



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

HENRIQUE COSTA DE OLIVEIRA FONTES

**ACOMPANHAMENTO E COMPARAÇÃO DE SISTEMA MODULAR PARA
AQUAPONIA**

RECIFE
2023

HENRIQUE COSTA DE OLIVEIRA FONTES

**ACOMPANHAMENTO E COMPARAÇÃO DE SISTEMA MODULAR PARA
AQUAPONIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes

RECIFE
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Fontes, Henrique Costa de Oliveira .

Acompanhamento e comparação de sistema modular para aquaponia /
Henrique Costa de Oliveira Fontes. - Recife, 2023.

62 p. : il., tab.

Orientador(a): Felipe Pedro da Costa Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química -
Bacharelado, 2023.

1. sustentabilidade. 2. controle. 3. sistemas integrados. 4. inovação. 5.
agricultura sustentável. I. Gomes, Felipe Pedro da Costa. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

HENRIQUE COSTA DE OLIVEIRA FONTES

**ACOMPANHAMENTO E COMPARAÇÃO DE SISTEMA MODULAR PARA
AQUAPONIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Aprovado em: 04/10/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Andrelina Maria Pinheiro
Universidade Federal de Pernambuco

Dra. Naiana Santos Da Cruz Santana Neves
Universidade Federal de Pernambuco

DEDICATÓRIA

Àqueles que fizeram parte desta jornada e acreditaram em mim desde os primeiros passos, minha mais sincera gratidão; este trabalho é dedicado a vocês, com a esperança de que contribua para um mundo mais iluminado pelo conhecimento e pela dedicação. Este projeto era apenas um hobby – hoje, ele floresceu neste TCC.

RESUMO

Este estudo investigou a eficiência e o potencial dos sistemas aquapônicos como uma abordagem promissora para a produção sustentável de alimentos. Os sistemas aquapônicos demonstraram sua capacidade de otimizar o crescimento simultâneo de plantas e peixes, além de efetivamente gerenciar recursos hídricos e nutrientes, gerando zero descarte de efluentes. Foi enfatizada a importância da implementação de sistemas contínuos de controle e monitoramento para aprimorar o desempenho do sistema, reduzindo a necessidade de intervenção manual e maximizando a eficiência operacional. No entanto, um dos principais desafios identificados foi o custo energético associado a esses sistemas, o que pode ser um impedimento significativo para sua adoção em larga escala. Apesar das vantagens ambientais, o alto investimento inicial ainda pode ser um obstáculo para atrair investidores e despertar o interesse do mercado. Diante do exposto, verifica-se a importância de intensificar pesquisas na busca de estratégias inovadoras que tornem a aquaponia economicamente viável. Além disso, a aquaponia pode ser particularmente valiosa em regiões com condições climáticas extremas e escassez de água. Sua capacidade de maximizar o uso de recursos limitados, a torna uma alternativa relevante em contextos onde a agricultura tradicional pode ser inviável. Este estudo destaca a aquaponia como uma opção relevante para a produção de alimentos, sublinhando a necessidade de superar desafios econômicos e explorar oportunidades de inovação e integração de sistemas. Como solução que une o cultivo de plantas e peixes, a aquaponia possui um potencial significativo para enfrentar os desafios futuros de escassez alimentar, especialmente em locais com recursos limitados.

Palavras-chave: sustentabilidade; controle; sistemas integrados; inovação; agricultura sustentável.

ABSTRACT

This study investigated the efficiency and potential of aquaponic systems as a promising approach to sustainable food production. Aquaponic systems have demonstrated their ability to optimize the simultaneous growth of plants and fish while effectively managing water resources and nutrients, resulting in zero effluent discharge. The importance of implementing continuous control and monitoring systems to enhance system performance, reduce the need for manual intervention, and maximize operational efficiency was emphasized. However, one of the main challenges identified was the energy cost associated with these systems, which can be a significant barrier to their widespread adoption. Despite the environmental advantages, the high initial investment can still hinder attracting investments and market interest. Therefore, it is essential to explore innovative strategies that make aquaponics economically viable. Additionally, aquaponics can be particularly valuable in regions with extreme climatic conditions and water scarcity. Its ability to maximize the use of limited resources makes it a relevant alternative in contexts where traditional agriculture may be unfeasible. In summary, this study highlights aquaponics as a relevant option for food production, underscoring the need to overcome economic challenges and explore opportunities for innovation and system integration. As a solution that combines the cultivation of plants and fish, aquaponics has significant potential to address future food scarcity challenges, especially in resource-limited areas.

Keywords: sustainability; control; integrated systems; innovation; sustainable agriculture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de Fazenda oceânica multitrófica.....	18
Figura 2 - Representação simplificada de sistema aquapônico.....	18
Figura 3 - Ciclo da nitrificação na aquaponia.....	19
Figura 4 - Plantas de Controle.....	22
Figura 5 - Tanque dos peixes com (A) vista frontal e (B) vista lateral.....	23
Figura 6 - Módulos de filtragem e cultivo.....	24
Figura 7 - Sistema Aquapônico.....	25
Fluxograma 1 - Fluxograma simplificado do Protótipo.....	26
Figura 8 - Sementes de cultivo selecionadas.....	28
Figura 9 - Exemplo dos testes de amônia tóxica e pH.....	30
Figura 10 - Alimentador automático.....	30
Figura 11 - Nutrientes.....	31
Figura 12 - Sistema de regulação do ambiente de cultivo através de (A) vista frontal e (B) vista lateral.....	32
Figura 13 - Diagrama de Tubulações e Instrumentação do Protótipo.....	34
Figura 14 - Gráfico da variação do volume de água diários.....	36
Figura 15 - Gráfico Variação do Consumo de Ração ao Longo dos Dias.....	38
Figura 16 - Gráfico distribuição de massa para as plantas colhidas.....	39
Figura 17 - Plantas Colhidas do Cultivo.....	40
Figura 18 - Plantas Colhidas do Aquário.....	40
Figura 19 - Evolução das plantas ao longo de 1, 9, 17, 26 e 42 dias, seguindo a ordem das imagens.....	41
Figura 20 - Evolução do acúmulo de lodo com 0, 1, 17, 26, 37 e 75 dias, seguindo a ordem das imagens.....	43
Figura 21 - Gráficos da contribuição para o custo operacional ao fim do experimento.....	45
Figura 22 - Gráficos do consumo de energia e horas de iluminação.....	46
Figura 23 - Gráficos do impacto de cada elemento consumidor de energia no consumo total..	46
Figura 24 - Gráficos do consumo de água para cada sistema ao longo do tempo.....	49
Figura 25 - Gráficos de barras do consumo total para cada sistema.....	50
Figura 26 - Gráficos de barras do custo total para cada sistema.....	51
Figura 27 - Gráficos das Temperaturas e Umidade do sistema.....	52
Figura 28 - Gráficos das vazões da bomba e sifão.....	54
Figura 29 - Gráficos da Variação de pH e amônia.....	55
Figura 30 - P&ID otimizado do processo.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de valores ótimos para condutividade elétrica (CE) e pH para variadas culturas hidropônicas.....	17
Tabela 2 - Parâmetros ideais para a água em sistemas aquapônicos produtivos de boa performance.....	20
Tabela 3 - Medidas do tanque dos peixes.....	23
Tabela 4 - Espécies de Peixes Seleccionadas e Suas Características.....	27
Tabela 5 - Espécies de Plantas Seleccionadas e Suas Características.....	29
Tabela 6 - Entradas e saídas de volume no sistema.....	37
Tabela 7 - Máximas e Mínimas de Temperatura e Umidade no sistema.....	53
Tabela 8 - Máximas e Mínimas das vazões no sistema.....	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS GERAIS	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 ESTADO DA ARTE	13
2.1 AQUICULTURA	13
2.2 HIDROPONIA	15
2.3 AQUAPONIA	17
2.4 ENGENHARIA DE PROCESSOS E DIAGRAMA P&ID	21
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 MATERIAIS E SISTEMA AQUAPÔNICO	22
3.1.1 Configuração do sistema aquapônico	22
3.1.2 Seleção de Espécies	26
3.1.3 Monitoramento da Qualidade da Água	29
3.1.4 Manutenção do Sistema	30
3.1.5 Controle de Variáveis Ambientais	31
4.1 DIAGRAMA P&ID DO PROCESSO	33
4.2 BALANÇOS DO SISTEMA	35
4.2.1 Balanço do Volume de Água	35
4.2.2 Taxa de Alimentação e Produtividade	37
4.2.3 Comparação com as Plantas De Controle	40
4.2.4 Análise Qualitativa do Lodo Gerado	42
4.2.5 Taxa de Mortalidade	44
4.3 CUSTO DE OPERAÇÃO E EFICIÊNCIA	44
4.3.1 Custo Energético	45
4.3.2 Custo com Testes, Ração e Nutrientes	47
4.3.3 Custo com Água	48
4.3.4 Análise Comparativa de Custos: Sistema Aquapônico vs. Aquário Convencional	50
4.4 CONDIÇÕES DE CULTIVO E ACOMPANHAMENTO DO SISTEMA	51
4.4.1 Temperatura e Umidade no Sistema	52
4.4.2 Vazão da Bomba e Sistema de Sifão	53
4.4.3 pH e Níveis de Amônia	54
4.5 OTIMIZAÇÃO DO FLUXO, POSSÍVEIS MELHORIAS E CONTROLE	56
5 CONCLUSÃO	59

