco Antônio de Oliveira Domingues
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

Gostaria de dedicar este projeto de pesquisa com profunda gratidão aos meus pais, Ronaldo (*in memoriam*) e Patrícia. Eles sempre colocaram sua dedicação em me educar como prioridade máxima, e por isso, serei eternamente grato.

Agradecimentos

Primeiramente, expresso minha gratidão a Deus por ter me guiado ao longo deste projeto, por me conceder a perseverança ao longo de toda a minha vida e por me abençoar com saúde e energia para concluir mais este projeto.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha família pelo apoio inestimável que recebi ao longo da minha jornada acadêmica, com destaque para meus pais, Ronaldo Fonseca Filho e Patrícia Chagas Falcão Fonseca. Eles sempre me encorajaram e acreditaram na minha capacidade de superar os desafios que a vida me apresentou.

Deixo um agradecimento especial ao Professor Danilo Ricardo Barbosa de Araújo, meu orientador durante este programa de mestrado em informática aplicada. Sua confiança na minha proposta de projeto, sua generosidade ao dedicar seu valioso tempo e sua contribuição inestimável à minha jornada acadêmica por meio de sua vasta experiência e sabedoria merecem meu reconhecimento sincero.

Estendo meus sinceros agradecimentos ao Professor Obionor de Oliveira Nóbrega, meu co-orientador neste projeto, pela dedicação de seu tempo e compartilhamento de seu conhecimento. Por toda a sua paciência, por suas orientações e contribuições valiosas que enriqueceram significativamente este trabalho, contribuindo ao máximo com sua vasta experiência.

Agradeço ao professor Luis Otávio Brito da Silva, pela dedicação em contribuir com esta pesquisa no que se refere ao contexto da Engenharia de Pesca e Aquicultura. Estendo meus agradecimentos ao professor Dijaci Araújo Ferreira, coordenador da Base continental de Pesca da UFRPE, por todos os conselhos e orientações quanto ao experimento realizado na base de pesca.

Por fim, desejo expressar meu profundo agradecimento à Universidade Federal Rural de Pernambuco e a todo o seu corpo docente. Ao longo do tempo, estes têm se destacado por seu comprometimento contínuo com a promoção da qualidade e da excelência no ensino superior público, o que tem contribuído significativamente para a formação e o desenvolvimento de inúmeras pessoas.

"Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino"

(Leonardo Da Vinci)

Resumo

A Aquicultura 4.0 é caracterizada pelo uso de tecnologias digitais integradas e conectadas por meio de software e sistemas inteligentes (por exemplo, Internet das Coisas) para aprimorar os processos de produção e apoiar a tomada de decisão dos produtores. No contexto da aquicultura, o uso de aeradores é importante para garantir os níveis de oxigênio dissolvido na água, aumentar o rendimento dos peixes e reduzir a mortalidade. No entanto, a falta de controle no uso de aeradores sem a devida detecção de oxigênio dissolvido pelos produtores resulta em altos custos de energia na produção. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema energeticamente eficiente para o gerenciamento de aeradores, utilizando a tecnologia da Internet das Coisas, aplicada a viveiros de fazendas de aquicultura. O sistema proposto inclui sensores de oxigênio dissolvido e temperatura, controlados por um microcontrolador que recebe informações em tempo real e regula a potência do motor do aerador, mantendo um limite predefinido de oxigênio dissolvido. Todas as informações são monitoradas remotamente por meio de um painel de controle. O sistema foi avaliado em um cenário real de aquicultura e alcançou um índice de eficiência energética de até 58% em relação ao pior cenário de avaliação, bem como uma redução de até 64% no uso do aerador mantendo a qualidade da água.

Palavras-chave: Eficiência energética; Aquicultura 4.0; Internet das Coisas.

Abstract

Aquaculture 4.0 is characterized by the use of integrated and interconnected digital technologies through software and intelligent systems (e.g., Internet of Things) to enhance production processes and support producers' decision-making. In the context of aquaculture, the use of aerators is crucial to ensure dissolved oxygen levels in the water, increase fish yield, and reduce mortality. However, the lack of control in aerator usage without proper dissolved oxygen detection by producers results in high energy costs in production. This work aims to develop an energy-efficient system for aerator management using Internet of Things technology applied to aquaculture farm ponds. The proposed system includes dissolved oxygen and temperature sensors controlled by a microcontroller that receives real-time information and regulates the aerator motor's power while maintaining a predefined dissolved oxygen threshold. All information is remotely monitored through a control panel. The system was evaluated in a real aquaculture setting and achieved an energy efficiency index of up to 58% compared to the worst-case scenario evaluation, as well as a reduction of up to 64% in aerator usage while maintaining water quality.

Keywords: Energy efficiency; Aquaculture 4.0; Internet of Things.

Lista de Figuras

Figura 1 – Distribuição de trabalhos por base na primeira fase de pesquisa.	21
Figura 2 – Quantitativo de publicações por anos na primeira fase da pesquisa.	22
Figura 3 – Distribuição de trabalhos por base após filtros.	22
Figura 4 – Quantitativo de publicações por anos após filtros.	23
Figura 5 – Modelo de sistema proposto em três camadas.	31
Figura 6 – Modelo de Hardware na Arquitetura em camadas.	33
Figura 7 – Modelo de sistemas elétricos na Arquitetura em camadas.	34
Figura 8 – Modelo de Software <i>IoT</i> na Arquitetura em camadas.	35
Figura 9 – Etapas metodológicas.	37
Figura 10 – Sistema IoT para sensoriamento de qualidade da água.	40
Figura 11 – Sistema IoT para sensoriamento da qualidade da água.	42
Figura 12 – Aerador chafariz de 1,5hp.	44
Figura 13 – Dashboard da plataforma IoT.	46
Figura 14 – Diagrama de instruções controlador <i>IoT</i>	47
Figura 15 – Aplicativo móvel para monitoramento do sistema.	48
Figura 16 – Imagem de satélite base de pesca da UFRPE.	50
Figura 17 – Tanque de cultivo de piscicultura A2.	51
Figura 18 – Tanque de cultivo A2 com sondas e aerador.	53
Figura 19 – Cronograma das etapas de experimentação.	57
Figura 20 – Gráfico de consumo elétrico na etapa 1.	58
Figura 21 – Gráfico de comportamento do OD na etapa 1.	59
Figura 22 – Gráfico de consumo elétrico na etapa 2.	60
Figura 23 – Gráfico de comportamento do OD na etapa 2.	61
Figura 24 – Gráfico de consumo elétrico na etapa 3.	62
Figura 25 – Gráfico de comportamento do OD na etapa 3.	63
Figura 26 – Gráfico de consumo elétrico na etapa 4.	65
Figura 27 – Gráfico de comportamento do OD na etapa 4.	65
Figura 28 – Gráfico comparativo da utilização média do motor do aerador.	68
Figura 29 – Gráfico comparativo de consumo elétrico.	68
Figura 30 – Gráfico comparativo de custo com energia elétrica.	69

Figura 31 – Gráfico comparativo da concentração de OD média.	70
Figura 32 – Gráfico comparativo do ganho de eficiência energética.	70
Figura 33 – Gráfico da projeção de consumo elétrico no ciclo da tilápia em 1 viveiro.	71
Figura 34 – Gráfico da projeção de custo de energia no ciclo da tilápia em 1 viveiro.	72
Figura 35 – Gráfico da projeção de custo de energia no ciclo da tilápia em 10 viveiros.	73

Lista de Quadros

Quadro 1 - Artigos de referência para busca	20
Quadro 2 - Critérios de técnicas de avaliação	55
Quadro 3 - Resultados da etapa 1	58
Quadro 4 - Resultados da etapa 2	60
Quadro 5 - Resultados da etapa 3	62
Quadro 6 - Resultados da etapa 4	64
Quadro 7 - Comparativo das 4 etapas	66

Lista de tabelas

Tabela 1 - Artigos levantados por base	23
Tabela 2 - Tabela comparativa de aspectos	24

Lista de Siglas

3G	Terceira geração de redes celulares móveis
4G	Quarta geração de redes celulares móveis
AC	<i>Alternating current</i>
ACM	<i>Association for Computing Machinery</i>
DDP	Diferença de potencial
DPS	Dispositivo protetor contra surtos
EPROM	<i>Erasable programmable read-only memory</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IOT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
kW	<i>Kilowatts</i>
kWh	<i>Kilowatts-hour</i>
mA	Milliampere
NBR	Norma Técnica brasileira
OD	Oxigênio Dissolvido
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial Hidrogeniônico
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAS	<i>Recirculating aquaculture system</i>
SAE	<i>Standard Aeration Efficiency</i>
SOTR	<i>Standard Oxygen Transfer Rate</i>

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Objetivos e contribuições	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	Estrutura da dissertação	18
2	Revisão da Literatura	19
2.1	Revisão Sistemática da Literatura	19
2.2	Resultados e Discussão	23
2.2.1	Sistemas de IoT	25
2.2.2	Sistemas elétricos	26
2.2.3	Sistemas de Aeração	27
2.3	Considerações Finais da Revisão	28
3	Proposta	30
3.1	Proposta de modelo	30
3.1.1	Modelo de Arquitetura de hardware <i>IoT</i>	32
3.1.2	Modelo de Arquitetura de sistemas elétricos	33
3.1.3	Modelo de Arquitetura de software <i>IoT</i>	35
4	Metodologia	36
4.1	Visão geral	36
4.2	Implementação do sistema proposto	38
4.2.1	Camada de sistemas de Hardware <i>IoT</i>	38
4.2.2	Camada de sistemas elétricos	42
4.2.3	Camada de software <i>IoT</i>	45
4.3	Cenário de avaliação	49
5	Resultados e Discussão	54
5.1	Técnicas de avaliação	54
5.2	Métricas de avaliação	55
5.3	Avaliação dos resultados	56
5.3.1	Etapa 1: Operação manual do aerador por 12h diárias	57
5.3.2	Etapa 2: Operação manual do aerador por 18h diárias	59

5.3.3	Etapa 3: Operação manual do aerador por 24h diárias	61
5.3.4	Etapa 4: Operação autônoma do aerador pelo sistema <i>IoT</i> de eficiência energética	64
5.3.5	Análise comparativa	66
5.3.6	Projeção de ciclo da tilápia de 112 dias	71
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	74
6.1	Contribuições	74
6.2	Publicações geradas	75
6.3	Trabalhos futuros	77
	Referências	78

1 Introdução

A desigualdade persiste no acesso global à energia elétrica, afetando principalmente os países mais pobres. Segundo o relatório anual das Nações Unidas (ONU), em 2019, cerca de 759 milhões de pessoas não tinham acesso à eletricidade, com a maioria delas concentrada na África ([Organização das Nações Unidas, 2021](#)). Em 2021, o Brasil enfrentou a pior crise hídrica desde 1931, causada pela grave escassez de chuvas, afetando diretamente a geração de energia, que é predominantemente baseada em usinas hidroelétricas. Além disso, os níveis dos reservatórios estiveram consistentemente abaixo da média histórica nos últimos sete anos (ONS, 2021). A combinação da crise hídrica com o aumento da demanda de energia elétrica resultou em consequências negativas, como um impacto ambiental significativo e a exaustão dos recursos necessários para a produção de energia. Isso também teve implicações econômicas, afetando não apenas empresas e indústrias, mas também a população, que enfrentou aumentos sucessivos nas tarifas de energia elétrica ([Ministério de Minas e Energias, 2021](#)). Isso destaca a urgente necessidade de adotar medidas para melhorar a eficiência energética e, por conseguinte, reduzir o consumo de energia.

Dentro desse contexto, observa-se que o alto custo de energia elétrica afeta vários setores. A Aquicultura, que envolve a criação de organismos aquáticos como peixes e crustáceos, é um desses setores. Caracteriza-se como uma atividade multidisciplinar que requer intervenção no processo de criação para aumentar a produção. ([OLIVEIRA, 2015](#)). Desde o ano 4.000 A.C a atividade de aquicultura já era realizada por Egípcios e Chineses ([SANSUY, 2020](#)). Contudo, no contexto atual a quarta revolução da agricultura, também conhecida como agricultura 4.0, trouxe o conceito de aplicação de tecnologias para integração de softwares e sistemas, além de automação de equipamentos para otimizar a cadeia de produção agrícola ([NUTER, 2021](#)).

Diante deste novo paradigma, surge a Aquicultura 4.0, uma abordagem que busca aumentar a produtividade e expandir os mercados por meio da aplicação da tecnologia e inovação ([NUTER, 2021](#)). Essa evolução também se apoia no uso acessível da Internet das Coisas (*IoT*) como um facilitador de tecnologia. É importante destacar que essa transformação traz mudanças significativas para os produtores, incluindo o aumento do bem-estar animal, aprimoramento da segurança alimentar, rastreabilidade do pescado em todas as etapas da cadeia de produção e suporte para tomada de decisões baseadas na

análise de dados em tempo real (SANSUY, 2020). A aquicultura 4.0 já é uma realidade em nível global, mas é evidente que, no contexto brasileiro, ainda existe uma escassez de estudos e tecnologias voltados para esse setor.

Nesse cenário, a integração de grupos de objetos ou dispositivos conectados à Internet dá origem ao conceito de Internet das Coisas (*IoT - Internet of Things*), no qual pequenos sensores são incorporados aos objetos, criando um ecossistema de computação ubíqua que permite o processamento de informações entre eles de maneira interconectada (MAGRANI, 2018). Esse é um conceito que ganhou destaque nos últimos anos e que hoje pode ser observado na aplicação da Internet das Coisas em dispositivos comuns, como relógios inteligentes (*Smart Watches*), caixas de som inteligentes com assistentes virtuais embutidos (*Smart Speakers*), geladeiras inteligentes, carros autônomos, entre outros (SANTOS et al., 2019).

Dentro do setor do agronegócio, há uma série de outras aplicações potenciais para o conceito da Internet das Coisas, como destacado por (SANTOS et al., 2019). Pode-se empregar sensores de umidade para o controle da irrigação ou câmeras de vídeo IP para o monitoramento em tempo real de ervas daninhas, animais invasores ou a detecção de doenças nas plantações. Ao aplicar o conceito de *IoT* na aquicultura, é possível criar sistemas inteligentes que oferecem uma série de vantagens aos produtores, como o monitoramento simplificado de características da água, incluindo parâmetros como pH e temperatura (KOTHA; GUPTA, 2018). Isso destaca a relevância do conceito de Internet das Coisas na indústria da aquicultura, onde os aquicultores podem acessar instantaneamente informações cruciais sobre a qualidade da água e automatizar o controle da alimentação e da recirculação de oxigênio na água. Essas melhorias permitem um planejamento mais eficaz do crescimento dos peixes, além de reduzir o desperdício e os custos de produção, resultando em um aumento da receita e da competitividade no mercado.

Considerando a vital importância dos fatores relacionados à água para os produtores, é relevante mencionar técnicas que contribuam para a otimização desses aspectos. Entre essas técnicas, destaca-se o conceito de aeração, que envolve o processo de absorção de oxigênio do ar atmosférico e sua circulação na água em forma de bolhas (ROY et al., 2021). Esse processo desempenha um papel crucial no aumento da concentração de oxigênio dissolvido na água e na remoção simultânea de gases dissolvidos, como CO₂, H₂S e

produtos químicos orgânicos voláteis (ROY et al., 2021). A aeração pode ocorrer de forma natural, como quando uma cachoeira deságua em um rio, ou de maneira artificial, através de sistemas que utilizam motores a combustão ou elétricos conectados a eixos, rodas de pás ou bombas verticais. A aeração artificial é a técnica mais amplamente adotada em fazendas de cultivo intensivo (JAYANTHI et al., 2021).

No entanto, é importante ressaltar que o dimensionamento excessivo dos sistemas de aeração instalados nos tanques de cultivo, bem como o uso prolongado de aeração quando não necessário, pode resultar em um elevado consumo de energia, acarretando em custos significativos de eletricidade (BOYD; MCNEVIN, 2021), por exemplo, uma fazenda de aquicultura que possui dois aeradores em cada um de seus tanques de cultivo. Se tais aeradores forem projetados para serem mais potentes do que o necessário para incorporação de oxigênio na água ou forem usados continuamente, mesmo quando a aeração não é crucial, isso pode levar a um consumo excessivo de energia. Para reduzir estes custos, torna-se importante adotar o conceito de eficiência energética, que envolve a relação entre a energia elétrica consumida pelos equipamentos e a energia gerada por eles (RAMLI; HAMID, 2017). Em outras palavras, a eficiência energética visa reduzir o consumo de recursos energéticos enquanto mantém ou melhora o desempenho dos equipamentos.

Estudos iniciais indicam que, dentro do contexto da aquicultura brasileira, a tecnologia mais próxima de automação para aeradores envolve o uso de dispositivos de temporização para regular o tempo de operação dos aeradores. Essa abordagem tem o potencial de reduzir o consumo de energia elétrica, sem comprometer a qualidade da água e a saúde dos peixes (FOLTZ, 2022). No entanto, é importante destacar a necessidade de uma abordagem mais precisa e adaptativa. Isso implica não apenas ligar os aeradores em horários específicos, mas também ajustar sua potência com base nos valores dos parâmetros de oxigênio dissolvido. Dessa forma, os aeradores seriam controlados de maneira apropriada para atender às necessidades de densidade de peixes em cada tanque em tempo real. A principal hipótese deste trabalho é que esse aprimoramento tem o potencial de ampliar a eficiência produtiva e diminuir os gastos na indústria da piscicultura no Brasil.

Nesse contexto, torna-se claro que é essencial adotar um sistema autônomo e inteligente para o controle contínuo da aeração dos tanques de cultivo, visando a otimização da eficiência energética. Destaca-se que a incorporação de princípios da Internet das Coisas (*IoT*) pode desempenhar um papel fundamental na abordagem dessa necessidade. Essa

escolha se baseia em sua acessibilidade em termos de custos, facilidade de integração com dispositivos elétricos, disponibilidade abundante de dispositivos e sensores no mercado global, além da existência de uma vasta comunidade de desenvolvedores especializados em sistemas *IoT*.

1.1 Objetivos e contribuições

Nesta seção, será abordada a pergunta de pesquisa, bem como o objetivo geral e os objetivos específicos do estudo.

- **Pergunta de pesquisa:** Como otimizar a aeração e reduzir os custos de energia, na produção de Peixes e Camarões em cativeiro?

1.1.1 Objetivo Geral

A presente pesquisa tem por objetivo propor um sistema *IoT* para gerenciamento autônomo, inteligente e em tempo real, com ênfase em eficiência energética, de sistemas de aeração artificial para viveiros no contexto da Aquicultura 4.0. Otimizando a eficiência energética dos recursos de aeração sem comprometer a qualidade da água.

1.1.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de alcançar o propósito central deste estudo de pesquisa, também foram concretizados os objetivos específicos subsequentes:

- Investigar o estado da arte acerca das soluções *IoT* para gerenciamento de Aeradores;
- Propor um modelo de sistema *IoT* para gerenciamento inteligente de aeradores para Aquicultura;
- Projetar e implementar um sistema *IoT* de baixo custo para gestão de aeradores em um cenário real, com ênfase em eficiência energética;
- Implementar um aplicativo móvel e *dashboard* Web para que o usuário realize monitoramento em tempo real da solução;

- Apresentar e discutir resultados dos testes realizados no sistema desenvolvido e implementado.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação foi organizada em capítulos. No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão sistemática da literatura, referente ao contexto de sistemas *IoT* de aeração e eficiência energética. No Capítulo 3, demonstra-se a proposta desta dissertação. No Capítulo 4, serão apresentadas as etapas metodológicas para entendimento e construção do sistema proposto. No quinto capítulo serão demonstrados e discutidos os resultados acerca da avaliação realizada. Por fim, no capítulo 6 apresentam-se as considerações finais, demonstrando que os objetivos da pesquisa foram satisfeitos, bem como, lacunas a serem preenchidas em trabalhos futuros.

2 Revisão da Literatura

A Revisão Sistemática da Literatura é uma metodologia útil para identificar trabalhos sobre um tema pertinente, com aplicação de métodos sistematizados e explícitos de busca, além de verificar a sua validade e qualidade, bem como sua aplicabilidade no contexto (TORRE-UGARTE et al., 2011). Em contraposição, a Revisão Sistemática difere-se da Revisão Empírica, pois esta representa mais do que um levantamento de estudos passados, caracteriza-se como uma investigação científica, um método de pesquisa. Neste tipo de revisão caracteriza-se a necessidade de se realizar uma busca exaustiva até esgotar as fontes de informações, testar hipóteses, analisar criticamente a metodologia da busca (MATTOS, 2015), bem como, consolidar os resultados obtidos para se alcançar uma conclusão e responder a pergunta de pesquisa. Nesse contexto, ressalta-se a importância da revisão da literatura, pois, o problema de pesquisa somente torna-se relevante quando se realiza uma análise crítica acerca do estado da arte na temática (RAMOS et al., 2014). Torna-se pertinente ao possibilitar identificar lacunas, conflitos e entendimentos dentro da área de estudo, e por fim, possibilitar que o objeto de pesquisa adentre em um campo ainda não explorado por outros pesquisadores (BRIZOLA; FANTIN, 2016). Este trabalho aplicou a metodologia de Revisão Sistemática, onde esta foi conduzida em duas etapas. Na primeira, determinou-se como objetivo buscar por estudos publicados acerca do tema Eficiência Energética de Aeradores com apoio da Internet das Coisas na Aquicultura 4.0. A segunda fase, teve por objetivo aprofundar a temática, utilizando-se de critérios de seleção e exclusão para delimitar os estudos pesquisados na primeira fase.

2.1 Revisão Sistemática da Literatura

A pesquisa bibliográfica foi realizada em bases de dados relacionadas aos campos da ciência e tecnologia, sendo elas: *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), *Association for Computing Machinery* (ACM), *SpringerLink*, *Scopus* (Elsevier) e *Web of Science* (Clarivate). De acordo com os pontos definidos no problema de pesquisa, definiu-se as seguintes palavras chaves: *Aerator*, *Aeration*, *Aquaculture*, *IoT*, *Energy Efficiency*. De modo que, foram elencadas duas strings de busca para pesquisa nos repositórios científicos, diferenciando-as por meio dos conectivos OR e AND, portanto,

definidas da seguinte maneira:

- “(Aerator OR Aeration)” AND Aquaculture AND “(IoT OR Energy Efficiency)”
- “(Aerator OR Aeration)” AND Aquaculture AND “(IoT AND Energy Efficiency)”

As palavras chaves foram utilizadas com filtro de pesquisa por títulos de trabalhos acadêmicos, consultando trabalhos publicados no período de 2011 a 2021. Considerou-se títulos de qualquer país, restringindo-se à apenas estudos relacionados ao tema Eficiência Energética de Aeradores no contexto de Aquicultura e Internet das Coisas, apenas nos idiomas inglês ou português, que estivessem disponíveis para consulta online e que contivessem ao menos 4 páginas. A fim de se verificar a eficiência da *string* de busca elencada, utilizou-se dois artigos de referência, com o anseio de que estes fossem localizados na busca sistemática, o que se confirmou durante a realização da pesquisa. Observa-se no Quadro 1 os artigos listados como referência.

Quadro 1 – Artigos de referência para busca.

Título	Autores
Assessment of the new generation aeration systems efficiency and water current flow rate, its relation to the cost economics at varying salinities for <i>Penaeus vannamei</i> culture	M Jayanthi et al.
Diversified aeration facilities for effective aquaculture systems—a comprehensive review	Subha M. Roy et al.

Fonte: Autoria própria, 2022

Como resultado da busca nos repositórios científicos em duas fases, foram encontrados 842 títulos na primeira fase da pesquisa. Como critérios exclusão, foram definidos os seguintes: trabalhos fora do contexto de aquicultura, eficiência energética e Internet das Coisas; trabalhos com publicação em idioma distinto do inglês; trabalhos sem aplicabilidade prática. Após aplicação de critérios de exclusão e remoção de duplicados, a segunda fase da pesquisa remeteu a análise de 10 trabalhos. Observa-se

na Figura 1, que dos 842 trabalhos encontrados na primeira fase da pesquisa, um percentual de 91% destes foram publicados somente na base científica SpringerLink, representados em sua maioria por trabalhos com baixo relacionamento ao tema da pesquisa.

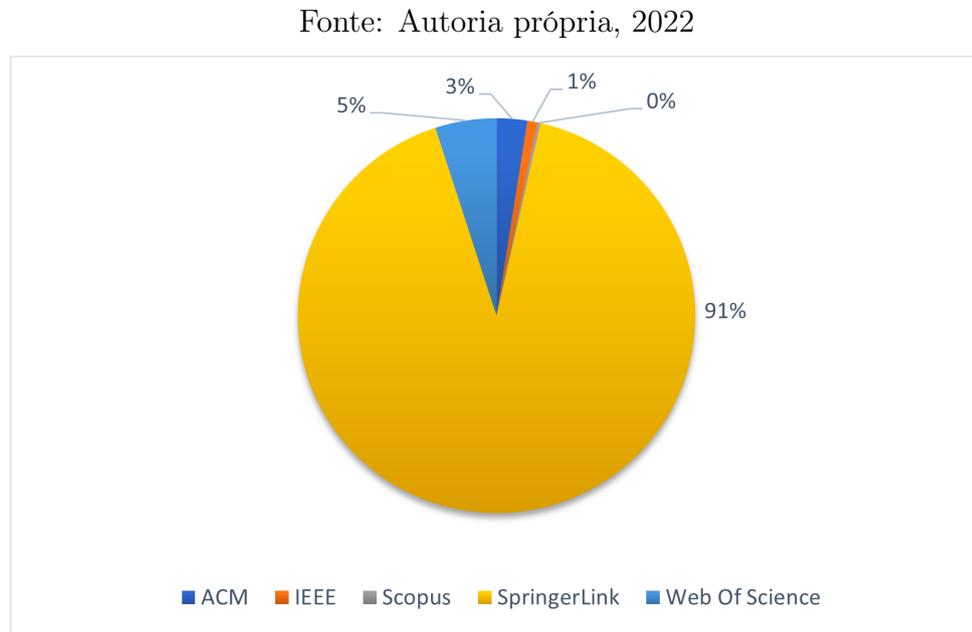


Figura 1 – Distribuição de trabalhos por base na primeira fase de pesquisa.

Nota-se na Figura 2, que no levantamento realizado sem aplicação de critérios de seleção e exclusão, ocorre a partir do ano de 2017 uma elevada tendência de trabalhos dentro do contexto, destacando-se o ano de 2021 com a maior incidência de publicações, com 147 artigos publicados, enquanto no ano de 2012 registrou-se a menor incidência, com apenas 29 estudos publicados.

Pode-se observar na Figura 3, que após aplicação dos filtros de seleção e exclusão, dentre os 10 trabalhos selecionados 50% foram publicados somente na base científica IEEE.

Fonte: Autoria própria, 2022



Figura 2 – Quantitativo de publicações por anos na primeira fase da pesquisa.

Fonte: Autoria própria, 2022

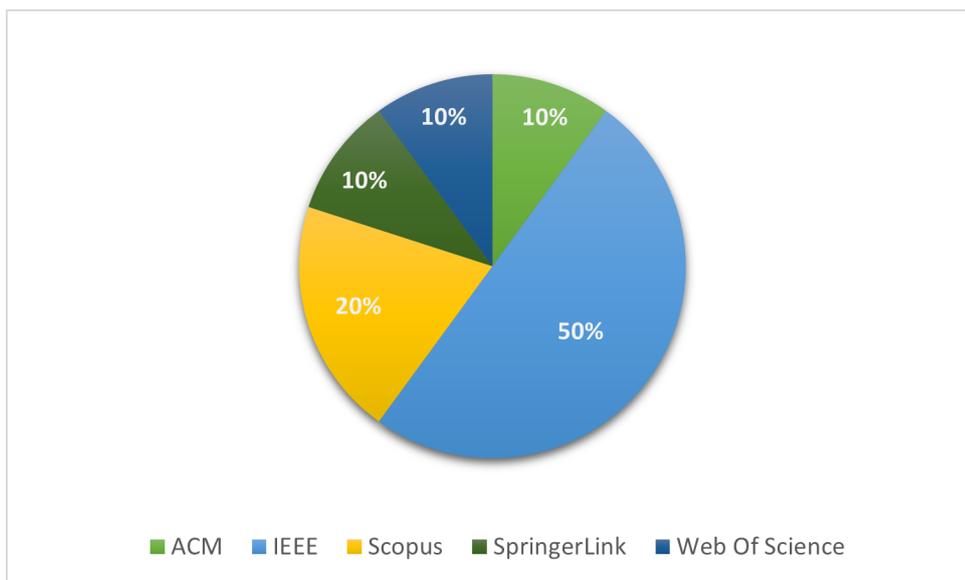


Figura 3 – Distribuição de trabalhos por base após filtros.

Nota-se na Figura 4, que na segunda fase do levantamento realizado, ocorreu no ano de 2020 a maior incidência de publicações, com 4 trabalhos publicados, enquanto em 2017 registrou-se o menor quantitativo, apenas 1 estudo. A Tabela 1 apresenta todos os artigos levantados por base.

Fonte: Aatoria própria, 2022

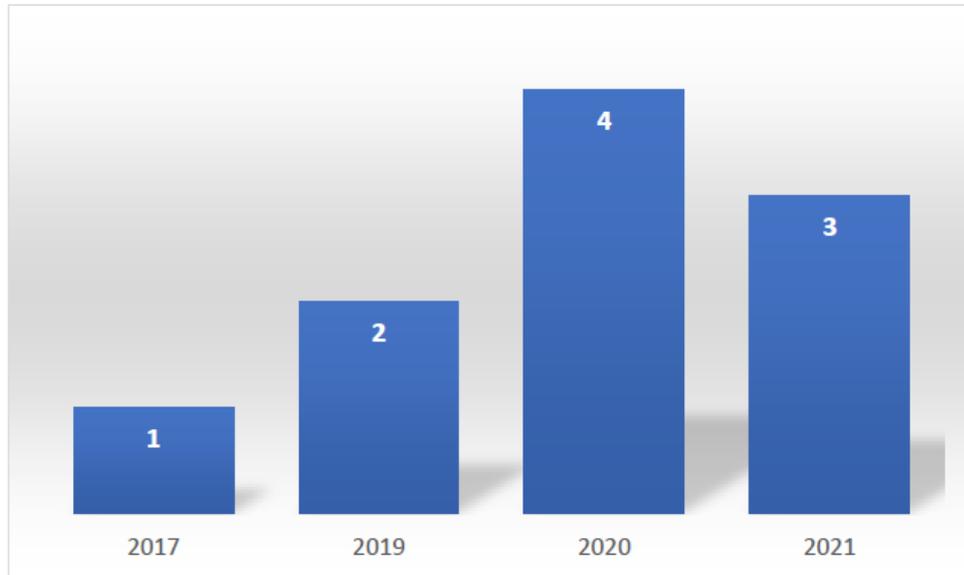


Figura 4 – Quantitativo de publicações por anos após filtros.

Tabela 1 – Artigos levantados por base.

Base científica	Artigos levantados	Artigos levantados após critérios excludentes
ACM	21	1
IEEE	7	5
Scopus	771	2
SpringerLink	1	1
Web of Science	42	1
Total	842	10

Fonte: Aatoria própria, 2022

2.2 Resultados e Discussão

Realizou-se uma análise detalhada dos estudos selecionados e constatou-se que a aplicação de tecnologias, como a utilização de dispositivos de Internet das Coisas para medir os parâmetros de qualidade da água, é bastante relevante de acordo com a literatura. Isso é importante para fornecer informações que ajudem a melhorar a eficiência energética no sistema de aeração dos tanques. Embora o contexto de sistemas de aeração tenha sido amplamente discutido na literatura, o foco é apenas em aeração, não contemplando o

contexto de IoT, onde apenas 10 trabalhos trazem à luz o uso de Internet das Coisas no contexto de aeração. Por fim, notou-se que também ocorre na literatura propostas de adoção de fontes de energias renováveis como forma de alcançar a eficiência energética. Ilustrou-se na Tabela 2 os artigos relacionados aos principais aspectos abordados no contexto de Eficiência Energética de Aeradores na Aquicultura 4.0.

Tabela 2 - Tabela comparativa de características importantes na área de pesquisa.

Referência	Aeraç. com IoT	WIFI	Otim. de aeração	Mede Efic. Enérg.	Mede OD da água	APP e dash board	Usa Inv. de freq.	Simulad. eficiência elétrica
Dr. Melito Baccay et al, 2021	x	x			x	x		
Sneha P.S et al, 2017	x	x			x	x		
Jesús Capelo et al, 2021	x	x			x	x		
Daniel Mwendwa et al, 2020			x	x				
M Jayanthi et al, 2020			x	x				
Subha M. Roy et al, 2021			x					
Claude E. Boyd et al, 2020			x					

Indra Ferdiansyah et al, 2019				x				x
Md. Raquibul Hasan et al, 2020				x			x	x
Li Yunfeng et al, 2019					x	x		

Fonte: Aatoria própria, 2022

De acordo com o que foi observado na Revisão Sistemática, pôde-se classificar os elementos que tratam sobre a eficiência energética em três subgrupos de sistemas: Sistemas de IoT, Sistemas elétricos e Sistemas de aeração. A seguir serão descritos os subgrupos e tecnologias utilizadas para apoiá-los no objetivo da pesquisa.

2.2.1 Sistemas de IoT

A adoção de sistemas de Internet das Coisas no contexto da aquicultura 4.0, oferece diversos benefícios ao produtor, tal como apoio às medições de parâmetros da água com precisão e baixo custo se comparado às soluções tradicionais, bem como na redução do consumo de energia elétrica ao se automatizar de forma inteligente a operação de aeradores, gerenciados de acordo com medições de parâmetros da água em tempo real, o que implica diretamente em amenização dos custos de produção.

Dentro desta seara, destacam-se os projetos de sistema *IoT* de gerenciamento de qualidade da água baseado em energia solar (BLANCAFLOR; BACCAY, 2021), Sistema de Monitoramento e controle automático de camarão e arrozal baseado em sistema de IoT (SNEHA; RAKESH, 2017), Sistema de monitoramento de oxigênio dissolvido baseado em Nb-Iot (YUNFENG; TIANPEI, 2019) e Sistema IoT baseado em Raspberry PI para

monitoramento remoto e controle automatizado do sistema de aeração de fazendas de camarão (CAPELO et al., 2021).

Pode-se notar que dentre os estudos relacionados ao contexto de Sistemas de Internet das Coisas da pesquisa, ainda restam lacunas no tocante à conectividade das soluções, visto que a maior parte dos estudos apresentam soluções de comunicação limitadas apenas ao uso de redes Wi-Fi, onde apenas um único artigo apresentou uso de redes móveis GSM (YUNFENG; TIANPEI, 2019) e outro o uso de redes sem fio Zigbee (CAPELO et al., 2021). Observa-se neste revisão, igualmente, a escassez significativa de estudos que efetuem a implementação de resoluções por meio de aplicações móveis e interfaces de administração online. Observa-se ainda que houveram ao menos dois trabalhos que utilizaram microcontroladores proprietários e de plataforma fechada, de complexa integração com sondas e sensores tradicionais voltados para *IoT*. Conclui-se então que temas como conectividade, aplicação móvel e microcontroladores ainda necessitam de maiores estudos e validações.

2.2.2 Sistemas elétricos

Face à importância da adoção de Sistemas de Internet das Coisas no contexto da Aquicultura, destaca-se também a adoção de estratégias e métodos inovadores no campo da eficiência energética como componente fundamental para a implementação de sistemas de aeração eletricamente eficientes. Nesse sentido, observa-se que a implementação de sistemas de alimentação energéticos provenientes de fonte de energia renováveis, tal como energia solar fotovoltaica, bem como a adoção de equipamentos eletrônicos secundários de apoio à gestão energética, como exemplo inversores de frequências, apresentam-se como fatores essenciais na redução de custos energéticos e aumento de vida útil do sistema de aeração, em contrapartida, observa-se que este ainda é um arcabouço minimamente difundido na literatura.

De acordo com a pesquisa realizada, a fim de se destacar os trabalhos relacionados ao contexto da eficiência de sistemas energéticos, foi possível listar os seguintes estudos: Aplicação de conversor bidirecional intercalado em aeradores de viveiros com alimentados por painéis solares (FERDIANSYAH et al., 2019), e Desempenho e análise econômica de um sistema de aeração solar independente (HASAN, 2020).

Dentro do contexto de sistemas elétricos, observa-se uma carência de estudos relacionados à integração e implementação de inversores de frequência em sistemas de aeração, onde constatou-se que apenas um estudo contemplou o tema supracitado. Pôde-se observar ainda que a implementação de modelos e estratégias de eficiência energética, tais como uso de sistemas automatizados de controle de aeração e adoção de simuladores para dimensionamento adequado de sistemas elétricos, são minimamente discutidos na literatura. Dado que a eficiência energética implica diretamente em redução de custos e aumento de lucratividade do produtor, ressalta-se a necessidade de aprofundamento de pesquisas relacionados ao tema.

2.2.3 Sistemas de Aeração

A introdução da aeração artificial na aquicultura representou um marco significativo, resultando em avanços substanciais na manutenção dos parâmetros de qualidade da água. Especificamente, essa abordagem inovadora desempenha um papel crucial no controle das concentrações de oxigênio dissolvido e na regulação da temperatura aquática. A adoção generalizada de sistemas de aeração equipados com motores elétricos surgiu em virtude de sua notável capacidade de demandar pouca manutenção e de serem de operação simplificada. Contudo, observou-se incremento de práticas de implementação que exibem excessos e desproporcionalidades. Isso engloba a instalação de configurações elétricas improvisadas e a utilização de dispositivos de aeração sem a devida monitorização dos parâmetros hídricos. Tais práticas questionáveis introduzem desafios contemporâneos para os produtores, os quais demandam uma abordagem respaldada pela ciência e tecnologia. O dimensionamento adequado dos sistemas de aeração, harmonizando considerações de ordem econômica e eficiência, requer uma intervenção informada por parte destes campos de conhecimento.

Diante da análise realizada, os seguintes trabalhos apresentam contribuições relevantes no contexto dos mais diversos tipos de sistemas de aeração artificial, tais como o sistema de recirculação de aquicultura (RAS) no Quênia e requisitos ambientais e de energia para a produção de diferentes biomassas de tilápia do Nilo ([WAMBUA et al., 2021](#)); Avaliação da eficiência dos sistemas de aeração de nova geração, vazão da corrente de água e sua relação com fatores econômicos, em salinidades variáveis para a cultura

Penaeus Vannamei (JAYANTHI et al., 2021); Instalações diversificadas de aeração para sistemas de aquicultura eficazes (ROY et al., 2021) e Uso da energia do aerador na criação de camarões e meios de melhoria (BOYD; MCNEVIN, 2021).

De acordo com os resultados obtidos na pesquisa, relacionados ao contexto de sistemas de aeração e *IoT*, nota-se que a literatura carece de publicações que abordem os padrões de taxas de eficiência de aeração *SAE* e *SOTR* (JAYANTHI et al., 2021) em sistemas artificiais, de modo que foi possível observar estes aspectos em apenas três estudos da pesquisa, no contexto de Internet das Coisas. Importante salientar que a automação de sistemas de aeração é também outro aspecto de mínima discussão na literatura e que carece de maior aprofundamento.

2.3 Considerações Finais da Revisão

O levantamento bibliográfico realizado nesta pesquisa contribui para enriquecer o conhecimento acerca do tema de Eficiência energética de aeradores, com apoio de Internet das Coisas na Aquicultura 4.0. De modo que, é possível observar na proposta o seu caráter inovador e preenchimento de lacunas evidentes. Durante a análise, os títulos foram classificados em três subgrupos: Sistemas de *IoT*, Sistemas elétricos e Sistemas de aeração.

Portanto, a partir da definição precisa dos três subgrupos apresentados anteriormente e a revisão sistemática realizada, pôde-se constatar que grande parte dos trabalhos se referiram principalmente ao gerenciamento da aquicultura com apoio de sistemas de Internet das Coisas. Do mesmo modo, a presença de estudos relativos à elaboração de estratégias e modelos de aeração inovadores também se apresentou expressiva, por fim, e em menor número, constatou-se os estudos relativos a meios e estratégias para avaliar e implementar eficiência energética de aeradores na aquicultura.