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural, essencial para a vida, encontrado em abundância no planeta. Apesar disso, inúmeras regiões no mundo estão enfrentando dificuldades com sua escassez, o que afeta variadas atividades humanas. Isso mostra que o balanço entre a demanda e a disponibilidade deste recurso está atingindo um ponto crítico. O efeito do aquecimento global também é preponderante neste cenário, as mudanças climáticas estão tornando fenômenos climáticos extremos cada vez mais comuns e, por consequência, interferindo no ciclo da água (MANCOSU, 2015).

O crescimento da população mundial, que no presente atingiu cerca de 8 bilhões de habitantes (“Worldometer - Estatísticas mundiais em tempo real”, [s.d.]), com projeções de alcançar 9,15 bilhões até 2050. Com isso, pode-se afirmar que em um futuro próximo existe grande expectativa de aumento para a demanda por alimentos e, respectivamente, por água, tanto para a irrigação de culturas como para uso em diversas aplicações industriais (ALEXANDRATOS, 2012).

A contaminação de corpos hídricos e do solo também é problemática no contexto da produção agrícola. O uso excessivo de nutrientes, sais e pesticidas, bem como sedimentos formados pela erosão do solo, acabam escoados para os corpos hídricos, desequilibrando os ecossistemas aquáticos. O que se torna um problema difícil de reverter, podendo afetar diretamente a qualidade da água para consumo humano, visto que o tratamento para remover nitratos e pesticidas é custoso e muitas vezes pouco efetivo (COUNCIL, 1993).

Este conjunto de fatores atuam como provocação para o aprimoramento das técnicas agropecuárias e pela busca de novas soluções para alimentar a população crescente. Com o propósito de diminuir os impactos antrópicos na natureza, como o desperdício e poluição das águas superficiais e subterrâneas, a degradação dos solos, o desmatamento, a geração excessiva de resíduos e as mudanças climáticas (ANTONIOELLI, 2019).

Dentre as soluções que vêm ganhando destaque recentemente está a aquaponia, que faz ligação entre a aquicultura e técnicas de cultivo hidropônico, representando um método promissor para a produção sustentável de alimentos. São

sistemas multitróficos integrados, no qual recursos utilizados por uma espécie são reciclados para promover recursos para outras. É um processo encontrado naturalmente em lagos, lagoas e rios, já conhecido e utilizado pelo homem desde os tempos antigos, em que o rejeito dos animais aquáticos transforma-se em fertilizante para as lavouras. A principal característica desse tipo de produção é o desenvolvimento de sistemas que fecham os ciclos de nutrientes, muitas vezes imitando os ecossistemas naturais (GODDEK et al., 2015).

Na aquicultura convencional, é comum que sejam feitas trocas de água regularmente para manter baixos os níveis de substâncias tóxicas como a amônia e os nitritos, procedimento que não se faz necessário na aquaponia. Como fator de comparação, a produção de 1 kg de peixes criados em sistemas de aquicultura semi-intensiva e extensiva requer uma faixa de 2,5 a 375 mil litros. Já no cultivo aquapônico, que possui alto grau de reciclo de água, entre 95 e 99%, é possível reduzir essa faixa para menos de 100 L·Kg⁻¹ de peixe produzido e ainda cultivar vegetais. Quando comparado com a hidroponia, pode-se afirmar que economiza-se com macro e micro nutrientes provenientes, de outra maneira, da indústria e da mineração. Além de evitar que a água rica em nutrientes seja descartada, aumentando o consumo de água e a contaminação do ambiente (GODDEK et al., 2015).

Atualmente, um dos grandes impeditivos para o uso mais amplo desse tipo de sistemas, é o alto custo inicial de investimento, e de operação, principalmente com eletricidade para iluminação das plantas e aquecimento, especialmente em climas frios. Diante desse contexto, devem-se buscar oportunidades para integração de processos que levem a modelos mais eficientes do ponto de vista energético (ONDRUŠKA et al., 2022).

1.1 OBJETIVOS GERAIS

A metodologia adotada neste estudo consiste em avaliar os principais aspectos de variabilidade de um sistema aquapônico a partir do estudo de um protótipo e propor um projeto de uma unidade instrumentada.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- **Identificação das Etapas do Sistema Modular:** Serão identificadas as etapas do sistema modular, delineando os fluxos de cada processo por meio de um fluxograma.
- **Desenvolvimento de Diagramas P&ID:** Serão desenvolvidos diagramas P&ID que apresentam os fluxos de materiais e a instrumentação necessária para o controle efetivo da planta.
- **Realização de Balanços:** Além disso, serão realizados balanços de massa e energia para cada um dos módulos, a fim de avaliar seu desempenho e eficiência.

2 ESTADO DA ARTE

O presente trabalho aborda conceitos fundamentais de aquicultura e hidroponia, assim como engenharia de processos, visando explorar suas interações e sinergias para o desenvolvimento de um sistema integrado e eficiente. Buscaremos compreender cada um desses temas em seus contextos atuais e, posteriormente, explorar suas complementaridades para alcançar um sistema otimizado.

2.1 AQUICULTURA

A aquicultura possui uma longa história, com seu início datando aproximadamente 4000 anos atrás. Existem várias teorias de como esse tipo de cultivo haveria começado na sociedade humana, mas de maneira geral admite-se que a prática teve início na China, a partir do cultivo da carpa comum (*Cyprinus carpio*) (“History of aquaculture”, [s.d.]).

A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), entende como aquicultura a criação ou cultivo de organismos aquáticos, como: peixes, moluscos, crustáceos, algas e plantas aquáticas. É uma prática que envolve o desenvolvimento de organismos em água doce, salobra ou salgada, sob condições controladas, ou condições seminaturais. O processo pode ser conduzido em ambientes artificiais, como tanques, lagos ou canais, onde as condições de vida dos

animais são totalmente manipuladas pelo homem, principalmente os parâmetros da água, temperatura e alimentação. Como também, podem ocorrer no próprio meio ambiente, em corpos de água existentes na natureza, podendo ser em águas rasas ou profundas, com o auxílio de cercas, gaiolas flutuantes ou bolsas que contenham os organismos. Neste tipo de operação, os seres vivos ficam expostos às condições ambientais, tornando custoso e difícil de manter esses sistemas (FAO, 1988).