Diante das lacunas apresentadas, é proposta a implementação de um sistema de aeração economicamente viável. Essa proposta deve fundamentar-se nos conceitos de eficiência energética, empregando ferramentas destinadas a reduzir o consumo elétrico. Um exemplo relevante é a utilização de inversores de frequência, os quais têm a capacidade de otimizar o desempenho dos motores com máxima eficiência, minimizando os custos associados à geração de energia. Além disso, é recomendado adotar o conceito de Internet das Coisas (*IoT*) como suporte a esse sistema. A *IoT* permite a medição em tempo

real dos parâmetros de qualidade da água de forma econômica. Esses dados podem ser transmitidos por meio de redes sem fio (*Wireless*) ou redes móveis 3G/4G, garantindo conectividade eficiente. Ao obter dados paramétricos relevantes sobre a água, torna-se possível automatizar a operação dos aeradores de maneira autônoma.

3 Proposta

Este capítulo apresenta a proposta principal desta dissertação, que consiste em um sistema de eficiência energética para gerenciamento aeradores baseado em Internet das Coisas. Demonstra-se na primeira seção uma proposta de modelo conceitual do sistema, incluindo-se diagramas de circuitos elétricos, modelo com sensores e controlador, bem como, plataforma de gerenciamento.

3.1 Proposta de modelo

Os sistemas de aeração artificiais utilizados em tanques de cultivos na piscicultura e carcinicultura são usualmente movidos por motores e providos de hélices, rodas de pás, bomba verticais ou sopradores (BOYD; MCNEVIN, 2021) para realizarem a agitação das moléculas de oxigênio, desta forma elevando a concentração de oxigênio dissolvido na água. De maneira geral, não apresentam um nível de automação adequado em consonância com os recursos tecnológicos atualmente acessíveis, ou seja, não operam autonomamente, sendo necessário realizar o acionamento de maneira manual pelo próprio produtor. A operação manual do sistema de aeração traz consigo diversas consequências negativas para o aquicultor. Isso ocorre porque esse modo de operação resultará na utilização contínua dos aeradores por extensos períodos de tempo. Mesmo em momentos nos quais a aeração não seja necessária, os aeradores seriam mantidos em funcionamento. Essa situação ocorre devido à falta de informações precisas sobre os níveis de oxigênio dissolvido na água. Tal prática resulta em custos significativamente elevados com consumo de energia elétrica, conforme indicado por (BOYD; MCNEVIN, 2021). Além disso, essa operação contínua também pode acelerar o desgaste dos sistemas de aeração, reduzindo sua vida útil ao longo do tempo.

O presente estudo propõe a concepção de um sistema *IoT* para gerenciamento inteligente de aeração no contexto da Aquicultura 4.0, com foco na eficiência energética. A fim de automatizar a operação dos aeradores das fazendas de peixes e camarões, proporcionando ao produtor redução do consumo de energia elétrica, diminuição de carga de trabalho humana envolvida na operação, garantindo a manutenção adequada da taxa de oxigênio dissolvido na água, elevando a vida útil dos motores, bem como, otimizando

os custos de operação.

O gerenciamento inteligente da aeração na aquicultura depende da obtenção de dados paramétricos precisos de qualidade da água em que o sistema está inserido, necessita também de dispositivos eletrônicos capazes de processar os dados coletados e se comunicar, tanto com os motores elétricos do sistema de aeração, quanto com uma plataforma de gestão e monitoramento da aplicação. Na Figura 5 é exibida uma visão abrangente do sistema, o qual é constituído por uma arquitetura dividida em três camadas distintas. A primeira camada compreende a arquitetura de hardware (Figura 5a) e é composta por unidade microcontroladora e sensores associados. A arquitetura de circuitos elétricos é apresentada na segunda camada (Figura 5b), constituída por inversor de frequência e dispositivos de proteção elétrica. Por fim, na terceira camada compreende-se a arquitetura de software *IoT* (Figura 5c), composta por plataforma *IoT* de gerenciamento em nuvem e por aplicativo móvel. Deste modo, serão detalhadas nas subseções a seguir as respectivas camadas do modelo baseado em arquiteturas.

Fonte: Autoria própria, 2022

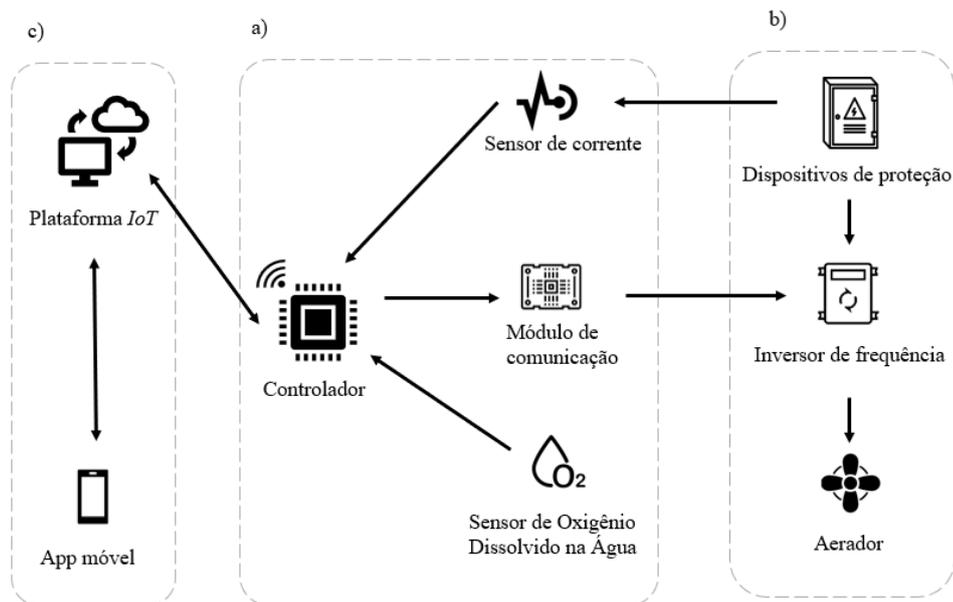


Figura 5 – Modelo de sistema proposto em três camadas.

3.1.1 Modelo de Arquitetura de hardware *IoT*

A arquitetura de hardware *IoT* (Figura 6), é composta por um controlador central de baixo custo, embutido com um algoritmo capaz de gerenciar os sensores interligados ao sistema, por realizar comunicação com inversor de frequência e acionamentos do aerador, bem como, enviar e receber, através de redes sem fio, dados paramétricos do sistema à plataforma de gerenciamento *IoT* baseada em computação em nuvem.

Para a mensuração do consumo elétrico do sistema de aeração, compõe-se ao sistema um sensor de corrente alternada (AC), capaz de medir em tempo real a variação de corrente elétrica (SILVA, 2014), o que torna possível ao controlador realizar cálculos de consumo elétrico dispendido pelo sistema, em quilowatt-hora (kWh). A informação de consumo elétrico do sistema de aeração é de suma importância, para fins de comparação e validação do protótipo.

A comunicação do controlador *IoT* com o inversor de frequência é realizada através de um módulo de comunicação, para que este acione proporcionalmente a carga do motor elétrico do aerador. O módulo de interface é capaz de traduzir os sinais digitais ou analógicos do controlador em pulsos de sinais elétricos para o inversor de frequência, utilizando o padrão de sinal de corrente 4 a 20 mA (NUNES et al., 2014), garantindo alto nível de segurança e elevada resistência a ruídos eletromagnéticos.

Para auxiliar na tomada de decisão relativa ao momento ideal de acionar o aerador e qual a proporção de potência utilizada, é necessário obter informações precisas e em tempo real da concentração de oxigênio dissolvido (OD) na água do viveiro. Desta forma, um sensor de oxigênio dissolvido compõe a arquitetura de hardware do sistema. Conforme mencionado por (SANTOS et al., 2016), o sensor em questão é responsável pela coleta de dados de Oxigênio Dissolvido (OD) no tanque para que o microcontrolador processe e verifique pontualmente a necessidade de aeração, evitando acionamentos desnecessários do aerador e conseqüentemente reduzindo o consumo de energia elétrica.

Fonte: Aatoria própria, 2022

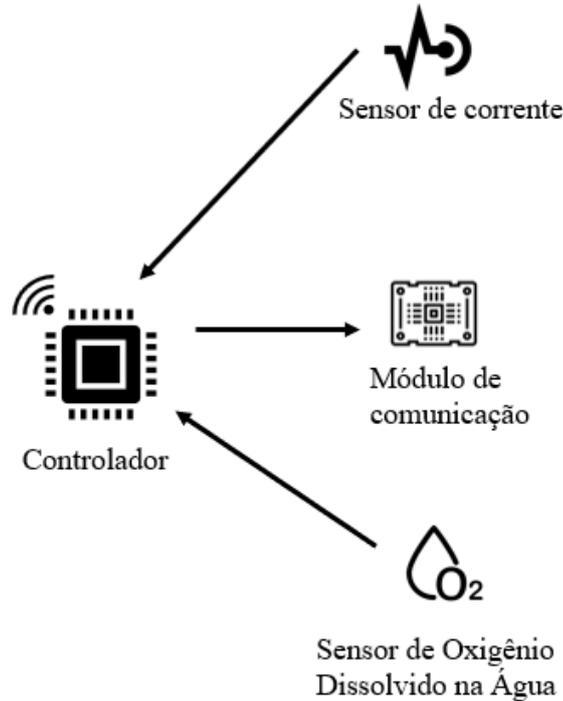


Figura 6 – Modelo de Hardware na Arquitetura em camadas.

3.1.2 Modelo de Arquitetura de sistemas elétricos

Compõem a arquitetura de sistemas elétricos (Figura 7) os módulos de Dispositivos de Proteção, módulo Inversor de Frequência e Motor elétrico do Aerador. A fim de garantir a proteção de humanos e de todos os componentes do sistema, propõe-se a adoção de uma série de dispositivos de proteção elétrica (SILVA, 2016), como aterramento exclusivo para o sistema, de tal modo que ocorra o direcionamento de eventuais correntes de fugas para o solo. Propõe-se também a utilização de disjuntores térmicos para proteção contra sobrecarga de tensão elétrica no cabeamento e hardwares do sistema, a utilização de dispositivo de proteção contra surtos (DPS) também é proposta devido a sua capacidade de evitar que correntes de surto atinjam os componentes de hardware. Por fim, propõe-se o uso de disjuntor termomagnético exclusivamente para proteção do motor elétrico, este último por sua vez é dotado de proteção magnética contra curto-circuitos e proteção térmica contra sobrecarga de corrente elétrica no motor.

Propõe-se para este projeto a utilização de aerador montado sob motor elétrico de indução trifásico, alimentado por tensão e corrente alternada. Este tipo de motor é rotativo,

tendo sua construção baseada em duas partes: o rotor e o estator. A seção do estator é composta por um enrolamento com bobinas, que são alimentadas pelas respectivas fases do sistema elétrico trifásico (FREITAS, 2013). A seção do rotor é construída com chapas magnéticas, dotado também de um eixo e conjunto de rolamentos. Optou-se pelo motor de indução trifásico devido à possibilidade de controlar o giro do motor ao variar a frequência e a tensão de alimentação das fases do motor.

Utiliza-se o dispositivo inversor de frequência para que seja possível variar a potência de giro do motor elétrico de indução trifásico. O inversor é capaz de converter em sinal de onda quadrada os sinais senoidais de tensão elétrica, através de modulação por largura de pulso (PWM), permitindo então controlar dinamicamente a potência do aerador (JUNIOR et al., 2015). Outros benefícios do inversor de frequência incluem a customização da rampa de aceleração inicial do motor ou de parada do motor, suavizando a operação do sistema.

Fonte: Autoria própria, 2022

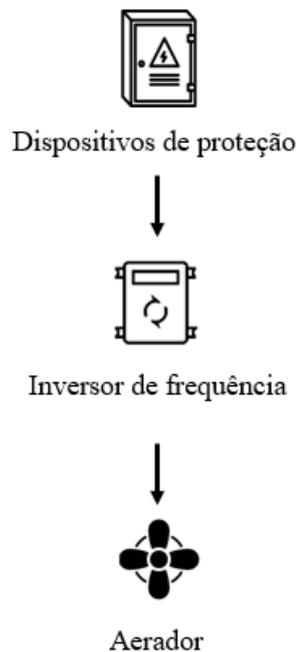


Figura 7 – Modelo de sistemas elétricos na Arquitetura em camadas.

3.1.3 Modelo de Arquitetura de software *IoT*

A camada de software *IoT* (Figura 8) subdivide-se em dois módulos, sendo o primeiro a plataforma *IoT* de gerenciamento, hospedada em servidor computacional em nuvem. A adoção de uma plataforma em nuvem permite o gerenciamento de vários dispositivos *IoT* simultaneamente, de mesmo modo, permitindo o armazenamento de todos os dados produzidos pelos dispositivos em um banco de dados centralizado. A plataforma de *IoT* dispõe de um *dashboard*, composto por uma interface gráfica, este por sua vez é útil para otimizar o acompanhamento da operação do sistema, bem como, para realizar análise de dados de maneira rápida e eficiente. A comunicação dos dispositivos *IoT* com a plataforma de gerenciamento ocorre por meio da internet, por meio de mensagens HTTP.

O segundo componente deste modelo é o aplicativo para dispositivos móveis, como *smartphones* ou *tablets*, funcionando como uma extensão da plataforma *IoT* hospedada na nuvem. Contudo, o aplicativo permite acesso aos dados de maneira rápida, prática e objetiva, em qualquer lugar, sem depender de um computador de mesa ou notebook. Um ponto relevante para o uso do aplicativo móvel é a possibilidade de utilização para aferição ou calibração do sistema inteligente em campo, e a possibilidade obter rapidamente informações do funcionamento do sistema.

Fonte: Autoria própria, 2022

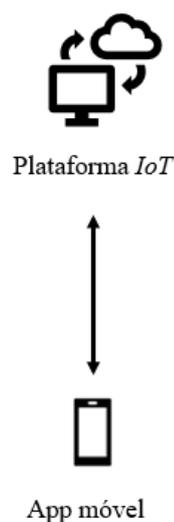


Figura 8 – Modelo de Software *IoT* na Arquitetura em camadas.

4 Metodologia

O presente capítulo apresenta a metodologia desta pesquisa, proposta para o adequado entendimento e construção do sistema proposto neste trabalho, bem como, para avaliar seu desempenho. Na primeira seção descreve-se a visão geral da metodologia e suas etapas empregadas neste trabalho, a seguir, apresenta-se o cenário de avaliação da pesquisa e o protótipo desenvolvido, na seção a seguir serão apresentados os indicadores de desempenho para avaliação do experimento, e por fim, será apresentada a metodologia de testes empregada no experimento.

4.1 Visão geral

Esta seção descreve a metodologia proposta para construir e avaliar um sistema *IoT* de gerenciamento energético eficiente de aeradores empregados em manejos de aquicultura, assim como, mensurar a eficiência energética do sistema implementado em um cenário de testes, por fim, compreender o impacto financeiro do sistema para o produtor. Para o desenvolvimento desta pesquisa, a metodologia pautou-se em oito etapas: Revisão Sistemática da Literatura, Modelagem do sistema, Elaboração de aplicativo e *dashboard*, Implementação dos dispositivos, teste dos dispositivos e teste de comunicação, validação do modelo, medição e coleta de dados, por fim, avaliação dos resultados. Desenvolveu-se um diagrama (Figura 9) para melhor visualização das referidas etapas.

Preliminarmente realizou-se na Etapa 1 um levantamento sistemático da literatura, observada no capítulo 2, com o objetivo de levantar o estado da arte acerca do contexto de eficiência energética de aeradores com apoio de *IoT*. A partir do estudo realizado, buscou-se por dispositivos e tecnologias já existentes no mercado, além de componentes de baixo custo e alta disponibilidade no comércio nacional, possibilitando então a construção de um protótipo da solução que se propõe nesta pesquisa. Definiu-se as seguintes tecnologias:

- Plataforma Arduino de prototipagem eletrônica;
- Plataforma *Blynk* de *core* Internet das Coisas;
- Plataforma *Things Board* para Dashboard *IoT*;
- Dispositivo Inversor de Frequência para comando de motor trifásico;
- Padrão 4-20mA para comunicação com Inversor de Frequência.

Fonte: Autoria própria, 2022

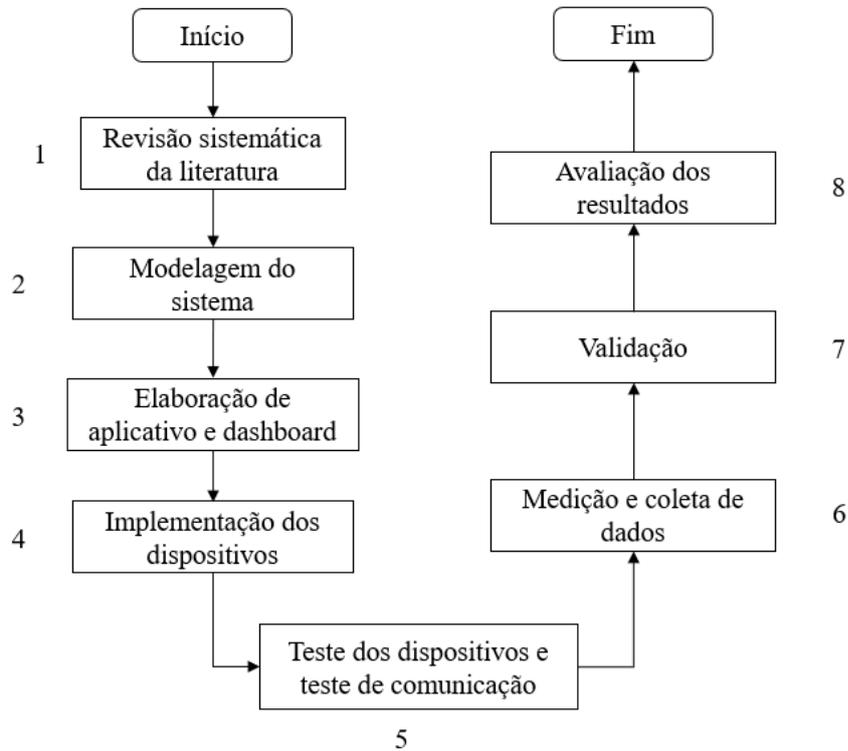


Figura 9 – Etapas metodológicas.

A seguir, subdividiu-se as próximas etapas em duas frentes de trabalho, sendo a primeira abordando a modelagem do sistema, enquanto a segunda frente apresentou a implementação dos dispositivos, testes e suas coletas de dados.

Na Etapa 2, observada no capítulo 3, ocorreu a modelagem do sistema, a partir da criação de um modelo conceitual, de baixo grau de complexidade, apresentando uma topologia do sistema em três camadas. A primeira camada do modelo conceitual apresentou uma Arquitetura de hardware baseada nos conceitos de *IoT*, a segunda camada apresentou uma arquitetura de sistemas elétricos, baseado em diagrama de circuitos elétricos. A próxima camada do modelo aborda uma Arquitetura de software dentro do contexto de *IoT*.

Avançando para a segunda frente de trabalho, ocorreu na Etapa 3 a elaboração de um *Dashboard*, implementado em um servidor remoto em nuvem pública, além do desenvolvimento de um aplicativo móvel, implementado através da plataforma de *IoT* móvel, *Blynk*, para fornecer ao usuário acesso às informações da operação dos dispositivos, além dos dados históricos armazenados.

Na Etapa 4 reuniu-se os componentes de hardware necessários para montagem

de um protótipo em bancada, em seguida, realizou-se a montagem do Sistema *IoT* de gerenciamento energético eficiente de aeradores, onde posteriormente instalou-se em um ambiente controlado dentro do *campus* da Universidade Federal Rural de Pernambuco para avaliações, em conformidade com a realidade encontrada em fazendas de aquicultura do estado de Pernambuco.

Realizou-se na Etapa 5 os testes de funcionamento e comunicação do sistema, avaliando se as funcionalidades implementadas estão sendo executadas conforme definições do projeto. Ainda nesta etapa, verificou-se o desempenho da infraestrutura de redes implementada para o experimento, para garantir a devida comunicação dos dispositivos de hardware com o ambiente de gerenciamento em nuvem.

Por fim, procedeu-se na Etapa 6 com a aferição e coleta dos dados produzidos pelo sistema durante o período de avaliações, em seguida, realizou-se os devidos tratamentos dos dados e sua consolidação, para que fosse possível realizar a Etapa 7, de avaliação de resultados obtidos.

4.2 Implementação do sistema proposto

4.2.1 Camada de sistemas de Hardware *IoT*

A implementação física do sistema proposto subdividiu-se em duas camadas, sendo a primeira a camada de hardware *IoT* e a segunda a camada de sistemas elétricos. Na implementação da camada de Hardware *IoT*, optou-se por duas abordagens, onde provisionou-se um sistema *IoT* para controle e automação do sistema de aeração com apoio de microcontroladores, placa de interface para comandos elétricos e sensor de corrente elétrica AC.