A qualidade da água é o fator mais importante dentro do contexto da aquicultura. Com isso, é de extrema relevância citar os parâmetros mínimos de qualidade da água para este tipo de cultivo, ressaltando que os limites de tolerância dos animais variam grandemente dependendo da espécie observada, especialmente quanto à temperatura e salinidade. Tirando esses dois fatores, tem-se como componentes mais significativos o oxigênio dissolvido (OD), pH, dióxido de carbono, amônia, nitritos, nitratos, sulfeto de hidrogênio e turbidez (PILLAY, 2008).

A exposição prolongada a baixos níveis de OD retarda o crescimento dos organismos, com o intervalo ideal acima de $5,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Para o pH, existe uma faixa ampla de tolerância, onde o ideal para a produção de peixes se encontra entre 6,5 e 9,0. Quando o pH encontra-se abaixo de 6,0, a taxa de crescimento de alguns animais pode ser prejudicada, onde o ponto de morte ácida é atingido em um pH de 4,0, e para altas taxas de alcalinidade o ponto de morte é de pH igual a 11,0 (PILLAY, 2008).

A concentração de CO_2 livre na água pode variar ligeiramente ao longo do dia devido ao metabolismo dos microrganismos, ficando geralmente entre zero e $10,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, porém concentrações de até $60,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ podem ser toleradas pelos peixes, caso o oxigênio dissolvido seja suficiente. No caso da amônia, excretada principalmente através das brânquias, quando em sua forma não ionizada é a forma de nitrogênio que apresenta maior toxicidade e perigo para os peixes, enquanto que o íon amônio não é tão tóxico. A concentração máxima de amônia tolerada é de $0,1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, com isso o ideal é que a taxa se encontre sempre abaixo desse valor. Não existem muitas informações sobre concentrações seguras de nitritos na água, mas o ideal é manter sua taxa abaixo de $0,1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Já para os nitratos, substância menos tóxica, a faixa ideal seria abaixo de $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. O sulfeto de hidrogênio (H_2S), que é

associado a decomposição de matéria orgânica, em qualquer valor mensurável é considerado prejudicial ao desenvolvimento dos peixes (PILLAY, 2008).

Por último, a turbidez em geral não afeta o desenvolvimento dos animais, mas pode prejudicar os organismos fotossintetizantes na coluna d'água ao bloquear a passagem da luz. Quando a turbidez é ocasionada por excesso de plânctons, geralmente não ocasiona impactos diretos no bem estar dos peixes, mas quando causada por partículas suspensas como na presença de argila em água, pode ocorrer extensa taxa de mortalidade em concentrações superiores a $175 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (PILLAY, 2008).

Dessa maneira, manter altos padrões de qualidade da água para os organismos aquáticos é uma árdua tarefa. Em geral, para manter os parâmetros controlados, são feitas trocas parciais da água, onde o efluente é descartado e água limpa é adicionada ao sistema. As legislações quanto ao tratamento desse resíduo variam muito dependendo da localidade, mas como via de regra, tendem a não incentivar os produtores a realizar o tratamento adequado desses efluentes. Para fatores de comparação, a quantidade de efluente gerado pela aquicultura no Japão, em 1999, para a produção de 63 mil toneladas de peixe, foi equivalente ao resíduo gerado por 5 milhões de pessoas (DAUDA et al., 2019).

No Brasil, as leis quanto ao tratamento de efluentes da aquicultura e mitigação de suas consequências no ambiente ainda precisam ser aprimoradas. Na maioria dos casos, compostos contendo nitrogênio e fósforo, provenientes dos restos de alimentos e fezes dos animais, são responsáveis pela eutrofização de corpos hídricos ao promover alto crescimento de algas. Outros riscos associados à piscicultura, são a contribuição para o aumento de microrganismos potencialmente patogênicos na área e o uso de químicos na forma de sais, usados para reduzir o estresse dos peixes, que acabam escoados junto ao efluente gerado. Em muitos lugares, o tratamento do efluente para a eliminação de patógenos também não é regulamentado (MILLER; SEMMENS, 2002).

2.2 HIDROPONIA

No desenvolvimento das plantas, a água possui a função de carreadora dos nutrientes e reguladora da temperatura. Ela é responsável pelo transporte de sais

ionizados e açúcares, usados no crescimento e na manutenção do metabolismo vegetal. O cultivo hidropônico consiste em enriquecer a água com esses elementos essenciais e circular a solução nutritiva em um sistema fechado. A principal diferença entre o cultivo convencional e o hidropônico, é a ausência de solo, utilizando materiais alternativos como, por exemplo, argila expandida, fibra de coco, perlita, polímeros, esponjas, lã mineral, entre outros materiais, desde que os mesmos sirvam de suporte para o desenvolvimento das plantas e permitam o fluxo de oxigênio para as raízes (ROBERTO, 2003).

Dessa maneira, evita-se o contato do cultivo com doenças, fungos e pragas relacionadas ao solo, além de eliminar a necessidade do controle de ervas daninhas, práticas que geralmente fazem uso de pesticidas e herbicidas. Isso implica em reduções de custos com pessoal, tempo e insumos, utilizados anteriormente no controle de pragas e preparação do solo. As plantas cultivadas hidroponicamente, tendem a ser mais saudáveis que suas contrapartes criadas em solo, isto se deve ao fato delas receberem uma nutrição balanceada e de forma constante. Por isso, não precisam gastar energia buscando por nutrientes e umidade na terra através da expansão de suas raízes. Então, as raízes costumam ser muito menores nesses sistemas, e os vegetais tendem a direcionar esforços exclusivamente em desenvolver mais folhas e frutos. (ROBERTO, 2003).

Os nutrientes aplicados na hidroponia estão na forma de sais, que quando misturados na água dividem-se em íons. Esses íons tornam a solução capaz de conduzir eletricidade, no qual a adição de mais íons implica em aumentos da condutividade elétrica (CE). Com isso, a mesma pode ser usada como um bom indicador da concentração de sais na solução. O excesso de nutrientes induz estresse osmótico, toxicidade e desequilíbrio na absorção dos íons, enquanto que baixos valores geralmente são acompanhados de deficiência de nutrientes e baixo crescimento (BRUCE; SINGH, 2016).

O potencial hidrogeniônico (pH), influencia diretamente na disponibilidade de nutrientes em solução, por isso é muito importante que o mesmo esteja sempre em uma faixa ótima. Para o cultivo sem solo, o pH da solução deve ser levemente ácido, em que o ideal é manter o ambiente para as raízes dentro do intervalo de 6,0 a 6,5,

que é a faixa de pH em que os nutrientes estão mais disponíveis para absorção (BRUCE; SINGH, 2016).

Tabela 1 - Faixa de valores ótimos para condutividade elétrica (CE) e pH para variadas culturas hidropônicas.

Colheita	CE (mS/cm)	pH
Manjeriçã	1,0 - 1,6	5,5 - 6,0
Feijão	2,0 - 4,0	6,0
Banana	1,8 - 2,2	5,5 - 6,5
Brócolis	2,8 - 3,5	6,0 - 6,8
Alface	1,2 - 1,8	6,0 - 7,0
Pimenta	0,8 - 1,8	5,5 - 6,0
Tomate	2,0 - 4,0	6,0 - 6,5
Morango	1,8 - 2,2	6,0

Fontes: BRUCE (2016)

Existem diversas técnicas usadas em cultivos hidropônicos, as plantas podem ser cultivadas em canais a partir de uma fina película da solução nutritiva fluindo pelas raízes, em baldes contendo mídias biológicas, em placas flutuantes dispostas sobre a água, em sistemas aeropônicos, nos quais a solução é borrifada nas raízes que permanecem suspensas no ar, e muitos outros. Em todos os casos, o princípio é basicamente o mesmo, manter altos níveis de oxigenação nas raízes e banhá-las na solução nutritiva preparada.