Para uma melhor compreensão, a definição de microcontrolador remete a um dispositivo de tamanho reduzido, composto por placa de circuito integrado, embarcado com microprocessador, memórias e interfaces de entrada/saída analógicas ou digitais, sendo sua programação armazenada em uma memória *EPROM* (CASTRO, 2020). A adoção de um microcontrolador ideal viabiliza a redução de custos e otimiza a eficiência do projeto, atendendo aos requisitos desenhados na modelagem do sistema.

Para atender aos requisitos do projeto, optou-se pela plataforma de prototipagem eletrônica Arduino. Trata-se de uma plataforma com software de código aberto (*Open-*

source), com licença *Creative Commons*, desenvolvida na Itália em meados de 2005 (ARDUINO, 2018), por um time de pesquisadores que buscava aproximar a comunidade acadêmica e pessoas com afeição à eletrônica a desenvolverem seus projetos de maneira simplificada, com um baixo custo. A plataforma Arduino é composta por uma placa com microcontrolador de baixo custo, com conexões para instalação de módulos externos, e sua programação é realizada através de um ambiente de desenvolvimento integrado, o Arduino IDE. A linguagem de programação chama-se Arduino, e foi desenvolvida com base no *framework Wiring*, este último sendo fortemente baseado na linguagem C++ (BETTY - A ESCOLA DE TECNOLOGIA, 2021). Portanto, nota-se durante o desenvolvimento de aplicações no Arduino IDE a sua semelhança com a linguagem C++, que é amplamente difundida nas comunidades internacionais de desenvolvimento de software.

Como observado acerca da plataforma Arduino, concebida através da licença *Creative Commons*, que permite a outros fabricantes e entusiastas publicarem ou reproduzirem placas baseadas na plataforma Arduino, houve uma popularização de placas microcontroladas baseadas nesta plataforma, produzidas por outros fabricantes, em sua maioria de origem Chinesa, apresentando dispositivos ainda mais baratos, com maior eficiência energética e com novos recursos de conectividade. Destaca-se neste cenário a fabricante Espressif, com sede na China, e com escritório no Brasil (ESPRESSIF SYSTEMS, 2021), desenvolvedora de placas microprocessadas de baixo custo, com possibilidade de programação de seu *firmware* através do Arduino IDE. Diante do exposto, optou-se por utilizar no projeto o microcontrolador da família Espressif.

Para que torne-se possível automatizar um sistema elétrico de aeração de aquicultura, faz-se necessário interligar o microcontrolador ao inversor de frequência trifásico que comanda o motor trifásico do aerador, para realizar tal interligação, optou-se por implementar uma placa de interface. Sendo os comandos de atuação enviados a partir do microcontrolador em forma de tensão elétrica de 0 e 3,3V para a placa de interface, onde esta converte a tensão em corrente elétrica (NS AUTOMAÇÃO, 2018), em escala de grandeza de 4 a 20mA. A corrente recebida no inversor de frequência é utilizada como parâmetro para acionamento e variação da potência do motor do aerador.

Utilizou-se o sensor de corrente para realizar medições de corrente no sistema *IoT* para controle e automação do aerador. Trata-se de um sensor de corrente invasivo, de

baixo custo, capaz de realizar medições de baixas e médias correntes, com alta sensibilidade (VIDA DE SILÍCIO, 2018). O módulo de medição de corrente, utiliza o efeito HALL para realizar medições de correntes alternadas ou contínuas, este efeito é caracterizado pelo surgimento de um campo elétrico transversal quando uma corrente elétrica flui através de um condutor, ao passo que este condutor esteja imerso em um campo magnético.

Com a presença de um campo magnético perpendicular, ocorre uma distorção no fluxo da corrente presente no condutor, onde uma distribuição nos elétrons causada pela distorção resulta numa diferença de potencial (DDP) na saída (LUMINUS ELETRICIDADE, 2022). Denomina-se a DDP resultante como tensão Hall, e a partir desta o algoritmo irá calcular a corrente elétrica, e conseqüentemente o consumo elétrico do sistema em quilowatt-hora (kWh). A segunda abordagem dentro da camada de Hardware *IoT* teve como implementação (Figura 10) um sistema *IoT* para sensoriamento da qualidade da água, composto por um microcontrolador (Figura 10a), sensor de oxigênio dissolvido na água (Figura 10b) e sensor de temperatura (Figura 10c). Os respectivos sensores fornecem dados precisos sobre a qualidade da água, parâmetros extremamente necessários para o devido controle e automação do sistema de aeração.

Fonte: Autoria própria, 2022

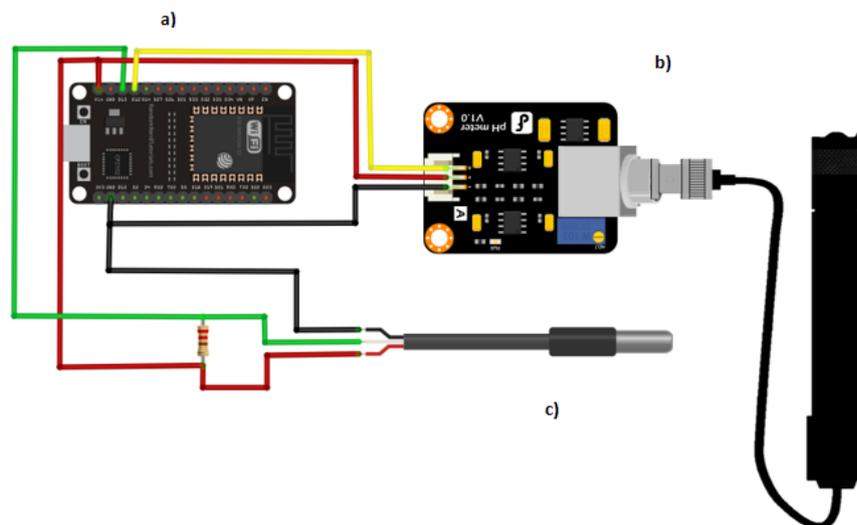


Figura 10 – Sistema IoT para sensoriamento de qualidade da água.

A fim de apoiar a tomada de decisões sobre o momento ideal para ativar o aerador e determinar a potência adequada a ser utilizada, é essencial obter informações precisas e em tempo real dos parâmetros de qualidade da água no viveiro, sendo a concentração

de oxigênio dissolvido (OD) um dos parâmetros norteadores. Para isso, o sistema inclui um sensor de oxigênio dissolvido como parte da arquitetura de hardware. Neste projeto optou-se pela utilização da sonda de OD de tipo galvânico. Esta sonda consegue realizar leituras de OD na faixa de 0 a 20 mg/L, sua saída de dados é analógica variando de 0 a 3,0 V, pode ser submersa a mais de 300m de profundidade e é capaz de realizar leituras de OD tanto em água doce, quanto em água salgada após calibração e compensação de parâmetros como salinidade, pressão e temperatura.

Para se garantir uma elevada precisão na coleta do parâmetro de OD na água, deve-se levar em considerações fatores externos capazes de alterar a sua concentração na água, tal como a variação de temperatura ao longo do dia, por tanto, faz-se necessário a adoção de uma sonda medidora de temperatura da água, para realizar o monitoramento em tempo real a sua variação, para possibilitar ao algoritmo realizar as devidas compensações. Neste projeto optou-se pela utilização de um sensor de temperatura digital, de baixo custo, livre de interferências, construído com ponta metálica de aço inox, capaz de medir temperaturas entre -55°C e $+125^{\circ}\text{C}$ e operando com tensões entre 3,0 V e 5,5 V. Sua construção robusta torna este sensor à prova d'água, podendo realizar medições submerso.

Desta forma, com as informações sobre o oxigênio dissolvido no tanque coletadas pela sonda de Oxigênio Dissolvido, permite-se que o microcontrolador processe e monitore em tempo real a qualidade da água no viveiro, e caso se verifique que a concentração de OD está abaixo dos limiares pré-estabelecidos no algoritmo, ocorrerá o acionamento proporcional do aerador, evitando-se acionamentos desnecessários do sistema de aeração, consequentemente resultando em economia de energia elétrica e aumento da vida útil dos componentes do sistema. O sensor de temperatura fornece a temperatura do ambiente em que está inserido, e a variável de temperatura é necessária para que o sensor de oxigênio dissolvido tenha boa precisão em diferentes temperaturas da água ao longo dia (SANTOS et al., 2018). A montagem deste sistema foi realizada em uma flutuador plástico, como visto na Figura 11, com alimentação elétrica por painel fotovoltaico, para instalação em superfície de água em tanque de aquicultura.

O sistema *IoT* para monitoramento de qualidade da água desempenha um papel fundamental ao agir como um sistema de coleta de informações sensoriais nos tanques de cultivos. Este mantém uma monitoração contínua sobre a concentração de oxigênio dissolvido nos viveiros, garantindo que as medições sejam precisas e estejam disponíveis em

Fonte: Aatoria própria, 2022



Figura 11 – Sistema IoT para sensoriamento da qualidade da água.

tempo real, para que seja possível a tomada de decisão quanto ao acionamento do sistema de aeração. Essencialmente, o microcontrolador, em conjunto com as sondas, traduz as complexas propriedades físicas do oxigênio presente na água em dados digitais. Em vez de depender de métodos convencionais de transmissão, como cabos físicos, o microcontrolador opta pela utilização da tecnologia *wireless* 802.11, amplamente conhecida como *Wi-fi*. Essa abordagem viabiliza a transmissão dos dados sem necessidade de fios, garantindo agilidade e confiabilidade. Esses dados são então enviados de maneira eficiente para uma plataforma de Internet das Coisas (*IoT*) hospedada em nuvem, onde são armazenados e disponibilizados para análise e monitoramento remoto, independente da automação do sistema de aeração.

4.2.2 Camada de sistemas elétricos

No contexto amplo dos sistemas elétricos, encontram-se integrados diversos componentes essenciais, dos quais destacam-se elementos de proteção, um módulo inversor de frequência e um motor elétrico especialmente designado para a operação do aerador. Com o propósito fundamental de garantir a segurança das pessoas envolvidas e de preservar a integridade de todos os componentes do sistema, surge a proposta de adotar uma série de dispositivos voltados para a proteção elétrica. Nesse sentido, uma abordagem que se

destacou foi a implementação de um sistema de aterramento exclusivo para o sistema em questão, sendo este um aterramento do tipo TN-S, caracterizado pela instalação de haste de cobre, de comprimento de 1,5 m, fincada no solo e conectada ao barramento de aterramento do sistema através de condutor elétrico exclusivo (RIBEIRO et al., 2021). A instalação do aterramento, seguiu os padrões estabelecidas na norma técnica NBR 5410, que regulamenta a segurança de pessoas e bens no âmbito de instalações elétricas de baixa tensão (LIMA; LAGE, 2019). A haste metálica foi inserida no solo, distante cerca de 2 metros do quadro de comandos elétricos, possibilitando a proteção tanto do sistema *IoT* para controle e automação do aerador, quanto o próprio motor de indução trifásico do aerador. O sistema de aterramento direciona correntes de vazamento de forma direta para o solo, evitando qualquer risco de acidentes ou falhas, no quadro de comandos elétricos, bem como no viveiro de peixes.

Ademais, foram introduzidos disjuntores térmicos com o intuito de prevenir sobrecargas de tensão elétrica tanto nos cabos quanto nos componentes de hardware. Essa medida visa garantir que o sistema opere dentro dos limites de segurança, evitando danos e interrupções desnecessárias. Outra estratégia incorporada foi a inclusão de um dispositivo de proteção contra surtos (DPS). Este desempenha um papel crucial, atuando para evitar que correntes de surto, que podem ser originadas por flutuações súbitas na rede elétrica, impactem os componentes de hardware. Dessa forma, o DPS contribui para a manutenção da durabilidade e confiabilidade do sistema como um todo. Finalmente, foi optado por utilizar um disjuntor termomagnético especialmente designado para proteger o motor elétrico. Esse componente oferece uma defesa de múltiplas facetas: proteção magnética para impedir danos em caso de curtos-circuitos e proteção térmica para prevenir o superaquecimento e a sobrecarga de corrente elétrica no motor. Como observado em (SILVA, 2016), todas essas medidas se combinam em uma abordagem abrangente, cujo principal objetivo é assegurar não apenas a segurança dos envolvidos, mas também o desempenho otimizado e a durabilidade de todo o sistema.

Neste estudo, optou-se por utilizar um aerador de tipo chafariz, devido à sua disponibilidade no cenário real de experimentação, sendo este aerador impulsionado por um motor elétrico de indução trifásico. Esse motor é alimentado por corrente alternada e possui uma estrutura rotativa composta por duas partes principais: o rotor e o estator. O estator é composto por um conjunto de bobinas que são energizadas pelas diferentes

fases do sistema elétrico trifásico. Por outro lado, o rotor é constituído por lâminas magnéticas e é equipado com um eixo e rolamentos. A decisão de empregar um motor de indução trifásico foi tomada devido à sua habilidade de regular a velocidade de rotação através da variação da frequência e tensão aplicadas às suas fases (FREITAS, 2013). Isso proporciona uma flexibilidade significativa e um controle preciso sobre o desempenho do aerador, permitindo ajustes conforme necessário para diferentes condições de operação. A Figura 12 apresenta o aerador de tipo chafariz utilizado na pesquisa.

Fonte: Autoria própria, 2022



Figura 12 – Aerador chafariz de 1,5hp.

O modelo específico selecionado para integrar esse experimento foi o W22 IR3 Premium, produzido pela fabricante WEG. Esse modelo ostenta uma potência nominal de 1,5 HP, o que equivale a aproximadamente 1,1 kW, e uma corrente nominal de 4,25 A. O destaque recai sobre a eficiência desse motor, a qual é estimada em até 86% pelo próprio fabricante (WEG, b). A escolha deste modelo específico fundamentou-se em sua capacidade de satisfazer com excelência as demandas do estudo, conjugando eficácia e eficiência de forma harmônica.

No decorrer desta pesquisa, optou-se por empregar um dispositivo inversor de frequência PWM, que desempenha um papel crucial ao viabilizar a capacidade de ajustar

tanto a potência quanto a velocidade de rotação do motor elétrico de indução trifásico (FREITAS, 2013). Especificamente para este estudo, foi selecionado o Inversor de Frequência Senoidal, notável por sua aptidão em gerenciar motores trifásicos com potência de até 2 cv e corrente de 7 A (WEG, a). Este inversor é caracterizado por sua capacidade de transformar os sinais de tensão elétrica, originalmente senoidais, em sinais de onda quadrada por meio do método de modulação por largura de pulso (*PWM*), abrindo caminho para o controle dinâmico da potência do aerador.

Além desse recurso central, o inversor de frequência oferece uma gama de vantagens adicionais. Um exemplo é a possibilidade de personalizar as taxas de aceleração e desaceleração do motor, resultando em um funcionamento mais suave e gradual do sistema. Essa característica contribui para minimizar quaisquer variações bruscas e impactos indesejados durante as transições de velocidade, o que por sua vez aprimora a eficiência e o controle operacional do aerador em questão. Com isso, a combinação da funcionalidade de controle de frequência e das vantagens suplementares oferecidas pelo inversor contribui para um desempenho otimizado e uma operação mais adaptável e precisa do sistema como um todo.

4.2.3 Camada de software *IoT*

A camada de software no contexto da Internet das Coisas (*IoT*) desempenha um papel crucial, sendo composta por dois módulos essenciais. O primeiro deles é a plataforma de gerenciamento de *IoT*, a qual encontra sua base em um servidor hospedado na nuvem. Ao adotar uma solução baseada em nuvem, abre-se uma série de vantagens que incluem a capacidade de administrar simultaneamente diversos dispositivos *IoT*, bem como a possibilidade de centralizar o armazenamento de todos os dados gerados por esses dispositivos em um banco de dados único (SILVA; PEREIRA, 2021). Essa plataforma de *IoT* também traz consigo um *dashboard* intuitivo, composto por uma interface gráfica amigável (vide Figura 13). Essa interface facilita a tarefa de acompanhar o funcionamento do sistema de maneira clara e compreensível. Além disso, este se revela de extrema utilidade para visualizar e analisar os dados coletados de maneira ágil e eficiente. Portanto, o *dashboard* se torna uma ferramenta valiosa para a análise de dados, identificação de tendências, detecção precoce de possíveis falhas e otimização do uso eficiente de recursos.

Fonte: Autoria própria, 2022



Figura 13 – Dashboard da plataforma IoT.

A comunicação entre os dispositivos *IoT* e a plataforma de gerenciamento é estabelecida por meio da Internet, utilizando protocolos padrão como mensagens HTTP (GET e POST) e redes sem fio 802.11. Essa infraestrutura de comunicação eficaz permite que os dispositivos enviem os dados coletados pelos sensores para a plataforma e, em troca, recebam comandos e configurações para ajustar seu funcionamento conforme necessário. Nesse contexto, assegurando um gerenciamento remoto completo dos dispositivos, viabilizando o monitoramento e a operação do sistema de aeração a partir de qualquer localidade e a qualquer momento. É válido ressaltar, ainda, que a plataforma de gerenciamento em nuvem oferece recursos avançados. Entre eles, destaca-se a capacidade de integração com outros serviços e aplicativos, abrindo caminho para uma expansão das funcionalidades do sistema. Essa integração não só enriquece o espectro de aplicações, mas também fortalece a interoperabilidade com outras soluções de *IoT*, ampliando assim o potencial da infraestrutura abordada nesta pesquisa.

Para uma explicação lógica do funcionamento do sistema, elaborou-se um diagrama de as instruções do controlador *IoT* (Figura 14), de maneira a facilitar a compreensão de cada etapa de seu funcionamento no experimento. Este inicia pela declaração de bibliotecas responsáveis pela integração de sensores e periféricos, a seguir, definem-se variáveis gerais, necessárias para conversões e cálculos do algoritmo principal. Em seguida, definem-se os parâmetros e credenciais de autenticação na rede sem fio *Wireless* e parâmetros para

requisição HTTP GET de dados de medição de OD provenientes do microcontrolador do sistema *IoT* de monitoramento de qualidade da água.

Realizam-se a seguir a inicialização do bloco de funções de execução, onde é feita a conexão do microcontrolador à rede sem fio, efetua-se logo após a requisição HTTP GET para obter dados de OD atualizados, seguindo pela execução da leitura do sensor de corrente par fins de cálculo de consumo elétrico. Em seguida, inicia-se o bloco de verificações condicionais de nível de OD, para a partir desta, o microcontrolador executa a tomada de decisão, neste ponto, podendo efetuar o acionamento gradativo do motor do aerador, entre 0 e 100% conforme a necessidade de concentração de OD. Por fim, executa-se o envio de dados através de uma requisição HTTP POST para o servidor em nuvem com dados de telemetria referentes à consumo elétrico calculado, utilização do motor e corrente elétrica, no momento da operação.

Fonte: Autoria própria, 2022

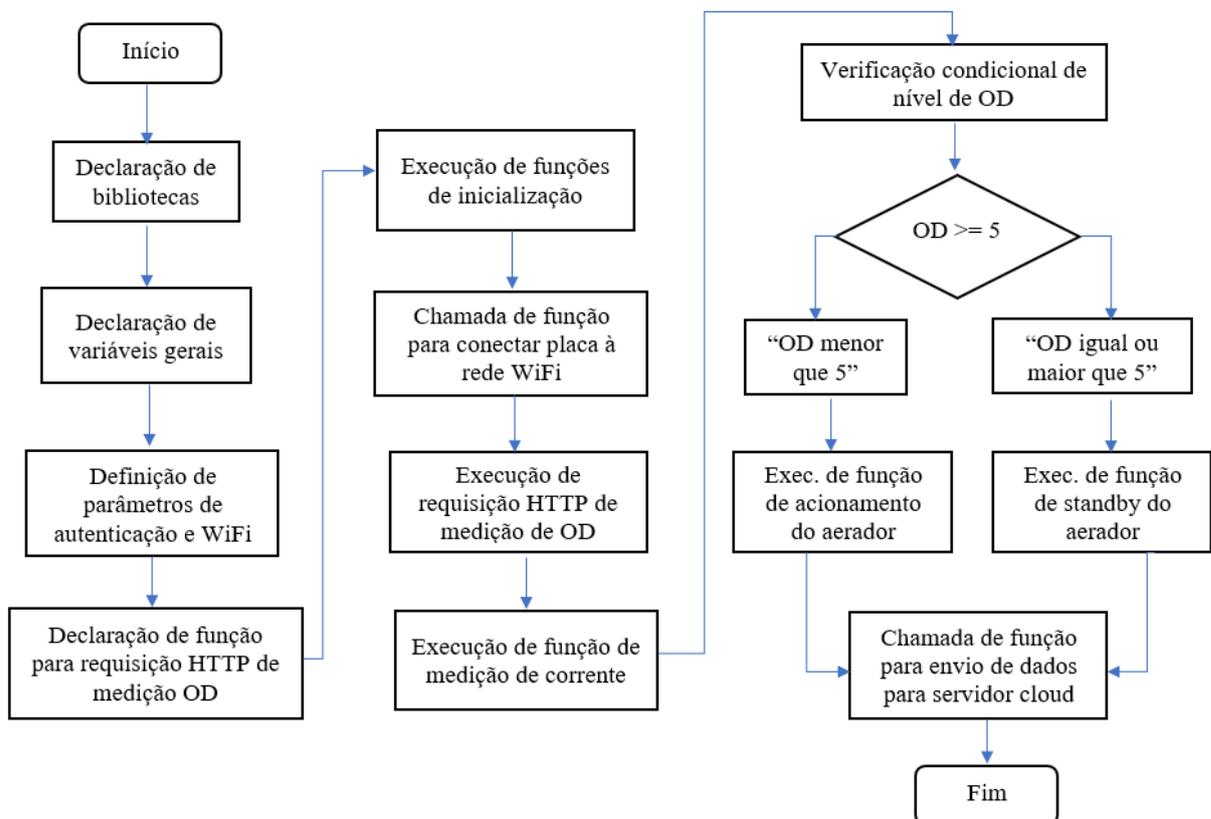


Figura 14 – Diagrama de instruções controlador *IoT*.

O segundo componente essencial deste modelo desempenha um papel crucial no seu funcionamento abrangente. Trata-se do aplicativo móvel, uma solução projetada

especificamente para dispositivos como *smartphones* e *tablets*. Esse aplicativo funciona como uma extensão da plataforma de Internet das Coisas (*IoT*) hospedada na nuvem, agregando uma dimensão prática e acessível ao sistema como um todo. Uma de suas características centrais é a possibilidade de acessar os dados de forma rápida e objetiva a partir de qualquer localidade, sem a necessidade de depender de um computador *desktop* ou de um notebook. No âmbito do desenvolvimento, o aplicativo foi elaborado para dispositivos que operam com o sistema operacional Android, garantindo uma experiência otimizada e integrada para os usuários desse sistema. No entanto, sua importância vai muito além da mera interface.

Fonte: Autoria própria, 2022



Figura 15 – Aplicativo móvel para monitoramento do sistema.

O app desempenha um papel crucial ao possibilitar a obtenção de informações em tempo real sobre o funcionamento do sistema em questão, e pode ser visto na Figura 15. Isso, por sua vez, habilita a realização de análises em campo, bem como disponibiliza notificações eventuais para falhas ou necessidades de ajustes. O que é particularmente

valioso é o fato de que o aplicativo não apenas coleta e apresenta dados, mas também permite uma interação proativa com o sistema. Ao proporcionar uma interface gráfica, o usuário tem a capacidade de visualizar dados, receber notificações relevantes e executar comandos de controle de maneira prática e eficiente, podendo alternar entre a operação automatizada do sistema de aeração ou acionamento manual de potência. Isso não só agiliza a tomada de decisões informadas, mas também garante a operação eficaz do sistema em si, traduzindo-se em fatores-chave para realização do experimento de maneira eficiente.

Em um contexto mais amplo, a mobilidade concedida pelo aplicativo móvel pode desempenhar um papel especialmente significativo no contexto da aquicultura. Nessas configurações, onde a criação de organismos aquáticos é realizada, a capacidade de monitorar e controlar remotamente o sistema de aeração em tempo real é de suma importância. Isso é especialmente relevante em locais distantes ou de difícil acesso, onde a presença física para ajustes ou verificações frequentes pode ser inviável. Portanto, o aplicativo móvel constitui uma peça-chave desse modelo, elevando sua utilidade e eficácia ao oferecer uma interface prática e eficiente para interação, monitoramento e controle.

4.3 Cenário de avaliação

A pesquisa em questão foi conduzida no Campus Recife da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizado precisamente na Rua Dom Manoel de Medeiros, situada no bairro Dois Irmãos, na cidade de Recife, no estado de Pernambuco. Este campus possui uma característica única ao estar inserido em uma Zona Especial de Proteção Ambiental, uma vez que é cercado por uma densa vegetação que desempenha um papel fundamental na preservação do ecossistema local.

O desenvolvimento dessa pesquisa abrangeu duas fases distintas e complementares, cada uma contribuindo de maneira significativa para o progresso do projeto em geral. Inicialmente, foi dada ênfase à etapa de desenvolvimento e prototipagem, que envolveu a criação e concepção do modelo experimental. Nesse contexto, as atividades foram realizadas nas instalações do Departamento de Computação, uma parte integral da infraestrutura acadêmica da instituição. Este departamento se destaca por fornecer um ambiente propício, dispondo de infraestrutura e laboratórios bem equipados que se mostraram fundamentais para o êxito das pesquisas conduzidas.

A disponibilidade de tais recursos tecnológicos permitiu a exploração e experimentação de tecnologias cruciais para o funcionamento eficaz do projeto de sistema *IoT* para eficiência energética de aeradores. Isso incluiu não apenas a investigação teórica, mas também a oportunidade de montar um protótipo operacional tangível que pudesse incorporar os princípios e as inovações desenvolvidas durante a pesquisa. Após a fase inicial de desenvolvimento e prototipagem, o estudo progrediu para sua segunda etapa, focando na instalação do protótipo em um ambiente real. Essa fase permitiu a avaliação prática das teorias e conceitos observados na literatura. Os testes conduzidos nessa etapa foram vitais para avaliar a eficácia e a funcionalidade do protótipo em situações reais, garantindo assim que as soluções propostas em modelo estivessem alinhadas com as necessidades práticas do sistema em questão.

Para a realização da etapa de instalação do experimento, direcionou-se a atenção para a base de engenharia de pesca e aquicultura da Universidade Federal Rural de Pernambuco, denominada Estação de Aquicultura Continental Johei Koike, a qual se encontra localizada dentro do Campus Recife. Esta base exibe uma infraestrutura notável, composta por mais de 30 viveiros dedicados à piscicultura, que representam um ambiente propício para instalação do protótipo e avaliação de seu desempenho. Uma visualização abrangente de sua localização é possível por meio da Figura 16, a qual apresenta uma imagem de satélite do complexo de viveiros na base de pesca, onde nota-se a presença de 35 viveiros para criação de peixes e realização de pesquisas, bem como, prédios administrativos da base de pesca.

Fonte: Google Maps, 2022



Figura 16 – Imagem de satélite base de pesca da UFRPE.

No contexto da escolha do local, um processo de avaliação levou à seleção do

tanque designado como A2. Este tanque, classificado como do tipo escavado, se destaca por suas características dimensionais: possui uma profundidade de 1,5 metros, uma extensão de 25 metros e uma largura de 10 metros, este pode ser visualizado na Figura 17. Esses atributos dimensionais forneceram o cenário ideal para a execução do experimento planejado, mostrando-se adequado para a utilização do aerador previamente integrado ao projeto. No início do experimento, o referido tanque foi povoado com exemplares da espécie de peixe conhecida como Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). Essa escolha realizada pelos engenheiros de pesca responsáveis pela gestão da base de pesquisa, que se mostrou criteriosa e alinhada aos objetivos da pesquisa, uma vez que a referida espécie tem boa capacidade de sobrevivência em ambientes com *deficit* de oxigênio.

Fonte: Autoria própria, 2022



Figura 17 – Tanque de cultivo de piscicultura A2.

Inicialmente, foi realizado um processo de montagem dos componentes eletrônicos que compõem o sistema de *IoT* para automatizar e controlar o desempenho do aerador. Esses componentes foram cuidadosamente organizados e integrados dentro de um quadro de comando metálico. Essa estrutura foi estrategicamente posicionada em um abrigo, situado em proximidade ao tanque de cultivo A2. A escolha dessa localização foi orientada por uma perspicaz consideração: assegurar que o sistema elétrico permaneça resguardado

de intempéries, como chuvas, e do impacto adverso da umidade, fatores que poderiam comprometer o funcionamento adequado dos dispositivos. Além dessa salvaguarda, essa disposição também confere a vantagem de permitir manutenções futuras com um enfoque primordial na segurança envolvidos. Por fim, ainda neste abrigo, realizou-se a instalação do roteador com funcionalidade de ponto de acesso sem fio, garantindo uma boa cobertura de conexão à internet sem fio nas áreas demarcadas para o experimento.

Para estabelecer a interconexão entre o aerador trifásico e o quadro de comando, optou-se um cabo de alta qualidade, caracterizado por sua flexibilidade e composto por 4 vias funcionais. Essa escolha reforça a capacidade do sistema em operar de forma eficaz e sustentada. No que tange ao tanque de cultivo A2, um planejamento foi empregado para determinar as posições ideais para a instalação dos componentes. O flutuador incorporando as sondas de OD e temperatura, concebidas para monitorar a qualidade da água com precisão, foi instalado próximo ao centro do tanque. A coexistência harmoniosa do flutuador de sondas com o aerador trifásico foi alcançada mediante um esquema de posicionamento que sustenta uma distância estratégica de 4 metros entre eles. Essa disposição garante que os deslocamentos de água gerados pelo aerador não afetem a precisão das sondas.

Para garantir a integridade física e a estabilidade desses dispositivos no ambiente do viveiro, adotou-se o uso de cordas de nylon resistentes para ancoragem. Essas cordas foram utilizadas para fixar os flutuadores do aerador e das sondas em pontos de ancoragem laterais do tanque. Mesmo durante a operação ativa do aerador, a concepção cuidadosa desse sistema de fixação proporciona uma tranquilidade adicional, assegurando que o posicionamento não seja afetado. A Figura 18 apresenta o tanque com os dispositivos instalados.

Fonte: Autoria própria, 2022



Figura 18 – Tanque de cultivo A2 com sondas e aerador.

Em síntese, as abordagens utilizadas na montagem, posicionamento e integração dos componentes eletrônicos, juntamente com a utilização de estratégias de proteção e fixação, resultou na criação de um sistema *IoT* robusto, capaz de automatizar a operação do aerador e monitorar a qualidade da água com uma eficiência notável no ambiente do tanque de cultivo A2.

5 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão expostos e debatidos os resultados alcançados ao longo da avaliação do Sistema IoT de eficiência energética para aeradores no contexto da Aquicultura 4.0. Esse exame levará em conta métricas de avaliação e desempenho predefinidas. Inicialmente, a primeira seção discursará sobre as técnicas de avaliação. Na subsequente, serão detalhadas as métricas de desempenho empregadas para a avaliação do protótipo. Por último, na última seção, os resultados obtidos serão objeto de discussão.

5.1 Técnicas de avaliação

No intuito de determinar a abordagem de avaliação mais apropriada para sistemas e processos, realizou-se uma análise com base nas contribuições de (JAIN, 1991). Dentro desse contexto, o autor identificou a existência de três metodologias fundamentais para tal fim: a modelagem analítica, a simulação e a medição. Tais abordagens oferecem perspectivas distintas, permitindo uma compreensão mais abrangente das características e desempenho do sistema em questão.

Entretanto, é crucial reconhecer que a seleção mais sensata da técnica de avaliação demanda a consideração de uma série de critérios. Nesse sentido, Jain destaca que um critério de suma importância é a avaliação do estágio do ciclo de vida em que o sistema se encontra. Em outras palavras, o contexto temporal e as condições evolutivas do sistema têm uma influência significativa na escolha da abordagem adequada. Dessa forma, essa análise pode garantir que os métodos de avaliação escolhidos se alinhem de maneira coerente com a maturidade e as necessidades do sistema, evitando assim resultados distorcidos ou inadequados.

Quadro 2 – Critérios de técnicas de avaliação.

Critério	Modelagem analítica	Simulação	Medição
Estágio	Qualquer	Qualquer	Após protótipo
Tempo necessário	Curto	Intermediário	Variável
Ferramentas	Analítica	Linguagens computacionais	Instrumentação
Precisão	Baixa	Moderada	Variável
Avaliação de trade-off	Fácil	Moderado	Difícil
Custos	Pequenos	Intermediários	Altos
Vendabilidade	Baixa	Intermediária	Alta

Fonte: Adaptado de Raj Jain, 1991

Além desse critério primordial, ressalta-se a existência de outros critérios relevantes que devem ser considerados durante a seleção da técnica de avaliação mais apropriada. Esses critérios adicionais são expostos de forma sistemática no Quadro 2, permitindo aos pesquisadores e profissionais uma visão abrangente dos fatores que devem ser levados em conta no processo de escolha da metodologia de avaliação mais condizente com o cenário em questão. Portanto, é evidente que a seleção adequada da técnica de avaliação requer uma análise ponderada, levando em consideração tanto as particularidades do sistema quanto os critérios estabelecidos pela literatura científica.

5.2 Métricas de avaliação

Na obra de (JAIN, 1991), é abordada a importância de empregar métricas de desempenho ao conduzir análises de performance. Essas métricas são essenciais para avaliar o sistema em diferentes estados de operação, os quais podem ser categorizados em três principais tipos: funcionamento adequado, operação com falha e ausência de operação. Destaca-se a importância de uma abordagem baseada em métricas quantificáveis para compreender como um sistema responde em termos de eficiência, capacidade e

confiabilidade. Essas métricas permitem não apenas a análise do sistema em si, mas também oferecem uma maneira objetiva de comparar diferentes sistemas em termos de desempenho.

No que diz respeito às diferentes categorias de estados operacionais, Jain enfatiza que compreender como um sistema opera em seu estado normal é crucial para estabelecer uma linha de base de desempenho. Isso proporciona uma referência vital para avaliar desvios quando o sistema entra em operação com falhas, onde métricas como taxa de erros, tempo de resposta aumentado e redução da capacidade podem ser monitoradas. Além disso, também ressalta-se a importância de examinar a falta de operação do serviço, o que envolve investigar e quantificar a indisponibilidade do sistema. Isso inclui períodos de tempo em que o serviço não está acessível ou está funcionando abaixo dos padrões aceitáveis.

Foram delineadas as seguintes medidas de avaliação de desempenho: 1) Utilização do motor, onde será avaliado o percentual de uso do motor em cada etapa de testes; 2) Consumo elétrico, em que será analisado o consumo de energia elétrica do sistema de aeração; 3) Custo elétrico, onde irá se avaliar o custo com energia elétrica despendido em cada etapa; 4) Qualidade da água, de modo que será avaliado a concentração média de oxigênio dissolvido nas etapas do experimento; 5) Eficiência energética, onde será realizada uma análise comparativa da eficiência energética do sistema em comparação à estratégia tradicional de aeração.

5.3 Avaliação dos resultados

Nesta seção, apresenta-se a avaliação dos resultados que foram alcançados a partir da execução do experimento. Esta avaliação de resultados está subdividida em quatro etapas bem definidas, cada uma com uma duração de 10 dias. O principal objetivo de cada uma dessas etapas foi examinar a eficácia do sistema tradicional de aeração em diferentes cenários operacionais e compara-lá com o desempenho do sistema *IoT* de eficiência energética para gestão da aeração. A Figura 19 detalha o cronograma das quatro etapas de medições, realizada num total de 40 dias, entre os meses de outubro e dezembro de 2022. Nas três primeiras etapas realizou-se a operação do aerador em um cenário tradicional, simulando a utilização por um produtor, variando a intensidade de uso diária

em 12 horas, 18 horas e 24 horas, respectivamente em cada uma das três etapas iniciais. No desfecho dos testes realizados na quarta etapa, na qual o aerador foi operado em modo autônomo por intermédio do sistema *IoT* de eficiência energética, durante um período de 10 dias, é pertinente apresentar as constatações que emergiram deste experimento.

Fonte: Autoria própria, 2022

Etapas	26/10	04/11	05/10	14/11	15/11	24/11	25/11	04/12
1# Operação manual do aerador 12 hs/dia								
2# Operação manual do aerador 18 hs/dia								
3# Operação manual do aerador 24 hs/dia								
4# Operação do sistema em modo autônomo								

Figura 19 – Cronograma das etapas de experimentação.

Uma parte do ciclo de crescimento da espécie de peixe tilápia do Nilo, entre a fase de alevinos até a de juvenis, foi acompanhado ao longo das etapas de avaliação do sistema. Através de medições manuais om equipamento Oxímetro, notou-se que à medida que a criação cresceu, houve um aumento no consumo de oxigênio no tanque. Tal fator está diretamente relacionado ao aumento das necessidades dos peixes em termos de oxigênio dissolvido na água e, conseqüentemente, à operação mais intensa do sistema de aeração.

Adicionalmente, procedeu-se com a avaliação do consumo elétrico do motor do aerador em cada uma das etapas. Além disso, realizou-se uma avaliação da média da concentração de Oxigênio Dissolvido na água durante todo o experimento. Tendo como objetivo a determinação do percentual médio de utilização do motor em relação à sua potência máxima disponível. Onde, por sua vez, permitiu-se avaliar o quanto o motor trifásico de indução foi explorado durante as diversas fases do experimento.

5.3.1 Etapa 1: Operação manual do aerador por 12h diárias

Na etapa inicial dos testes, simulou-se o uso moderado do aerador por um produtor de peixes, operando o sistema durante 12 horas por dia, ao longo de 10 dias corridos, em uma janela horária compreendia entre às 18:00 e 06:00 em que não ocorre a incidência de luz solar e conseqüentemente a não produção de OD pelas algas através da fotossíntese. Consolidou-se no Quadro 3 os dados obtidos na primeira etapa de testes. Observou-se nesta fase, que o motor do aerador foi operado a 100% de sua potência nos momentos

em que esteve em operação. O percentual médio de uso do motor durante essa etapa foi mensurado em 52%, onde calculou-se que o tempo de uso do motor foi de aproximadamente 120 horas, evidenciando um uso significativo do sistema. Ao longo dessa etapa de operação, o consumo elétrico acumulado pelo sistema foi medido em 138,32 kW.

Quadro 3 – Resultados da etapa 1.

Métrica	Valor
Consumo elétrico acumulado	138,32 kW
Custo com energia elétrica	R\$ 97,98
Média de Oxigênio Dissolvido	5,37 mg/L
Desvio Padrão de Oxigênio Dissolvido	1,67 mg/L
Percentual médio uso do motor	52%
Horas de uso do motor	120 h

Fonte: Autoria própria, 2022

Com base no consumo elétrico medido (figura 20), pode-se calcular o custo com energia elétrica despendido na primeira etapa multiplicando o consumo acumulado pela taxa do kWh. Considerando que o custo do kWh praticado em Pernambuco para o consumidor de baixa tensão é de R\$ 0,71 (NEOENERGIA, 2022), o custo elétrico resultante dessa etapa foi de R\$ 97,98.

Fonte: Autoria própria, 2023

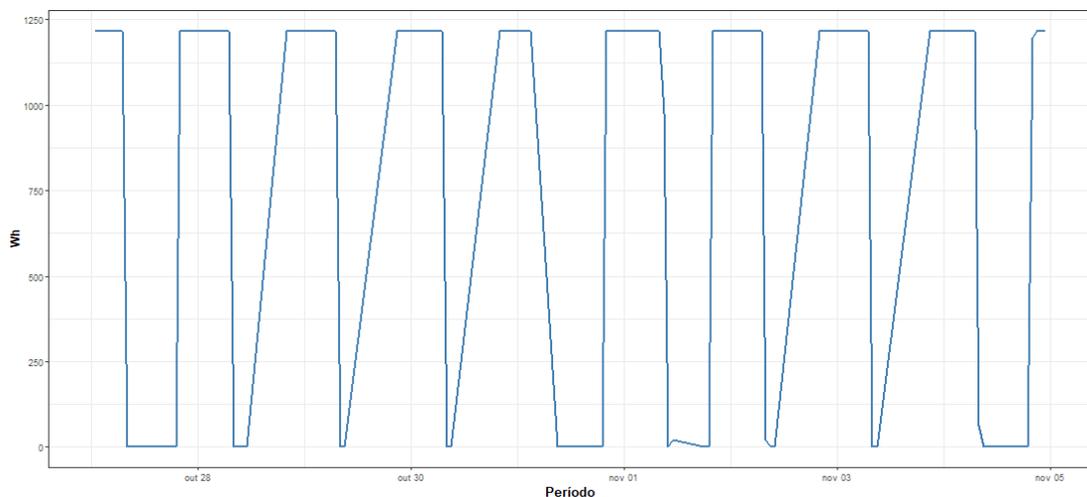


Figura 20 – Gráfico de consumo elétrico na etapa 1.