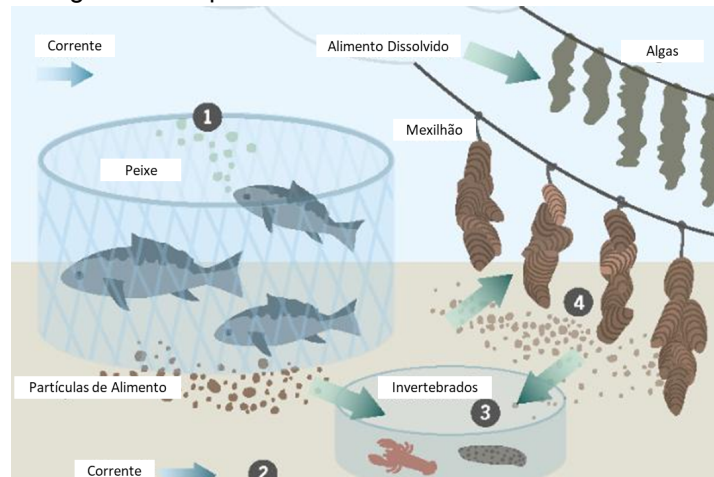
2.3 AQUAPONIA

A aquaponia é a união da aquicultura com a hidroponia e atua por meio da sinergia entre os dois processos, formando um ciclo fechado para a circulação de nutrientes. Dessa maneira, não é necessário adicionar nutrição regular, como no cultivo hidropônico e não são gerados grandes volumes de efluentes como na aquicultura.

Existem diversos modelos de sistemas multitróficos que compartilham os mesmos princípios da aquaponia, os quais não se contém apenas a ambientes fechados e controlados. Um bom exemplo, é a associação da piscicultura no mar com o cultivo de algas e plantas marinhas ao redor das gaiolas, prática que reduz de maneira significativa a carga orgânica liberada pelos peixes no oceano à medida que os organismos fotossintetizantes usam o rejeito dos animais como matéria prima

para seu desenvolvimento. Na Figura 1, expõe-se um exemplo de fazenda oceânica sustentável. O mesmo pode ser alcançado em rios e lagos, onde a criação de peixes em gaiolas flutuantes pode ser associada a outras culturas aquáticas.

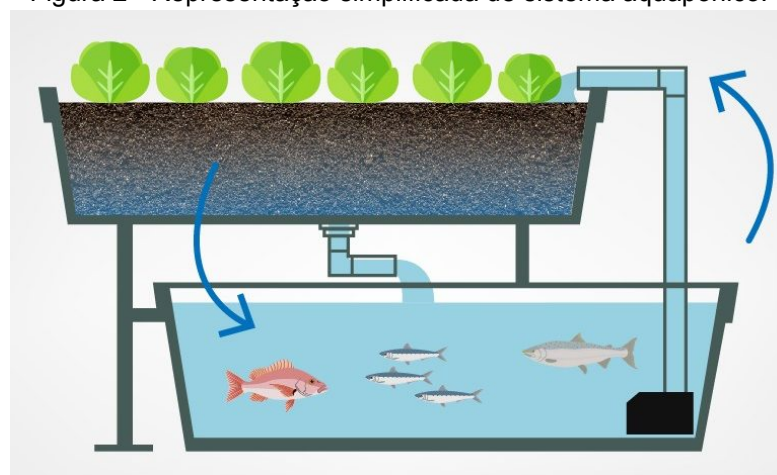
Figura 1 - Esquema de Fazenda oceânica multitrófica.



Fonte: Traduzida Heinrich Böll Stiftung, 2017

Em ambientes fechados como estufas e fazendas verticais, as possibilidades são ainda mais amplas, podendo-se observar inúmeros conjuntos de técnicas de aquicultura, hidroponia e tratamento de efluentes misturadas, dando forma aos mais variados sistemas. A Figura 2, mostra um esquema de cultivo aquapônico simples de pequena escala.

Figura 2 - Representação simplificada de sistema aquapônico.

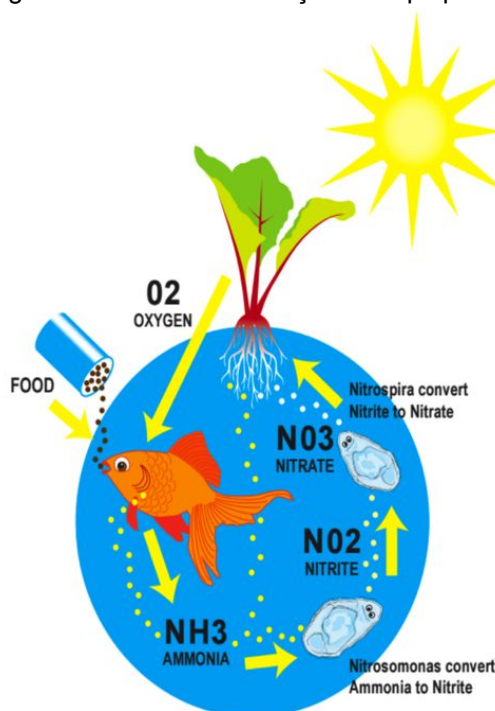


Fonte: Aquaponics Monitor Update (2019)

Nos ecossistemas aquáticos, bactérias que ocorrem naturalmente trabalham convertendo a amônia em formas menos tóxicas, posteriormente usadas por algas e plantas em seu crescimento. A melhor maneira de atingir altas taxas de conversão de amônia em ambientes artificiais é fornecer uma grande área de superfície para

que as bactérias autotróficas cresçam, formando biofiltros. Nesse caso, o rejeito orgânico dissolvido, composto principalmente por compostos nitrogenados, é tratado nos biofiltros. (MILLER; SEMMENS, [s.d.]). O processo que ocorre nestes filtros é conhecido como nitrificação e ocorre em duas etapas. Primeiramente, a amônia e seu íon, amônio, são convertidos em nitritos (NO_2) pelas bactérias *Nitrosomonas*, em um processo que consome reservas alcalinas e oxigênio, com produção de compostos ácidos, o que baixa o pH do meio. Em seguida, os nitritos são convertidos em nitratos (NO_3) pelas bactérias *Nitrobacter*, processo que também requer oxigênio e reduz o pH. Para que a nitrificação aconteça de maneira otimizada, a concentração de OD deve ser alta e a de matéria orgânica baixa (SALLENAVE, 2016). O nitrato é a principal forma de absorção de nitrogênio por parte das plantas, que o consomem, filtrando a água dos peixes, que por sua vez retorna ao tanque em condições adequadas. O ciclo da nitrificação na aquaponia está representado no esquema da Figura 3.

Figura 3 - Ciclo da nitrificação na aquaponia.



Fonte: Getting Started with Aquaponics: Cycling Your Fish Tank [Step by Step Guide] (2017)

As bactérias nitrificantes, atuam em seu máximo potencial em níveis de pH acima de 7,5 e caso encontrem-se a níveis abaixo de 6,0 vão perdendo sua funcionalidade. Assim, o desafio na aquaponia é encontrar o intervalo ótimo que atenda aos três tipos de organismos presentes no sistema - peixes, plantas e

bactérias. Como observado anteriormente, as plantas necessitam de um pH ácido para se desenvolver, enquanto que os peixes e bactérias toleram faixas mais amplas. Para que se obtenha um alto rendimento de todos os envolvidos, o pH ideal deve girar em torno de 6,8 a 7,0. Apesar disso, manter esse parâmetro dentro de uma faixa tão pequena requer ajustes em excesso, o que não é muito interessante. Por fim, desde que o pH esteja entre 6,4 e 7,4, o ambiente será tolerável para todos os componentes (SALLENAVE, 2016).

A temperatura é outro fator que influencia na performance do processo, impactando até na escolha das espécies adequadas. Peixes de água quente como robalo, peixe-japonês, bagres e tilápia preferem temperaturas entre 18 e 30°C, nos quais temperaturas abaixo de 20°C, podem ocasionar parada da reprodução, diminuição do crescimento e maiores riscos de doenças nos animais, enquanto espécies de clima frio como a truta prosperam em temperaturas entre 12 e 18°C. Vegetais crescem melhor, numa faixa de 20 a 24°C e os biofiltros atingem maior rendimento entre 25 a 30°C. De maneira análoga aos outros parâmetros, a chave para o sucesso é encontrar uma faixa que seja aceitável para os três componentes do sistema (SALLENAVE, 2016).