Tratando-se de qualidade da água, a Figura 21 apresenta um gráfico do comportamento da Oxigênio Dissolvido na primeira etapa, onde constatou-se que nível de OD manteve-se mais elevado nos períodos diurnos, com concentração acima de 5 mg/L, em horários noturnos variou entre 3,5 mg/L e 4,5 mg/L. A concentração média de OD foi registrada em 5,37 mg/L e o desvio padrão foi de 1,67 mg/L. A população de peixes no viveiro ainda estava em fase de alevino, o que significa que estavam em sua fase inicial de vida. Por tanto, nesta primeira etapa houve um nível aceitável de oxigenação da água para sustentar a vida aquática, porém, a utilização do sistema de aeração em momentos desnecessários resultou em aumento com custo de energia elétrica, incremento nas horas de uso do motor, encurtando desnecessariamente o intervalo de manutenção do motor. Para avaliar a eficiência energética do sistema de aeração, comparou-se adiante os resultados da estratégia tradicional de aeração com o sistema em modo de operação autônomo.

Fonte: Autoria própria, 2023

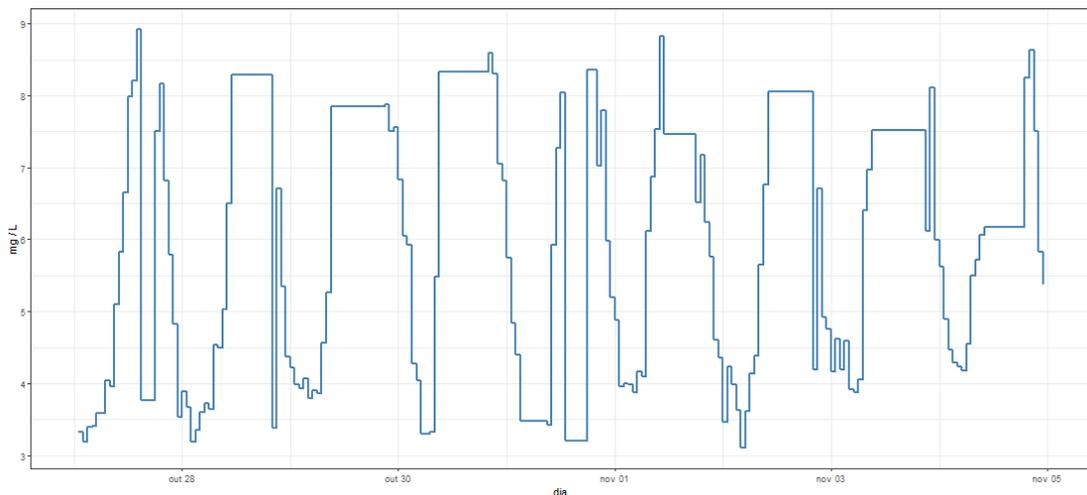


Figura 21 – Gráfico de comportamento do OD na etapa 1.

5.3.2 Etapa 2: Operação manual do aerador por 18h diárias

Na segunda etapa, ainda simulando a operação manual de um aerador, com uso mais intenso, durante mais 10 dias corridos o aerador foi utilizado 18 horas por dia, desta vez em uma janela horária entre às 16:00 e 10:00, ampliando o uso do aerador para horários muito antes do fim da luz solar e seu retorno. Consolidou-se no Quadro 4 os dados obtidos na segunda etapa de testes. Ressaltando-se que nesta fase o motor do aerador manteve-se

em 100% de sua potência nos momentos em que esteve em operação. O percentual médio de uso do motor durante essa etapa foi mensurado em 65%, onde calculou-se que o tempo de uso do motor foi de aproximadamente 156 horas, demonstrando um uso ainda mais significativo do sistema. Durante esta etapa o consumo elétrico acumulado pelo sistema foi medido em 188,84 kW.

Quadro 4 – Resultados da etapa 2.

Métrica	Valor
Consumo elétrico acumulado	188,84 kW
Custo com energia elétrica	R\$ 134,07
Média de Oxigênio Dissolvido	5,38 mg/L
Desvio Padrão de Oxigênio Dissolvido	1,74 mg/L
Percentual médio uso do motor	65%
Horas de uso do motor	156 h

Fonte: Autoria própria, 2023

Com base no consumo elétrico medido (Figura 22), pode-se calcular o custo de energia elétrica proveniente da segunda etapa. Levando-se em consideração o custo do kWh praticado em Pernambuco para o consumidor de baixa tensão é de R\$ 0,71, o custo elétrico resultante dessa etapa foi de R\$ 134,07. Representando um aumento de aproximadamente 27% em relação à etapa anterior.

Fonte: Autoria própria, 2023

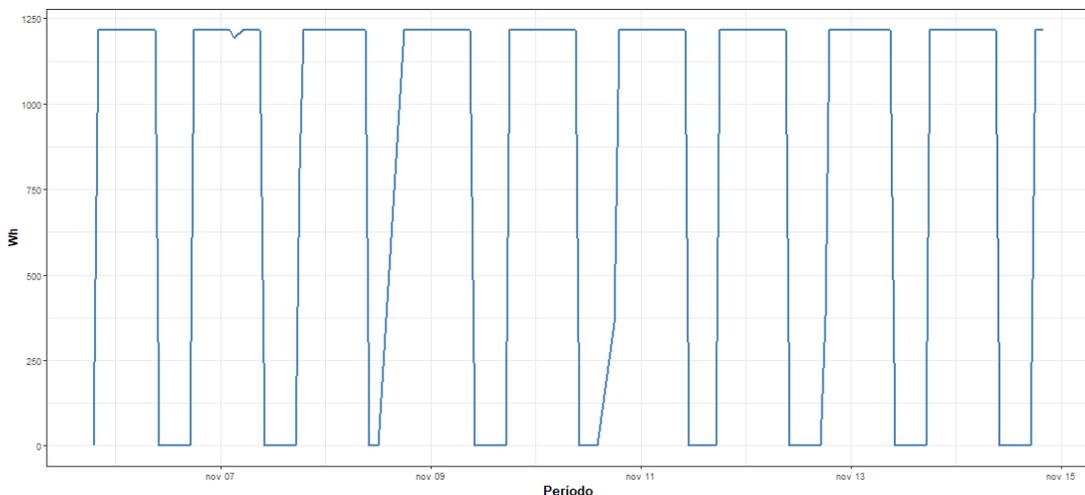


Figura 22 – Gráfico de consumo elétrico na etapa 2.

Tratando-se de qualidade da água, a Figura 23 apresenta um gráfico do comportamento da Oxigênio Dissolvido na segunda etapa, onde pôde-se observar que nível de OD da mesma forma manteve-se mais elevado nos períodos diurnos, com concentração acima de 5 mg/L, em horários noturnos variou entre 3 mg/L e 4 mg/L. A concentração média de OD foi registrada em 5.38 mg/L e o desvio padrão foi de 1,74 mg/L. A população no viveiro estava em fase final de alevino, em transição para adolescência, conhecida como juvenil. Na segunda etapa a concentração de oxigenação dissolvido manteve-se adequada para sustentar a vida aquática, novamente, com uma elevada utilização do sistema de aeração em momentos desnecessários, o que resultou em um custo ainda maior de energia elétrica, houve um incremento ainda maior nas horas de uso do motor, encurtando desnecessariamente o intervalo de manutenção do motor. Para avaliar a eficiência energética do sistema de aeração, comparou-se mais adiante os resultados da estratégia tradicional de aeração com o sistema em modo de operação autônomo.

Fonte: Autoria própria, 2023

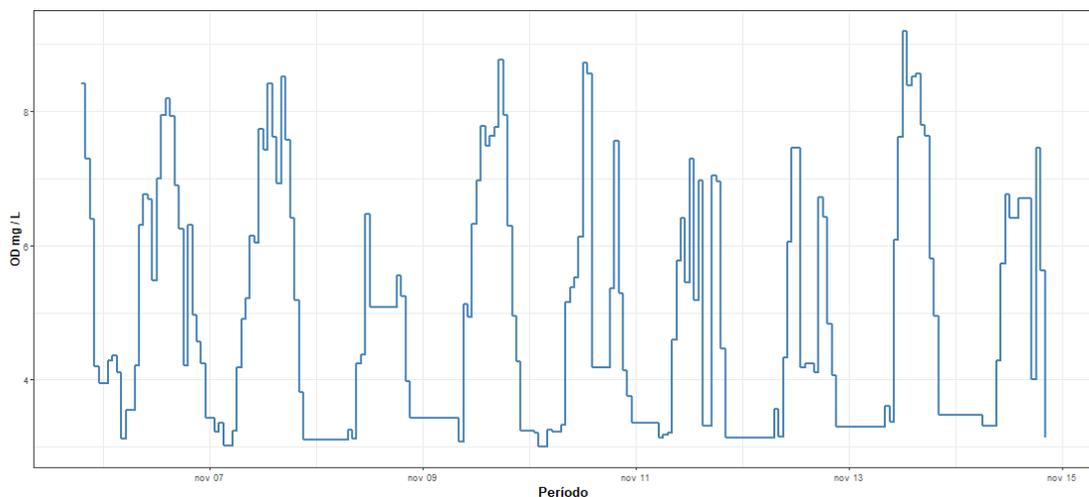


Figura 23 – Gráfico de comportamento do OD na etapa 2.

5.3.3 Etapa 3: Operação manual do aerador por 24h diárias

Prosseguindo para a terceira etapa, mantendo-se a operação manual do aerador simulando um produtor, desta vez com uso severo. A utilização do aerador foi realizada de maneira ininterrupta durante os 10 dias. Consolidou-se no Quadro 5 os dados obtidos na terceira etapa de testes. O motor do aerador manteve-se sempre em 100% de sua potência

nesta fase. O percentual médio de uso do motor durante essa etapa foi mensurado em aproximadamente 100%, onde calculou-se que o tempo de uso do motor foi de aproximadamente 208 horas, demonstrando um uso severo do sistema de aeração. Durante esta etapa o consumo elétrico acumulado pelo sistema foi medido em 253 kW.

Quadro 5 – Resultados da etapa 3.

Métrica	Valor
Consumo elétrico acumulado	253 kW
Custo com energia elétrica	R\$ 179,63
Média de Oxigênio Dissolvido	4,63 mg/L
Desvio Padrão de Oxigênio Dissolvido	1,29 mg/L
Percentual médio uso do motor	100%
Horas de uso do motor	208 h

Fonte: Autoria própria, 2023

Com base no consumo elétrico medido (Figura 24), pode-se calcular o custo de energia elétrica proveniente da terceira etapa. Levando-se em consideração o custo do kWh praticado em Pernambuco para o consumidor de baixa tensão é de R\$ 0,71, o custo elétrico resultante dessa etapa foi de R\$ 179,63. Representando um aumento de aproximadamente 26% em relação à etapa anterior.

Fonte: Autoria própria, 2023

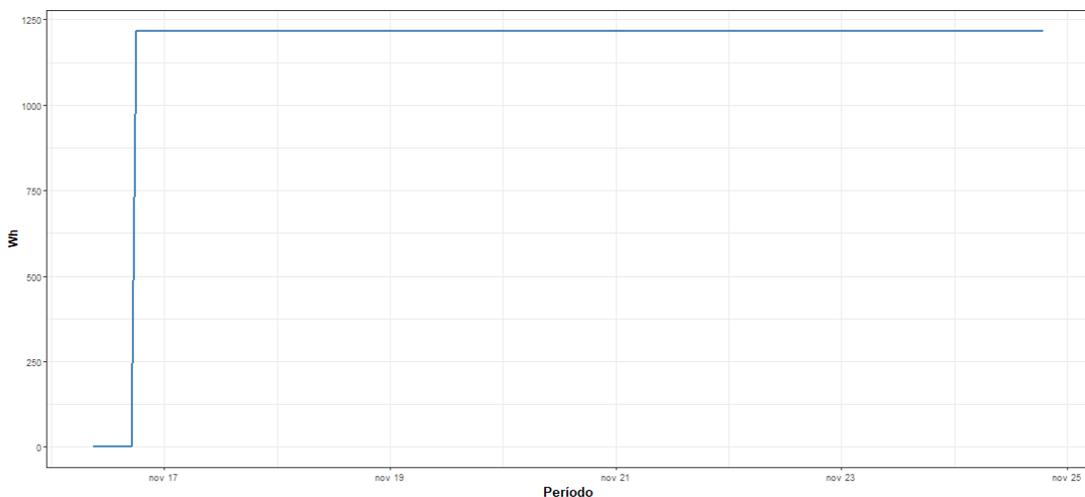


Figura 24 – Gráfico de consumo elétrico na etapa 3.

Acerca da qualidade da água, a Figura 25 apresenta um gráfico do comportamento da Oxigênio Dissolvido na terceira etapa, onde foi possível notar que o nível de OD manteve-se mais elevado nos períodos diurnos, com concentração acima de 5,5 mg/L, em horários noturnos variou entre 3 mg/L e 4,5 mg/L. A concentração média de OD foi registrada em 4,63 mg/L e o desvio padrão foi de 1,29 mg/L. Na terceira etapa observou-se uma queda na média de concentração de oxigênio dissolvido, mantendo-se ainda adequada para sustentar a vida aquática. Salienta-se que na terceira etapa, os peixes presentes no viveiro já estavam em fase juvenil de crescimento, conseqüentemente aumentando o consumo de oxigênio da água, deve-se considerar que a influência de fatores externos como a incidência de fortes chuvas afetou a capacidade de fotossíntese das algas presentes no viveiro, desta forma, impactando negativamente na produção natural de oxigênio dissolvido na água. Houve uma elevada utilização do sistema de aeração em momentos desnecessários, o que resultando em custos ainda maiores de energia elétrica, um maior incremento nas horas de uso do motor, reduzindo a vida útil do motor e o intervalo de sua manutenção. A avaliação de eficiência energética do sistema de aeração será realizada adiante, comparando-se os resultados desta estratégia tradicional de aeração com o sistema em modo de operação autônomo.

Fonte: Autoria própria, 2023

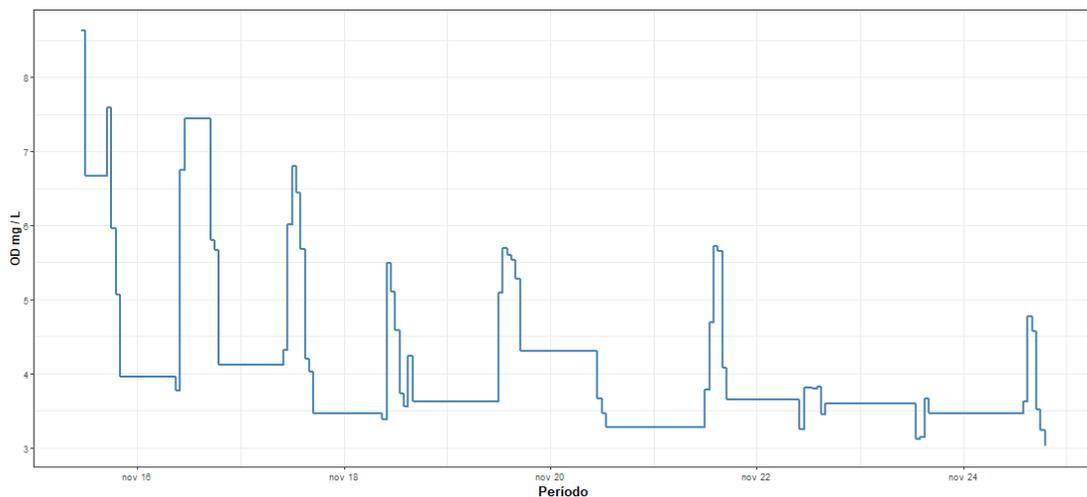


Figura 25 – Gráfico de comportamento do OD na etapa 3.

5.3.4 Etapa 4: Operação autônoma do aerador pelo sistema *IoT* de eficiência energética

Na quarta etapa, realizou-se a operação do sistema em modo autônomo, utilizando-se das leituras da sonda de oxigênio dissolvido na água, para tomada de decisão em tempo real. A quarta etapa também teve duração 10 dias corridos. Consolidou-se no Quadro 6 os dados obtidos na quarta e última etapa de testes. Importante ressaltar que devido à tomada de decisão de acionamento do aerador ter sido realizada com base nos dados de OD, a potência do motor do aerador foi variável ao longo desta etapa. O percentual médio de uso do motor foi mensurado em apenas 38%, onde calculou-se que o tempo de uso do motor foi de aproximadamente 88 horas, demonstrando a utilização do sistema de maneira mais contida. Durante esta etapa o consumo elétrico acumulado pelo sistema foi medido em 106,46 kW.

Quadro 6 – Resultados da etapa 4.

Métrica	Valor
Consumo elétrico acumulado	106,46 kW
Custo com energia elétrica	R\$ 75,58
Média de Oxigênio Dissolvido	5,22 mg/L
Desvio Padrão de Oxigênio Dissolvido	1,55 mg/L
Percentual médio uso do motor	36%
Horas de uso do motor	88 h

Fonte: Autoria própria, 2023

Com base no consumo elétrico medido (Figura 26), pode-se calcular o custo de energia elétrica despendido na quarta etapa. Levando-se em consideração o custo do kWh praticado em Pernambuco para o consumidor de baixa tensão é de R\$ 0,71, o custo elétrico resultante dessa etapa foi de apenas R\$ 75,58.

Tratando-se de qualidade da água, a Figura 27 apresenta um gráfico do comportamento da Oxigênio Dissolvido na última etapa, onde pôde-se observar que nível de OD naturalmente manteve-se mais elevado nos períodos diurnos, com concentração acima de 5 mg/L, em horários noturnos variou entre 3 mg/L e 4,5 mg/L. A concentração média de OD foi registrada em 5,22 mg/L e o desvio padrão foi de 1,55 mg/L. A população

Fonte: Autoria própria, 2023

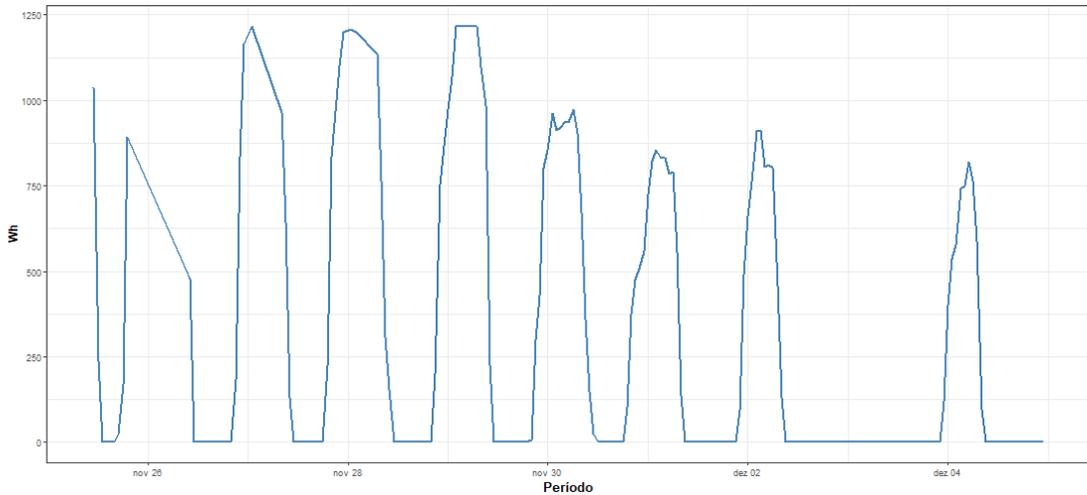


Figura 26 – Gráfico de consumo elétrico na etapa 4.

de peixes no viveiro já encontrava-se em fase de juvenil, elevando a demanda de oxigênio dissolvido. Com o gerenciamento inteligente de OD, manteve-se nesta última etapa a concentração de oxigenação dissolvido adequada para sustentar a vida aquática, com uma baixa utilização do sistema de aeração, resultando em um custo menor com energia elétrica, conseqüentemente, houve um redução nas horas de uso do motor, possibilitando aumentar o intervalo de manutenção do motor. Para avaliar a eficiência energética do sistema *IoT* de eficiência energética para aeração, comparou-se na seção a seguir os resultados da estratégia tradicional de aeração em comparação ao sistema em modo autônomo.

Fonte: Autoria própria, 2023

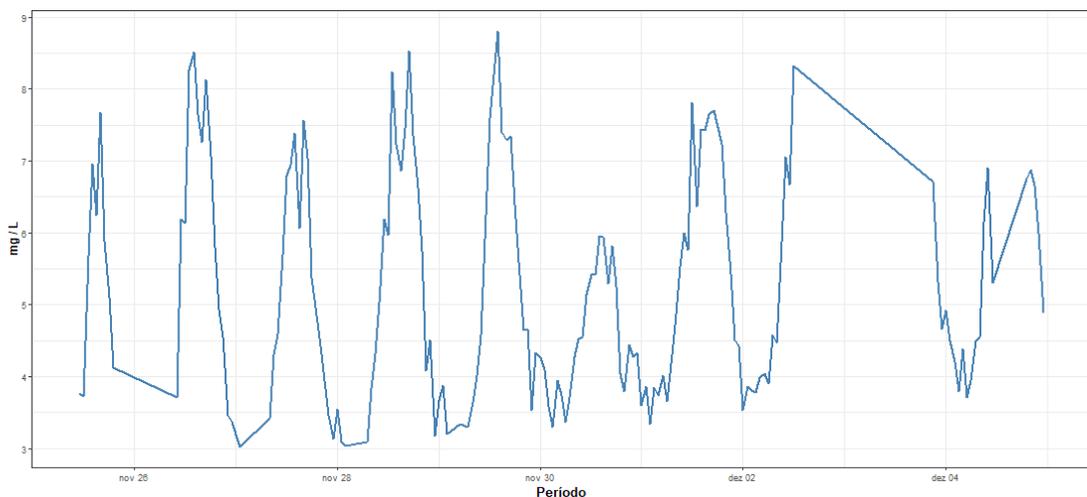


Figura 27 – Gráfico de comportamento do OD na etapa 4.

5.3.5 Análise comparativa

Procedeu-se para uma análise comparativa sobre as quatro etapas experimentais realizadas nesta pesquisa. Comparando-se as estratégias tradicionais de aeração com o sistema *IoT* de eficiência energética para a aeração. A fim de facilitar a compreensão dos resultados, consolidou-se no quadro 9 todos os valores obtidos em cada etapa.

Procedeu-se para uma análise comparativa abrangente das quatro etapas experimentais realizadas nesta pesquisa, que envolveu a comparação das estratégias tradicionais de aeração com o sistema de eficiência energética para aeração baseado em *IoT*. Buscou-se avaliar a eficácia do sistema *IoT* em relação às práticas convencionais de aeração. Para tornar os resultados mais acessíveis e compreensíveis, todos os valores obtidos em cada etapa foram consolidados e apresentados no Quadro 7. Este procedimento foi adotado com o propósito de oferecer uma visão integral das conclusões alcançadas ao longo das diferentes fases do experimento, contribuindo assim para uma análise mais completa e esclarecedora dos dados coletados. Essa abordagem visa fornecer informações valiosas sobre a eficiência energética e os benefícios potenciais do sistema *IoT* proposto nesta pesquisa em comparação com as práticas convencionais de aeração.

Quadro 7 – Comparativo das 4 etapas.

Métrica	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Modo de funcionamento	Manual	Manual	Manual	Autônomo
Horas de uso do motor por dia	12 h	18 h	24 h	variável
Horas de uso do motor por etapa	120 h	156 h	208 h	88 h
Consumo de energia elétrica	138 kW	188 kW	253 kW	106 kW
Custo com energia elétrica	R\$ 97,98	R\$ 134,07	R\$ 179,63	R\$ 75,58

Concentração média de Oxigênio Dissolvido	5,37 mg/L	5,38 mg/L	4,63 mg/L	5,22 mg/L
Desvio padrão de Oxigênio Dissolvido	1,67 mg/L	1,74 mg/L	1,29 mg/L	1,55 mg/L
Percentual de uso médio do aerador	52%	65%	100%	36%
Ganho de eficiência energética	23%	44%	58%	n/a

Fonte: Autoria própria, 2023

Avaliando-se a utilização do motor do aerador, constatou-se no gráfico comparativo (Figura 28) a utilização média de 52% na etapa 1, com 12 horas diárias de utilização durante 10 dias. Com a utilização de 18 horas diárias, na etapa 2, houve um aumento de 13% de utilização do motor do aerador em relação à etapa anterior, resultando em uma média 65% de uso nesta etapa. Na etapa 3, com utilização do motor em 100% por 24 horas diárias, durante 10 dias, registrou-se um aumento de 48% e 35% em relação à etapa 1 e 2, respectivamente. Na etapa de utilização do sistema *IoT*, registrou-se a utilização média do motor em 56%, reduções de 16% e 29% em relação à primeira e segunda etapa de testes, respectivamente. Destacando-se uma elevada redução de 64% em relação à etapa 3, em que houve a maior utilização do sistema de aeração.

Realizou-se uma avaliação acerca do consumo de energia elétrica relativa às 4 etapas do experimento, onde pôde-se verificar no gráfico comparativo (Figura 29) o consumo crescente entre as etapas 1 e 3, e respectiva diminuição na etapa em que houve uso do sistema *IoT*. Registrou-se um aumento de 50,52 kWh entre as etapas de operação manual de 12 e 18 horas por dia. Entre as etapas de operação manual de 18 e 24 horas, observou-se

Fonte: Autoria própria, 2023

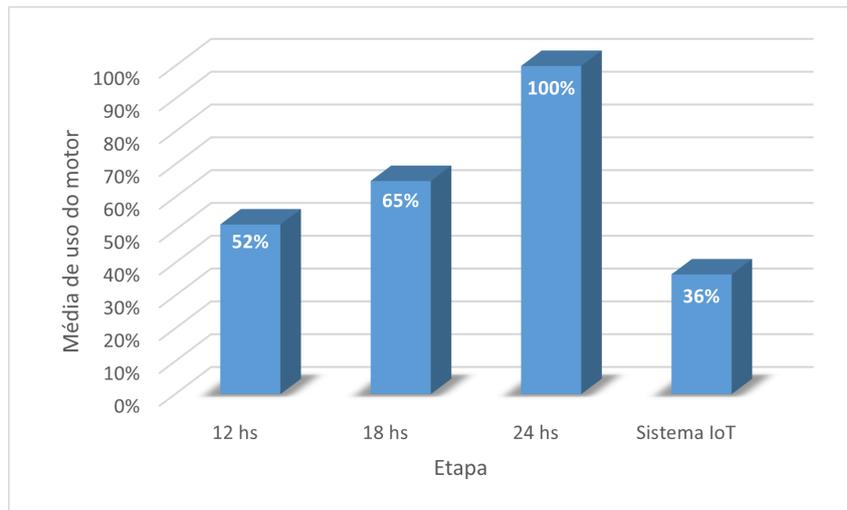


Figura 28 – Gráfico comparativo da utilização média do motor do aerador.

um aumento de 64,16 kWh. Comparando-se a utilização do sistema *IoT* com a etapa 1, constatou-se uma redução de 31,86 kWh. Em comparação com a etapa 2 de testes, houve uma diminuição 82,38 kWh. Por fim, comparando-se o a etapa 3 com a etapa 4, houve uma redução de 146,54 kWh, traduzindo-se em uma redução de cerca de 42% de energia elétrica.

Fonte: Autoria própria, 2023

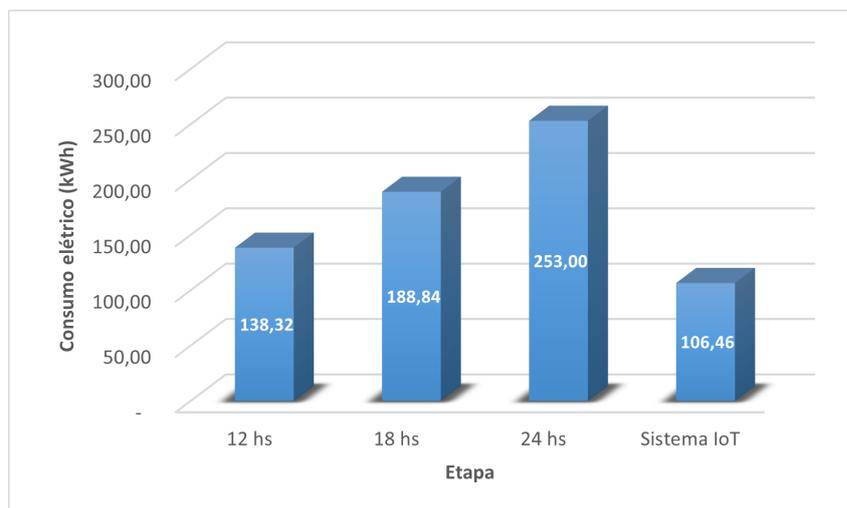


Figura 29 – Gráfico comparativo de consumo elétrico.

Acerca do custo com energia elétrica demandado por cada uma das quatro etapas do experimento, verifica-se no gráfico comparativo (Figura 30) que com o aumento do consumo de energia elétrica houve um movimento no mesmo sentido, observando-se um aumento entre as etapas 1 e 3, e uma diminuição em custos na etapa em que houve uso em

modo autônomo com o sistema *IoT*. Observou-se um aumento de R\$ 36,09 entre as etapas 1 e 2. Notou-se entre as etapas 2 e 3 um aumento de R\$ 45,56. Entre a etapa que utilizou o sistema *IoT* e a etapa 1 notou-se uma redução de R\$ 22,40. Em comparação com a etapa 2 de testes, houve uma diminuição de R\$ 58,49. Comparando-se o a etapa 3 com a etapa em que se utilizou o sistema *IoT*, houve uma redução de R\$ 104,45, ressaltando-se que nesta última comparação houve uma redução de cerca de 58% com custos de energia elétrica.

Fonte: Autoria própria, 2023



Figura 30 – Gráfico comparativo de custo com energia elétrica.

Registrou-se a média da concentração de oxigênio dissolvido por etapa, nota-se no gráfico comparativo (Figura 31) que a primeira e segunda etapa registraram médias semelhantes, ressaltando-se que mesmo com uma maior utilização do aerador nesta segunda etapa de 18 hs, não se observou um aumento expressivo na concentração média de OD, ou seja, houve um maior consumo de energia elétrica e maior custo com a produção desnecessariamente. Comparando-se a concentração média de OD das etapas 1 e 2 com a etapa 3, observou-se uma diminuição de 0,75 mg/L. Ressaltando-se que na etapa 3 a população de peixes evoluiu para fase juvenil, demandando maior concentração de oxigênio dissolvido para manutenção da vida aquática, outro fator responsável foi a incidência de fortes chuvas, que afetaram negativamente a produção de OD no viveiro nesta etapa. O sistema *IoT* foi capaz de manter uma oxigenação média de 5,22 mg/L com uma redução de energia elétrica de até 42% em comparação à etapa 4, observa-se que na etapa 4 não houve a incidência de chuvas como fator adverso à produção de OD. Conclui-se que é

possível manter a oxigenação do tanque em limiares acima de 5 mg/L, com uma utilização menor do sistema de aeração.

Fonte: Autoria própria, 2023

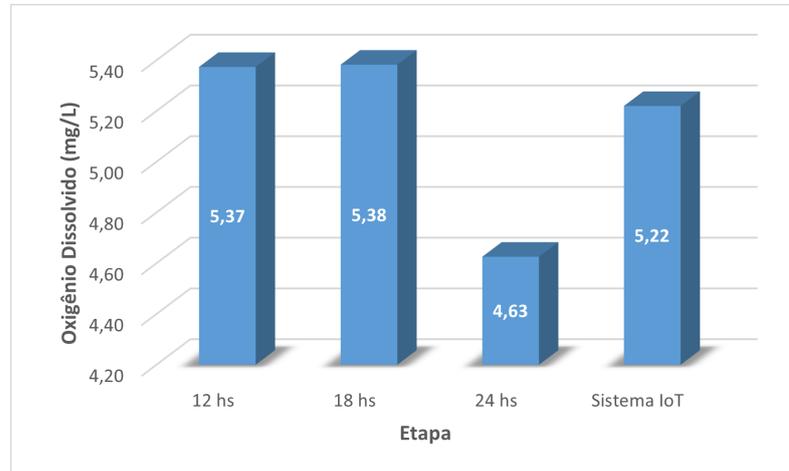


Figura 31 – Gráfico comparativo da concentração de OD média.

Analisando-se a eficiência energética do Sistema *IoT* em relação ao consumo elétrico observado nas 3 etapas de avaliação em que utilizou-se estratégias tradicionais de operação do sistema de operação, pôde-se notar no gráfico da Figura 32 que houve um ganho real de eficiência de 23% em relação à etapa 1. Observou-se um ganho de 44% em relação à etapa 2, destacando-se o ganho de 58% em relação à etapa 3. Desta forma, mostrou-se nítido que é possível alcançar uma eficiência energética de aproximadamente 60% em relação às estratégias tradicionais de utilização do sistema de aeração, traduzindo-se em economia para o produtor, otimização dos seus lucros e aumento de vida útil do sistema de aeração.

Fonte: Autoria própria, 2023

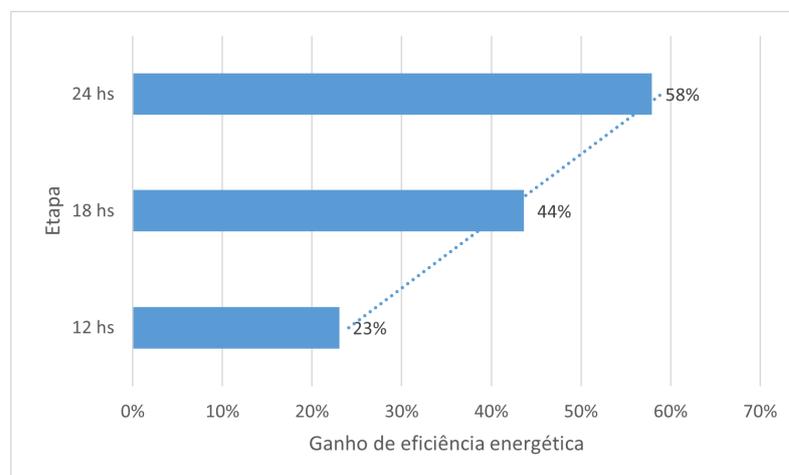


Figura 32 – Gráfico comparativo do ganho de eficiência energética.

5.3.6 Projeção de ciclo da tilápia de 112 dias

A Figura 33 apresenta uma projeção de consumo elétrico ao longo de um ciclo completo de produção da espécie de peixe tilápia do Nilo, com duração de 112 dias, para um único tanque de peixes, considerando apenas um aerador no viveiro. Ressalta-se que em um cenário real podem haver fatores externos capazes de influenciar na oxigenação do viveiro. Foram comparadas quatro modos de operação: o primeiro utilizando o aerador por 12 horas diárias, o segundo por 18 horas diárias, o terceiro por 24 horas diárias e o último utilizando o sistema *IoT* de eficiência energética. Considerando-se os resultados obtidos no experimento de 4 etapas com 10 dias de duração cada realizados anteriormente, dividiu-se estes por 10 e multiplicou-se por 112, a fim de se projetar as médias para 112 dias. Obteve-se os seguintes resultados: Modo de operação de 12 hs diárias resultou em 1549 kW; modo de operação de 18 hs resultou em 2115 kW; modo de operação com 24 hs diárias resultando em 2834 kW; Por fim, o modo de operação autônomo do sistema *IoT* resultando em 1192 kW.

Fonte: Autoria própria, 2023

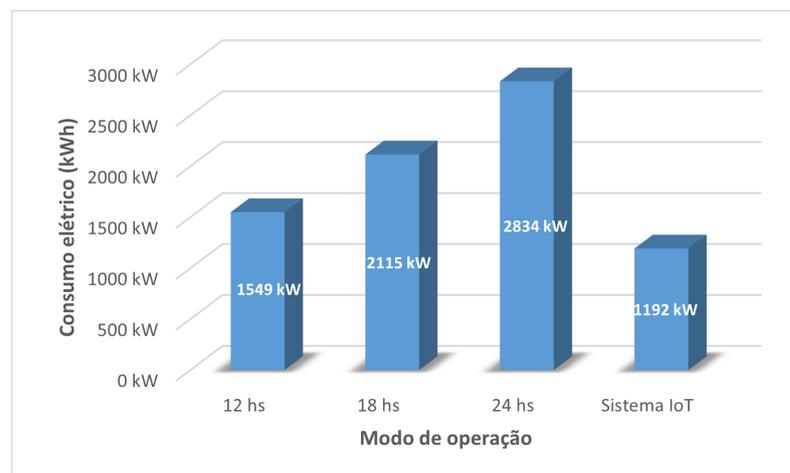


Figura 33 – Gráfico da projeção de consumo elétrico no ciclo da tilápia em 1 viveiro.

Ao comparar-se as quatro etapas de projeção, observou-se as diferenças no consumo de energia. Nota-se, entre as etapas de 12 horas e 18 horas, a diferença foi de 566 kW, representando cerca de 36,55% de variação. Da mesma forma, entre as etapas de 18 horas e 24 horas, a diferença foi de 719 kW, correspondendo a aproximadamente 34,02% de diferença. No entanto, o destaque principal ocorre na projeção do ciclo de 112 dias utilizando o sistema *IoT* de eficiência energética. Nesta etapa, o consumo elétrico acumulado foi de

apenas 1192 kW. Comparado às outras etapas, resulta-se em uma diferença de 357 kW a menos em relação à etapa de 12 horas, o que representa cerca de 23,07% de diferença, 923 kW a menos em relação à etapa de 18 horas, aproximadamente 43,63% de diferença, e 1642 kW a menos em relação à etapa de 24 horas, com uma diferença de aproximadamente 57,93%. Os resultados obtidos na projeção demonstram que a utilização do sistema *IoT* com modo autônomo de aeração é mais eficiente em termos de consumo de energia em comparação às estratégias de aeração tradicionais.

Tratando-se do custo com energia elétrica na projeção de 112 dias do ciclo da Tilápia para uma fazenda com apenas um viveiro e um aerador instalado, verifica-se no gráfico comparativo (Figura 34) que a curva crescente de custos entre os modos de operação de 12 hs diárias e 24 hs diárias, sendo observado uma diminuição na projeção considerando-se o modo autônomo do sistema *IoT*. A projeção foi realizada com base nos resultados obtidos foram no experimento de 4 etapas com 10 dias de duração cada. Obteve-se os seguintes resultados: Modo de operação de 12 hs diárias resultou em custo de R\$ 1093,75; modo de operação de 18 hs resultou em custo de R\$ 1493,20; modo de operação com 24 hs diárias resultou em R\$ 2000,49; Concluindo, o modo de operação autônomo do sistema *IoT* teve um resultado de custo estimado em R\$ 841,81.

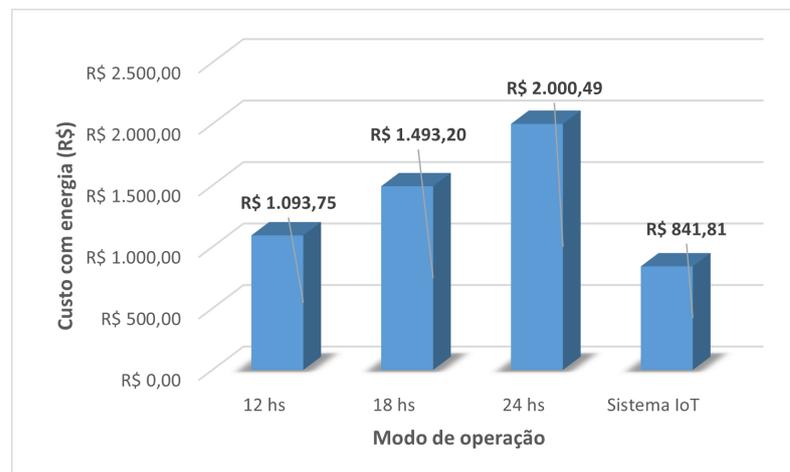


Figura 34 – Gráfico da projeção de custo de energia no ciclo da tilápia em 1 viveiro.