Tabela 2 - Parâmetros ideais para a água em sistemas aquapônicos produtivos de boa performance.

Temperatura	18 - 30 °C
pH	6,0 - 7,0
Amônia Total	<1.0 ppm
Nitrito (NO_2)	<1.0 ppm
Nitrato (NO_3)	5 - 150 ppm
DO	> 5 ppm

Fonte: SALLENAVE (2016)

Apesar do grande potencial da aquaponia, ainda existem pontos de melhoria e oportunidades de integração capazes de ser acopladas ao sistema. Artifícios como o cultivo de moscas-soldados-negras e algas para alimentar os peixes, o uso de biorreatores para geração de biogás, e a associação com energias limpas como solar e eólica, aumentam significativamente os retornos econômicos provenientes da operação (ONDRUŠKA et al., 2022). Nesta conjuntura, é de suma importância que o sistema continue evoluindo, de forma a torná-lo economicamente viável para operações comerciais, gerando lucros e atraindo mais investimentos para o setor.

2.4 ENGENHARIA DE PROCESSOS E DIAGRAMA P&ID

A engenharia de processos desempenha um papel crucial na concepção, desenvolvimento e otimização de processos industriais. Seu objetivo principal é transformar matérias-primas em produtos finais através de operações unitárias, visando a eficiência, segurança e sustentabilidade (HIMMELBLAU, 2017). Esse estudo multidisciplinar abrange aspectos como a seleção e dimensionamento de equipamentos, projeto de fluxo de processo, controle de qualidade e segurança operacional. A engenharia de processos é essencial em diversas indústrias, como a química, petroquímica, farmacêutica e de alimentos, contribuindo para o avanço tecnológico e econômico desses setores (SEIDER et al., 2017).

Na indústria de processos, para representar os instrumentos e fluxos escolhidos para uma determinada planta, utiliza-se o diagrama P&ID. Ele mostra a conexão física entre os equipamentos e a instrumentação usada no controle da operação, apontando os fluxos dos processos. Possui papel importante na manutenção e modificação do projeto que descreve, apresentando informações sobre tubulações e instrumentos, esquemas de controle e desligamento, além de requisitos regulatórios e de segurança. O conjunto padrão de símbolos usados para preparar o desenho do diagrama é baseado no Padrão S5 da Sociedade Internacional de Automação (ISA) (CORDEIRO, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o acompanhamento e controle do sistema protótipo, foi adotada uma abordagem de coleta de dados contínua, ao longo dos 70 dias do estudo. Foi utilizada uma planilha no *Google Sheets*, na qual foram registrados diariamente os parâmetros: quantidade de água e nutrientes adicionados no sistema, temperatura da água e do ar, umidade, valores de pH, concentração de amônia, número de animais e plantas, vazão da bomba, bem como quaisquer observações relevantes. Essa coleta de dados foi realizada com o objetivo de extrair informações sobre o funcionamento do sistema ao longo do tempo, permitindo a análise estatística e o controle adequado do mesmo.

Além disso, como parte do estudo comparativo, também foram incluídas plantas de controle cultivadas em solo sem a interação com o sistema aquapônico. Essas plantas de controle serviram como referência para a avaliação do desempenho e benefícios específicos do sistema aquapônico em relação ao cultivo convencional em solo. A análise comparativa entre as plantas cultivadas no sistema aquapônico e as plantas de controle fornecerá informações valiosas sobre os benefícios da integração da aquicultura e hidroponia, bem como sobre a eficiência do sistema em termos de crescimento, saúde e qualidade dos vegetais. Na Figura 4 pode-se ver as plantas selecionadas como controle.

Figura 4 - Plantas de Controle.



Fonte: AUTOR (2023)

3.1 MATERIAIS E SISTEMA AQUAPÔNICO

A seguir, será abordado o projeto e seus componentes, bem como as espécies escolhidas para integração no sistema. Além disso, serão destacadas as medidas de monitoramento da qualidade da água e as estratégias de manutenção e controle ambiental. Ao compreender a estrutura e as operações desse sistema, será possível avaliar seu desempenho nesse estudo.

3.1.1 Configuração do sistema aquapônico

A configuração do sistema aquapônico foi cuidadosamente planejada para unir funcionalidade e estética em um ambiente controlado. O sistema foi projetado

para ser instalado em um ambiente residencial fechado onde o componente central é o aquário, projetado para realçar a beleza dos animais e reproduzir um habitat mais próximo do natural, com elementos como plantas vivas, rochas e galhos. Imagens do aquário estão disponíveis na Figura 5 e suas medidas estão destacadas na Tabela 3.

Figura 5 - Tanque dos peixes com (A) vista frontal e (B) vista lateral



Fonte: AUTOR (2023)

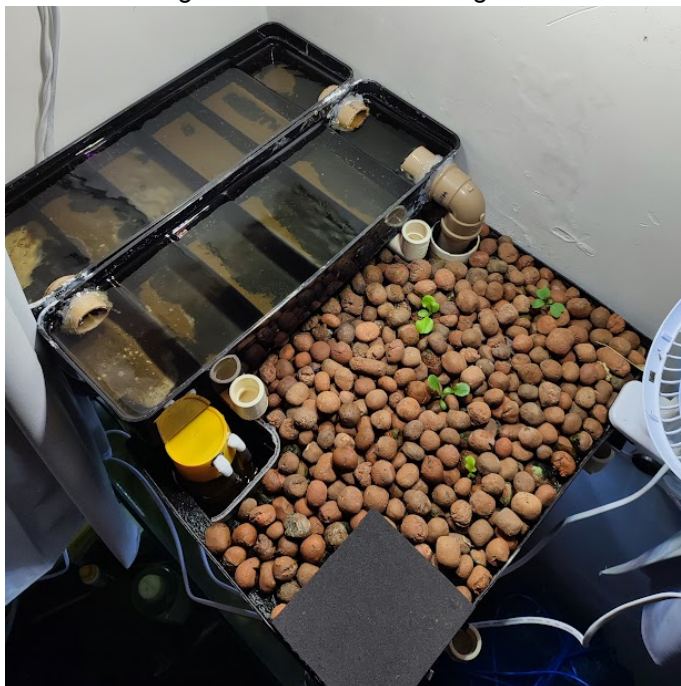
Tabela 3 - Medidas do tanque dos peixes.

LARGURA (cm)	COMPRIMENTO (cm)	ALTURA (cm)	VARIAÇÃO DE ALTURA NA COLUNA D'ÁGUA (cm)	ESPESSURA DO VIDRO (cm)
45	45	41,5	1,6	0,5

Fonte: AUTOR (2023)

Para garantir a qualidade e estabilidade dos parâmetros da água, foi desenvolvido um sistema de filtragem. Este é composto por um módulo decantador e um filtro biológico, ambos contidos em uma estrutura de tenda branca, composta por duas cortinas. A tenda não apenas aumenta o conforto visual dentro do ambiente, como também contribui para a eficiência ao melhorar o aproveitamento da luz artificial e proporcionar mais isolamento e controle do cultivo. O sistema de filtragem segue ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Módulos de filtragem e cultivo.



Fonte: AUTOR (2023)

A concepção deste sistema é pautada na praticidade e segurança. O objetivo é reduzir a necessidade de manutenções frequentes e garantir operações confiáveis. Para atingir esse fim, foram adotadas medidas como diâmetros amplos nas tubulações, com no mínimo 1/2 polegadas, e uma bomba potente, com vazão de até 1000 litros por hora. A presença de gradeamento para a bomba, a eliminação de filtros que demandam limpezas regulares, a inclusão de sifões duplicados e um extravasor como salvaguarda em caso de falhas no sistema, contribuem para a redução de riscos e preocupações operacionais. Vale destacar que as plantas são cultivadas diretamente na filtragem, otimizando o espaço disponível, e que a regulação da alimentação e iluminação é automatizada para manter um ambiente estável e reduzir o trabalho manual. É possível ter uma visão do sistema completo na Figura 7.