Fonte: Autoria própria, 2023

Nota-se que houve uma variação de R\$ 399,45 entre as etapas 1 e 2. Observou-se que entre as etapas de 18 hs e 24 hs houve um aumento de R\$ 507,29. Entre a etapa que utilizou-se o sistema *IoT* e a etapa 1 notou-se uma redução de R\$ 251,94. Em comparação com a etapa 2 de projeção, houve uma diminuição de R\$ 651,39. Comparando-se o a etapa

3 com a etapa em que projetou-se a utilização do sistema *IoT*, houve uma redução de R\$ 1.158,68, ressaltando-se que nesta última comparação houve uma redução de cerca de 58% com custos de energia elétrica por ciclo. Portanto, em uma projeção que apresenta utilizações por períodos mais longos, como o ciclo de 112 dias da tilápia, demonstra-se de maneira ainda mais evidente os recursos desperdiçados com energia elétrica e o quanto poderia ter sido reduzido tal recurso com a adoção de um sistema inteligente para a gestão da aeração. Cabe ressaltar que este é um tema de alta relevância, visto que os custos com energia elétrica têm sido a segunda maior dor do produtor, posicionando-se apenas abaixo do custo da ração para a alimentação da produção.

Para evidenciar uma cenário de maior dimensão, realizou-se a projeção dos custos para uma fazenda com 10 viveiros e um aerador instalado em cada viveiro, como visto na Figura 35. Como resultado da projeção, alcançou-se os seguintes resultados: Modo de operação de 12 hs diárias resultou em custo de R\$ 10.937,47; modo de operação de 18 hs resultou em custo de R\$ 14.932,02; modo de operação com 24 hs diárias resultou em R\$ 20.004,89; Em conclusão obteve-se o custo estimado em R\$ 8.418,10 para o modo de operação autônomo com o sistema *IoT* de eficiência energética. Portanto, com uma diferença de mais de R\$ 8400 em relação ao pior cenário de projeção, torna-se evidente a vantagem do sistema *IoT* em um único ciclo de 112 dias. Se forem realizados três ciclos em um ano, poderia se alcançar uma redução de custos com energia elétrica de mais de R\$ 25.000, além de outros benefícios como o aumento da vida útil do motor, redução no intervalo de manutenção do motor, etc.

Fonte: Autoria própria, 2023

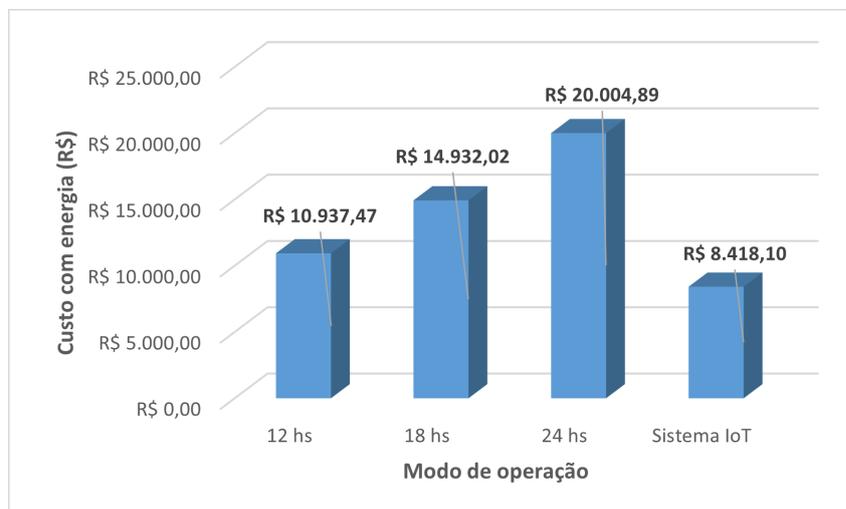


Figura 35 – Gráfico da projeção de custo de energia no ciclo da tilápia em 10 viveiros.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Nesta pesquisa, realizou-se um estudo abrangente sobre a aplicação de tecnologias digitais integradas e conectadas, em conjunto com sistemas inteligentes, para otimizar a aquicultura, caracterizando-a como Aquicultura 4.0. O foco principal da pesquisa concentrou-se na implementação de um sistema *IoT* como uma ferramenta para apoiar a eficiência energética de sistemas de aeração artificiais, dentro do contexto da Aquicultura 4.0, contribuindo assim para uma maior produtividade na produção do pequeno e médio produtor.

Para que os objetivos desta pesquisa fossem atingidos, realizou-se um estudo acerca dos principais conceitos de Internet das Coisas, associados aos cenários da Aquicultura 4.0, bem como, conceitos de comunicações através de redes sem fio. Levantou-se também informações acerca de trabalhos científicos existentes, associados ao contexto de eficiência energética e IoT, a fim de se demonstrar outras abordagens e soluções desenvolvidas.

6.1 Contribuições

Acerca das descobertas deste estudos, notou-se no estado da arte a baixa quantidade de soluções integradas para a gestão eficiente da aeração em aquicultura, considerando tanto a qualidade da água quanto a eficiência energética. Embora tenham sido encontradas diversas abordagens e tecnologias para otimizar a aeração de tanques e viveiros, nenhuma delas proporcionou uma solução única e completa que atendesse a todos os requisitos propostos. Portanto, uma das contribuições significativas deste trabalho é a proposta de um sistema *IoT* de eficiência energética projetado especificamente para a gerenciar os sistemas de aeração artificiais de maneira inteligente, apoiando-se em tecnologias inovadoras como a utilização de sonda de oxigênio dissolvido, inversor de frequência para controle de motores trifásicos de indução, redes sem fio integradas e *app* móvel.

A pesquisa demonstrou que o sistema desenvolvido foi capaz de alcançar uma eficiência energética de até 58% em relação às estratégias tradicionais de aeração. Bem como, uma redução na utilização do sistema de aeração em até 64%. Desta forma, representando um avanço significativo na redução dos custos associados à energia elétrica na aeração, ao mesmo tempo em que manteve-se a qualidade da água em níveis adequados

para a manutenção da vida aquática. Com a melhoria na eficiência energética não apenas reduz-se os custos operacionais, mas também diminui-se o impacto ambiental, tornando a aquicultura mais sustentável e alinhada com os princípios da Aquicultura 4.0.

Além da eficiência energética, o sistema proposto oferece recursos avançados de gestão e controle. Permitindo que os produtores monitorem e opcionalmente controlem a aeração de seus viveiros por meio de um aplicativo móvel ou *dashboard web*, tornando o gerenciamento mais acessível e conveniente.

Portanto, o desenvolvimento deste trabalho identificou a necessidade de uma solução integrada e eficiente para a gerenciar de maneira inteligente a aeração de tanques na Aquicultura 4.0. A proposta de um sistema *IoT* de eficiência energética não apenas atende a essa necessidade, mas também contribui significativamente para apoiar a sustentabilidade e produtividade do pequeno e médio produtor. Espera-se que este estudo incentive pesquisadores e produtores a explorar ainda mais o potencial da *IoT* na Aquicultura 4.0 e a desenvolver soluções inovadoras para os desafios que a indústria da pesca enfrenta. Acredita-se que o futuro da aquicultura está na interconexão da tecnologia digital e da gestão inteligente, sendo este trabalho um passo importante nesta direção.

6.2 Publicações geradas

Durante o curso deste trabalho, várias publicações significativas foram geradas, contribuindo para a disseminação do conhecimento e promovendo avanços nas áreas de Aquicultura 4.0, Internet das Coisas e eficiência energética na aeração de tanques e viveiros. A seguir, destacou-se as publicações decorrentes deste estudo:

1. **Eficiência Energética de Aeradores com apoio de *IoT* na Aquicultura 4.0: uma revisão sistemática da literatura**

Periódico: Brazilian Journal of Development (ISSN: 2525-8761)

Resumo: Esta publicação apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre eficiência energética em aeradores com suporte de *IoT* na Aquicultura 4.0. Analisa-se o estado da arte, identifica-se tendências e lacunas no conhecimento, e fornece uma

base sólida para futuras pesquisas na área.

2. **Publicação do artigo "Eficiência Energética de Aeradores com apoio de *IoT* na Aquicultura 4.0: uma revisão sistemática da literatura" em Capítulo do livro: Os impactos das tecnologias nas ciências exatas, Vol. 01**

Editora: Brazilian Journals

Descrição: Além da publicação em periódico, o artigo de revisão sistemática também foi incluído como um capítulo no livro "Os impactos das tecnologias nas ciências exatas, Vol. 01". Desta forma, ampliando-se ainda mais o alcance da pesquisa, tornando-a acessível a um público mais amplo de acadêmicos e profissionais.

3. **Aplicação do HCD Para Desenvolvimento de Uma Solução Digital de Apoio ao Pequeno Produtor Rural a Partir de Informações do Tempo e de Pragas**

Periódico: Gestão.ORG - Revista Eletrônica de Gestão Organizacional (ISSN: 1679-1827)

Resumo: Nesta publicação descreve-se a aplicação do Design Centrado no Humano (*HCD*) no desenvolvimento de uma solução digital destinada a apoiar os pequenos produtores rurais com base em informações climáticas e de pragas. Esta pesquisa exemplifica a aplicação prática de tecnologias digitais, aplicando conceitos de desenvolvimento de aplicações móveis para melhorar a produção do pequeno produtor rural.

4. **Energy Efficiency IoT System for Aeration in Aquaculture 4.0**

Conferência: IEEE 9th World Forum on Internet of Things (ISSN: 2576-3199)

Resumo: Publicação aceita para ser apresentada e posteriormente publicada nos

anais em um dos congressos de mais elevado nível de prestígio no contexto da *IoT*, o IEEE 9th World Forum on Internet of Things, com data de realização entre os dias 16 e 20 de outubro de 2023, na cidade de Aveiro, em Portugal. Neste artigo descreve-se o sistema *IoT* de eficiência energética desenvolvido neste trabalho, destacando seus resultados e contribuições para a Aquicultura 4.0. A participação em uma conferência IEEE ressalta a relevância e a qualidade da pesquisa realizada.

As publicações realizadas e aprovadas demonstram o impacto significativo do presente estudo no campo da Aquicultura 4.0, *IoT* e eficiência energética, bem como sua contribuição para o avanço do conhecimento científico e tecnológico nessas áreas. Espera-se que essas pesquisas continuem a inspirar futuros estudos e inovações que promovam a sustentabilidade e a produtividade no contexto da Aquicultura 4.0.

6.3 Trabalhos futuros

Embora esta pesquisa tenha alcançado resultados promissores, é importante reconhecer que a pesquisa na área de Aquicultura 4.0 e *IoT* ainda está em processo constante de evolução. Sabe-se que existem oportunidades para aprimorar ainda mais o sistema proposto, incluindo a implementação de melhorias em nível de hardware e software, capazes de tornar o sistema ainda mais eficiente. Dentre elas, citam-se as seguintes: Implementação de inversor de frequência com capacidade para comando de múltiplos motores, tratando-se de escalabilidade e permitindo-se comandar mais aeradores por viveiro; Instalação de um *display* no quadro de comando para exibição de dados em *real-time* do funcionamento do sistema de aeração; Implementação de algoritmos de aprendizagem de máquina e Inteligência Artificial para predição de estado de O.D, essa implementação permitirá que o sistema antecipe a utilização do aerador de forma mais precisa, garantindo uma curva de Oxigênio Dissolvido mais suave e estável. Através da IA, o sistema será capaz de analisar dados em tempo real da qualidade da água, identificar padrões e ajustar de forma automática o funcionamento do aerador.

Referências

- ARDUINO. **WHAT is Arduino?** 2018. Acessado em 20 de agosto de 2022. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>.
- BETTY - A ESCOLA DE TECNOLOGIA. **Arduino: Tudo sobre a Plataforma de Prototipagem.** 2021. Disponível em: <<https://blog.betrybe.com/tecnologia/arduino-tudo-sobre/>>.
- BLANCAFLOR, E.; BACCAY, M. Design of a solar powered iot (internet of things) remote water quality management system for a biofloc aquaculture technology. In: **2021 3rd Blockchain and Internet of Things Conference.** [S.l.: s.n.], 2021. p. 24–31.
- BOYD, C. E.; MCNEVIN, A. A. Aerator energy use in shrimp farming and means for improvement. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 52, n. 1, p. 6–29, 2021.
- BRIZOLA, J.; FANTIN, N. Revisão da literatura e revisão sistemática da literatura. **Revista de Educação do Vale do Arinos-RELVA**, v. 3, n. 2, 2016.
- CAPELO, J.; RUIZ, E.; ASANZA, V.; TOSCANO-QUIROGA, T.; SÁNCHEZ-POZO, N. N.; LORENTE-LEYVA, L. L.; PELUFFO-ORDÓÑEZ, D. H. Raspberry pi-based iot for shrimp farms real-time remote monitoring with automated system. In: IEEE. **2021 International Conference on Applied Electronics (AE).** [S.l.], 2021. p. 1–4.
- CASTRO, M. **O Que É Um Microcontrolador?** 2020. Acessado em 20 de agosto de 2022. Disponível em: <<https://edu.ieee.org/br-ufcgras/o-que-e-um-microcontrolador>>.
- ESPRESSIF SYSTEMS. **About Espressif.** 2021. Disponível em: <<https://www.espressif.com/en/company/about-espressif>>.
- FERDIANSYAH, I.; PURWANTO, E.; SUDIHARTO, I.; SUNARNO, E.; NUGRAHA, S. D.; QUDSI, O. A.; SIMORANGKIR, I. T. Application of interleaved bidirectional converter on pond aerators with electricity sources from solar panels. In: IEEE. **2019 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS).** [S.l.], 2019. p. 107–111.
- FOLTZ, M. V. B. **Sistema de automação com monitoramento web voltado a piscicultura.** Trabalho de Conclusão de Curso, 2022.
- FREITAS, G. V. C. de. Eficiência energética em motor de indução trifásico através do uso de inversor de frequência pwm. 2013.
- HASAN, M. R. Performance and economic analysis of a standalone solar aeration system. In: IEEE. **2020 2nd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI).** [S.l.], 2020. p. 1–6.
- JAIN, R. **The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling.** New York: Wiley, 1991.

JAYANTHI, M.; BALASUBRAMANIAM, A. A. K.; SURYAPRAKASH, S.; VEERAPANDIAN, N.; RAVISANKAR, T.; VIJAYAN, K. K. Assessment of standard aeration efficiency of different aerators and its relation to the overall economics in shrimp culture. **Aquacultural Engineering**, v. 92, p. 102142, 2021.

JUNIOR, S. L. B. et al. Embasamento teórico para o projeto de um inversor de frequência. 2015.

KOTHA, H. D.; GUPTA, V. M. Iot application: a survey. **Int. J. Eng. Technol**, v. 7, n. 2.7, p. 891–896, 2018.

LIMA, K. E. N.; LAGE, E. G. S. Importância e aplicabilidade da norma abnt nbr 5410/2004 no quesito verificação final: segurança e confiabilidade do serviço. **Technology Sciences**, v. 1, n. 1, p. 1–6, 2019.

LUMINUS ELETRICIDADE. **O Que é Diferença de Potencial Elétrico?** 2022. Disponível em: <<https://www.luminuseletricidade.com.br/o-que-e-diferenca-de-potencial-eletrico>>.

MAGRANI, E. **A internet das coisas**. [S.l.]: Editora FGV, 2018.

MATTOS, P. D. C. Tipos de revisão de literatura. **UNESP**, São Paulo, v. 2, 2015.

Ministério de Minas e Energias. **Esclarecimento sobre reajustes na conta de luz em 2022**. 2021. Acessado em 30 de novembro de 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/esclarecimento-sobre-reajustes-na-conta-de-luz-em-2022>>.

NEOENERGIA.

tabela de tarifas de energia elétrica, 2022.

NS AUTOMAÇÃO. **Conversor 0-5/4-20mA**. 2018. Disponível em: <<https://www.nsautomacao.com/conversor-0-5-4-20ma>>.

NUNES, W. R. B. M.; LIMA, L. C. de; RODRIGUES, M. V. M. Proposta de gerador de sinal de telemetria padrão para aulas práticas de instrumentação industrial. 2014.

NUTER. **Aquicultura 4.0: benefícios da automação na produção aquícola**. 2021. Acessado em 1 de dezembro de 2021. Disponível em: <<https://nuter.com.br/aquicultura-4-0-beneficios-da-automacao-na-producao-aquicola>>.

OLIVEIRA, R. C. O panorama da aquicultura no brasil: a prática com foco na sustentabilidade. 2015.

Organização das Nações Unidas. **Acesso à eletricidade avança, mas desigualdade ainda é obstáculo para cumprir meta de energia para todos**. 2021. Acessado em 30 de novembro de 2021. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/130381-acesso-eletricidade-avanca-mas-desigualdade-ainda-e-obstaculo>>.

RAMLI, N. A.; HAMID, M. F. A. Analysis of energy efficiency and energy consumption costs: a case study for regional wastewater treatment plant in malaysia. **Journal of Water Reuse and Desalination**, v. 7, n. 1, p. 103–110, 2017.

RAMOS, A.; FARIA, P. M.; FARIA, Revisão sistemática de literatura: contributo para a inovação na investigação em ciências da educação. **Revista Diálogo Educacional**, v. 14, n. 41, p. 17–36, 2014.

RIBEIRO, H.; OLIVEIRA, P.; VIEIRA, M. Estudo comparativo de sistemas de aterramento para redes de baixa tensão. 2021.

ROY, S. M.; JAYRAJ, P.; MACHAVARAM, R.; PAREEK, C. M.; MAL, B. C. Diversified aeration facilities for effective aquaculture systems—a comprehensive review. **Aquaculture International**, p. 1–37, 2021.

SANSUY. **Aquicultura 4.0: o que é e como se adaptar às transformações?** 2020. Acessado em 1 de dezembro de 2021. Disponível em: <<https://blog.sansuy.com.br/aquicultura-4-0>>.

SANTOS, I. B. dos; SANDMANN, A.; SOUZA, B. E. de; SCHMIDT, C. A. P.; FILHO, P. L. de P.; MELGES, A. I.; MARCOLIN, J. F. Internet das coisas (iot) aplicada ao agronegócio: Projeto e implementação de um gateway de iot sobre a plataforma arduino para simplificar a automatização da aquicultura. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 11, p. 26631–26653, 2019.

SANTOS, M. V. et al. Monitoramento automático da qualidade de Água para pisciculturas. **Anais SULCOMP**, v. 8, 2016.

SANTOS, M. V. B. dos et al. Desenvolvimento de sistema automático de análise de ph e temperatura da Água para aquicultura. **Anais do Computer on the Beach**, p. 325–333, 2018.

SILVA, A. F. da. Procedimentos, normas e equipamentos para segurança em projetos elétricos residenciais. 2016.

SILVA, C. R.; PEREIRA, R. F. Vantagens da computação de borda em redes de dispositivos iot. 2021.

SILVA, V. D. da. Estimador de potência aparente utilizando sensor de corrente para aplicação residencial. 2014.

SNEHA, P. S.; RAKESH, V. S. Automatic monitoring and control of shrimp aquaculture and paddy field based on embedded system and iot. In: IEEE. **2017 International Conference on Inventive Computing and Informatics (ICICI)**. [S.l.], 2017. p. 1085–1089.

TORRE-UGARTE, M. C. D. la; TAKAHASHI, R. F.; BERTOLOZZI, M. R. Revisão sistemática: noções gerais. **Revista da Escola de Enfermagem da USP**, v. 45, n. 5, p. 1260–1266, 2011.

VIDA DE SILÍCIO. **ACS712: Medindo Corrente Elétrica Alternada e Contínua**. 2018. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/acs712-medindo-corrente-eletrica-alternada-continua/>>.

WAMBUA, D. M.; HOME, P. G.; RAUDE, J. M.; ONDIMU, S. Environmental and energy requirements for different production biomass of nile tilapia (*oreochromis niloticus*) in recirculating aquaculture systems (ras) in kenya. **Aquaculture and fisheries**, v. 6, n. 6, p. 593–600, 2021.

WEG. **Inversores de Frequência**. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automaç~ao-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequência/c/BR_WDC_IA_DRV_IVT>.

_____. **Motores Elétricos Trifásico - Baixa Tensão - Uso Geral W22**. Disponível em: <https://weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-Elétricos/Trifásico---Baixa-Tens~ao/Uso-Geral/W22/c/BR_MT_3PHASE_LV_W22>.

YUNFENG, L.; TIANPEI, Z. A design of dissolved oxygen monitoring system based on nb-iot. In: IEEE. **2019 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA)**. [S.l.], 2019. p. 98–101.