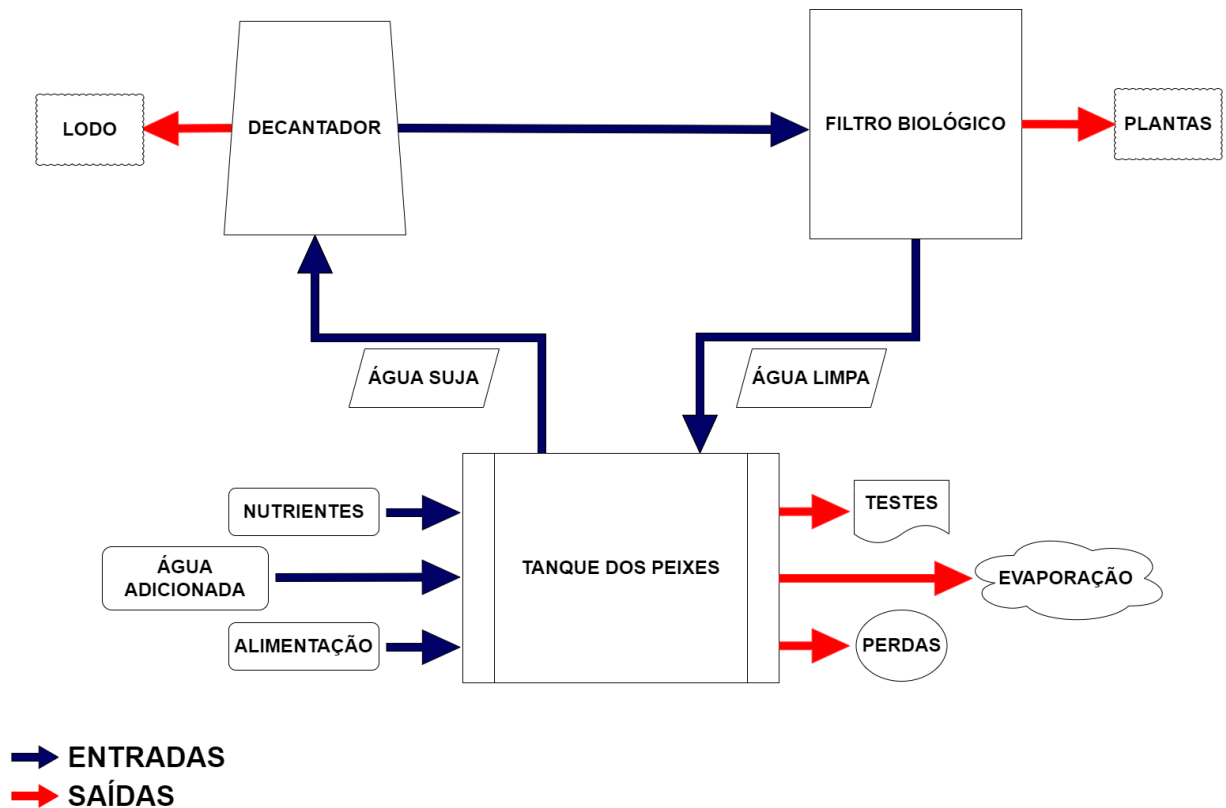
Figura 7 - Sistema Aquapônico.



Fonte: AUTOR (2023)

O fluxograma do processo, exibido abaixo, destaca de maneira clara as principais entradas e saídas do protótipo, proporcionando uma visão abrangente de sua dinâmica. As entradas de destaque englobam nutrientes, alimentação e adição de água fresca, que sustentam o ciclo vital do sistema. As saídas abrangem elementos como evaporação, testes realizados, perdas ocasionais, o lodo acumulado no decantador e matéria vegetal.

Fluxograma 1 - Fluxograma simplificado do Protótipo.



Fonte: AUTOR (2023)

Apesar de não serem evidenciadas diretamente no fluxo, é relevante destacar as transformações essenciais ocorrendo internamente. A conversão de substâncias tóxicas desempenha um papel crítico no tratamento da água e no bem-estar dos habitantes do aquário. A água, inicialmente contaminada com resíduos orgânicos e componentes nitrogenados, passa por duas etapas. Primeiro, no decantador, uma porção significativa de partículas sólidas é retida. Em seguida, a água prossegue para o filtro biológico, onde a amônia é transformada em nitrato, um composto menos prejudicial. Esse nitrato é então disponibilizado para as plantas, fornecendo os nutrientes essenciais para as mesmas.

3.1.2 Seleção de Espécies

A seleção das espécies de peixes foi regida pela consideração de três fatores fundamentais: a compatibilidade das condições de pH com os organismos, as interações entre as espécies e os seus tamanhos finais. Com o pH ideal situando-se entre 6 e 7 para a aquaponia e levando em conta as dimensões do aquário, as espécies foram escolhidas para assegurar um ambiente favorável ao seu

desenvolvimento saudável. A compatibilidade comportamental e as relações simbióticas entre os peixes têm um impacto direto na estabilidade do ecossistema, portanto, a seleção priorizou espécies dóceis e pouco agressivas, minimizando possíveis conflitos por espaço. Por último, o tamanho final dos indivíduos foi cuidadosamente considerado a fim de prevenir superpopulação no aquário. Todos os animais foram adquiridos em lojas de aquarismo locais, a Tabela 4 fornece informações detalhadas sobre as espécies escolhidas no início do experimento.

Tabela 4 - Espécies de Peixes Seleccionadas e Suas Características.

PEIXES					
Espécie	Nome Científico	Tamanho médio (cm)	Peso Médio (g)	Quantidade	Peso Total (g)
Peixe Beta	Betta splendens	6	0,15	1,00	0,15
Bófia	Botia spp.	11	40,00	2,00	80
Acará Bandeira	Pterophyllum scalare	13,5	55,00	1,00	55
Paulistinha	Poecilia sphenops	3,5	1,50	1,00	1,5
Neon	Paracheirodon innesi	3	0,15	1,00	0,15
Coridora Pimenta	Corydoras paleatus	5	5,00	3,00	15
Dojo	Misgurnus anguillicaudatus	19	50,00	1,00	50
Chupa Vidro	Parotocinclus haroldoi	3,5	1,50	7,00	10,5
Colisa Lalius	Trichogaster lalius	5,5	10,00	2,00	20
Red Eye Albino Bristlenose Pleco	Ancistrus sp.	12,5	35,00	1,00	35
Camarão Fantasma	Caridina cantonensis	2,5	0,25	10,00	2,5

Neocaridina Vermelho	Neocaridina davidi	2	0,15	6,00	0,9
			Total	36,00	270,7

Fonte: AUTOR (2023)

Abordando as espécies de plantas, podemos dividi-las entre as plantas aquáticas, que desempenham um papel decorativo no aquário, e as plantas de cultivo. No que tange às plantas aquáticas, a seleção se concentrou em espécies de baixa exigência, que não requerem substrato fértil ou cuidados intensivos. Esta abordagem visa garantir um ambiente de fácil manutenção e, ao mesmo tempo, proporcionar uma estética agradável ao aquário. Quanto às plantas de cultivo, a escolha recaiu sobre variedades folhosas, considerando tanto a restrição de espaço na tenda de cultivo quanto sua compatibilidade com o sistema aquapônico. A Figura 8 ilustra as sementes escolhidas para o experimento e na Tabela 5 encontra-se a relação completa das plantas do sistema.

Figura 8 - Sementes de cultivo selecionadas.



Fonte: AUTOR (2023)

Tabela 5 - Espécies de Plantas Seleccionadas e Suas Características.

PLANTAS				
Espécie	Nome Científico	Tipo	Tamanho Médio Máximo (cm)	Quantidade
Amazonense	Echinodorus bleheri	Aquática	50	3
Vallisneria	Vallisneria gigantea	Aquática	120	3
Musgo de Java	Taxiphyllum barbieri	Aquática	5	1
Alface Americana	Lactuca sativa var. longifolia	Terrestre	30	1
Alface Itapuã	Lactuca sativa	Terrestre	25	1
Alface Mimosa	Lactuca sativa crispa	Terrestre	25	1
Rúcula cultivada	Eruca sativa	Terrestre	30	1
			Total	11

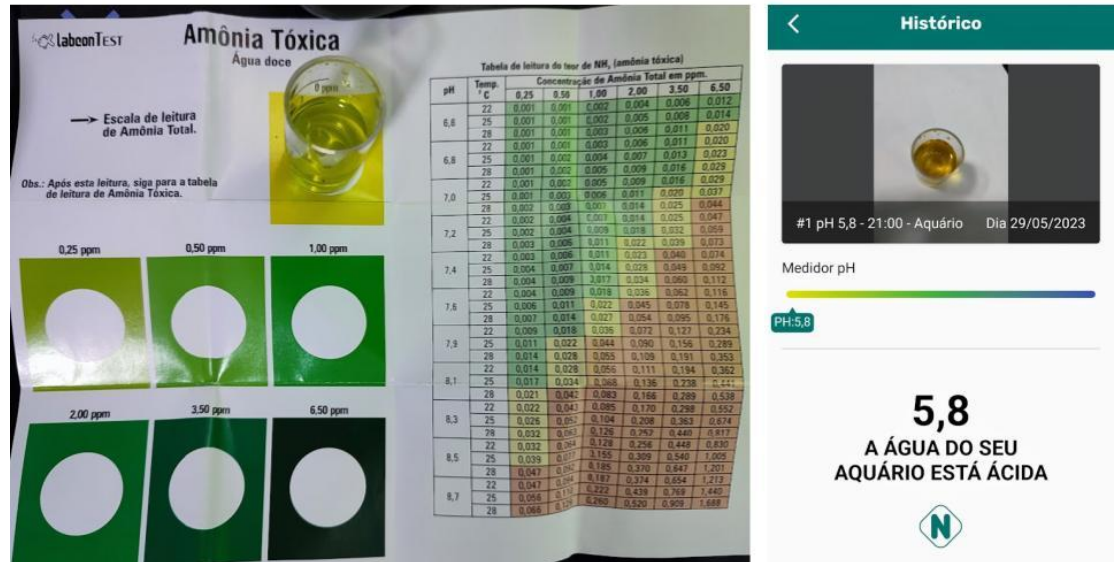
Fonte:AUTOR (2023)

3.1.3 Monitoramento da Qualidade da Água

No que se refere ao monitoramento da qualidade da água, os parâmetros selecionados para análise foram o pH e a amônia, visto que esses são bons indicadores para avaliar a saúde do aquário. É importante ressaltar que a escolha meticulosa dos itens decorativos teve um papel estratégico na ampliação do controle do pH. Os substratos e rochas adotados são inertes, enquanto os galhos foram introduzidos com a intenção específica de manter o pH em níveis ácidos. Para acompanhar esses elementos, optou-se por testes comerciais baseados em titulação, nos quais a mudança de coloração denota o valor correspondente. Para o teste de pH são necessários 7 mL de água e para o de amônia 5 mL. Esse procedimento permitiu acompanhar e assegurar a estabilidade do ambiente aquapônico ao longo do tempo. Adicionalmente, a temperatura da água foi outro

parâmetro monitorado, medida por meio de um termômetro submerso. A Figura 9 ilustra exemplos de medições realizadas dos parâmetros da água.

Figura 9 - Exemplo dos testes de amônia tóxica e pH.



Fonte: AUTOR (2023)

3.1.4 Manutenção do Sistema

A alimentação dos peixes ocorreu de forma automatizada, com duas refeições diárias, utilizando um alimentador automático, que segue ilustrado na Figura 10. No entanto, também foi adotada uma abordagem manual, proporcionando alimento fora dos horários programados. Para isso, foram selecionadas rações de dois tipos, em flocos e extrusadas para peixes de fundo.

Figura 10 - Alimentador automático.



Fonte: AUTOR (2023)

As manutenções de rotina do sistema se concentram principalmente na compensação da água perdida devido à evaporação e na adição de nutrientes para as plantas, os últimos estão exibidos na Figura 11. Em intervalos menos frequentes, realiza-se a sifonagem do decantador, a limpeza dos vidros para remover algas, a poda das plantas aquáticas e a colheita das plantas de cultivo.

Figura 11 - Nutrientes.



Fonte: AUTOR (2023)

3.1.5 Controle de Variáveis Ambientais

O controle da iluminação é efetuado por meio de um temporizador, que permite a programação dos horários de ligar e desligar. Para garantir a regulação da temperatura no sistema de cultivo, foram incorporados dois ventiladores de pequeno porte. Um deles é direcionado para as lâmpadas, que constituem a principal fonte de calor no ambiente de cultivo, enquanto o outro é posicionado para favorecer o crescimento das plantas. Essa configuração possibilita a manutenção de um fluxo de ar contínuo, auxiliando tanto no controle térmico quanto no desenvolvimento saudável das plantas. Além disso, para monitorar as condições de cultivo, foram utilizados sensores de temperatura e umidade, registrando os valores máximos e mínimos dessas variáveis ao longo do dia. Na Figura 12, apresentam-se imagens com as vistas laterais do cultivo, destacando-se a disposição dos ventiladores no sistema.

Figura 12 - Sistema de regulação do ambiente de cultivo através de (A) vista frontal e (B) vista lateral.



Fonte: AUTOR (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

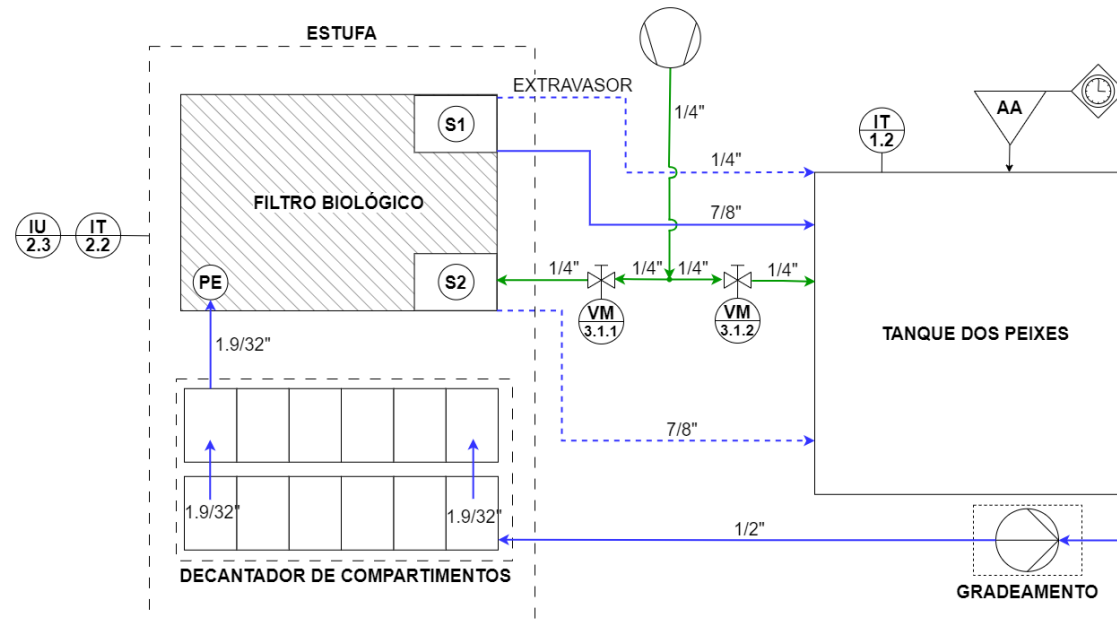
Na seção a seguir, serão apresentados os resultados e discussões detalhadas deste estudo sobre sistemas aquapônicos. Esta análise abrange uma variedade de aspectos, incluindo eficiência do sistema, impacto ambiental e considerações econômicas.

4.1 DIAGRAMA P&ID DO PROCESSO

O Diagrama P&ID, ilustrado na Figura 13, oferece uma representação visual da infraestrutura do sistema, evidenciando a interconexão das tubulações e instrumentos. A numeração dos instrumentos é estruturada de acordo com sua localização e função na respectiva área designada. As tubulações são discriminadas por cores: azul para água e verde para ar atmosférico, enquanto os diâmetros são indicados em polegadas, com o diâmetro nominal expresso em milímetros na legenda. O projeto em dupla configuração do sifão e o extravasor são destacados por meio de linhas pontilhadas, que denotam as conexões emergenciais. Estas medidas foram implementadas para lidar com eventualidades como um possível entupimento do sifão principal, evitando transbordamentos e situações de risco para o sistema. Ademais, o ponto de entrada no filtro biológico, situado na saída do decantador, opera como um sistema de gradeamento de segurança e simplifica a instalação e remoção dos módulos de filtragem.

Figura 13 - Diagrama de Tubulações e Instrumentação do Protótipo.

Legenda das Correntes	Tubulações	Área	Instrumentações	Padrões
— Conexão de processo	1/4" DN 6	1x Tanque dos peixes	1x Válvula	/// Mídias Biológicas
— Conexão de Instrumentação	1/2" DN 12.5	2x Estufa	2x Medidor de Temperatura	● Água
--- Conexão Emergencial	7/8" DN 22	3x Externo	3x Medidor de Umidade	● Ar Atmosférico
▶ Direção do fluxo	1.9/32" DN 32			
● Bifurcação				



Legenda das Válvulas	Legenda dos Equipamentos	Legenda da Instrumentação
✕ Válvula Gaveta Manual	⊗ Bomba Centrífuga Afogada	IT Indicador de Temperatura
	⊗ Compressor de Ar	VM Válvula Manual
	⊙ Ponto de Entrada (Tubo 2")	IU Indicador de Umidade
	⊙ Sifão Bell	
	⊙ Alimentador Automático	
	⊙ Timer	

Fonte: AUTOR (2023)

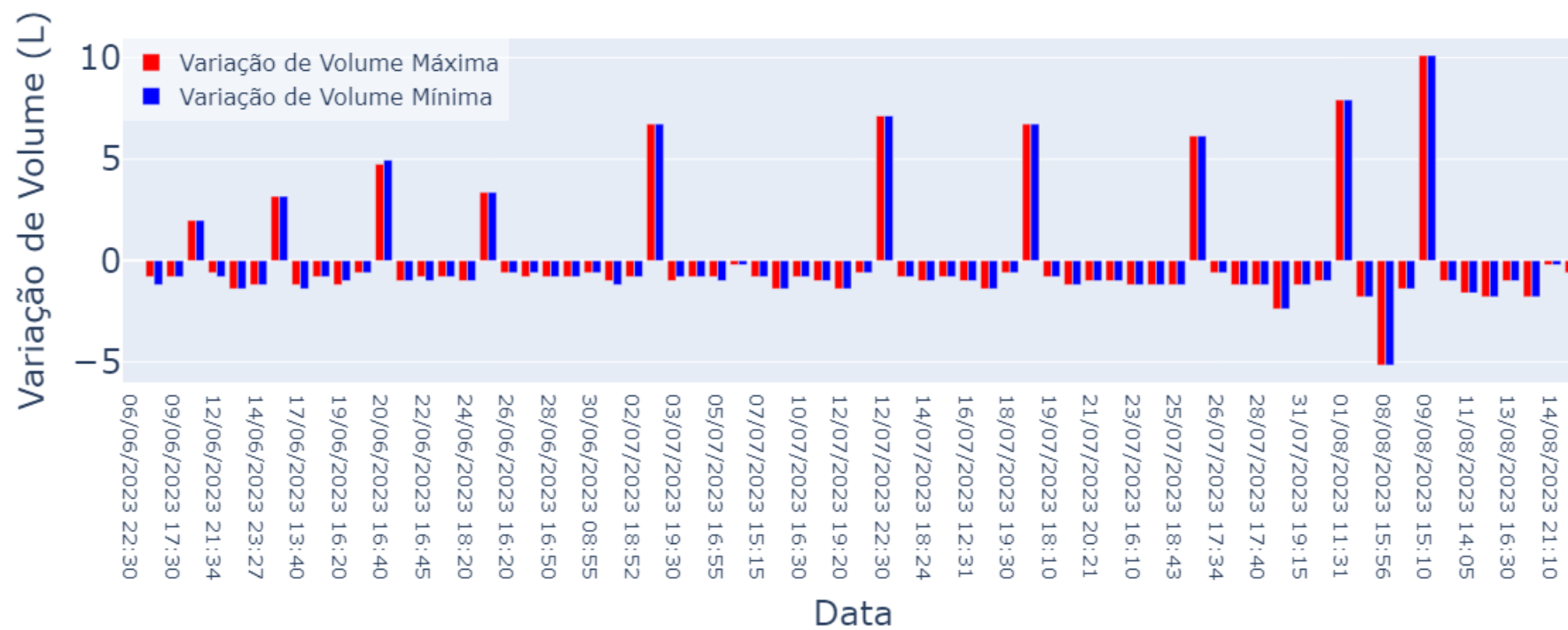
4.2 BALANÇOS DO SISTEMA

O estudo da eficiência e equilíbrio de um sistema aquapônico envolve a análise detalhada dos balanços das principais variáveis que o compõem. Assim, são feitas avaliações quantitativas e qualitativas que permitem compreender como o sistema se comporta em relação às entradas e saídas de massa, bem como as dinâmicas subjacentes. Ao explorar as variações do volume de água, as taxas de alimentação e os efeitos do lodo gerado, além de examinar a taxa de mortalidade e a produtividade das plantas, obteremos uma visão abrangente dos processos e interações que moldam o funcionamento do sistema. Cada análise contribui para uma compreensão mais profunda das dinâmicas do experimento, fornecendo informações valiosas para otimização e aprimoramento contínuo.

4.2.1 Balanço do Volume de Água

O fluxograma do processo, como apresentado anteriormente, fornece a base visual para a análise do balanço de massa global. Durante a realização deste balanço, as perdas de água associadas a remoção de plantas aquáticas, limpeza dos vidros, entre outras, foram avaliadas e consideradas insignificantes diante das demais entradas e saídas do sistema. Esse critério permitiu a concentração na análise das principais contribuições, incluindo evaporação, água retirada para testes, adição de água nova e de nutrientes. Para ilustrar essa dinâmica, o gráfico da Figura 14, a seguir exibe a variação do volume de água ao longo dos dias.

Figura 14 - Gráfico da variação do volume de água diários.



Fonte: AUTOR (2023)

Foram realizados cálculos para determinar as taxas semanais de adição de água e a taxa diária de evaporação, assim como a perda total de volume e o acúmulo ao final do período de acompanhamento de 70 dias. Os resultados dessas análises são apresentados de forma detalhada na Tabela 6, que exhibe os valores de entradas e saídas de volume globais do sistema.

Tabela 6 - Entradas e saídas de volume no sistema.

ENTRADAS		SAÍDAS	
Descrição	Quantidade (L)	Descrição	Quantidade (L)
Água Adicionada	57,825	Água Evaporada	62,709
Nutrientes	0,295	Testes	0,659
Total Entradas	58,12	Total Saídas	63,368

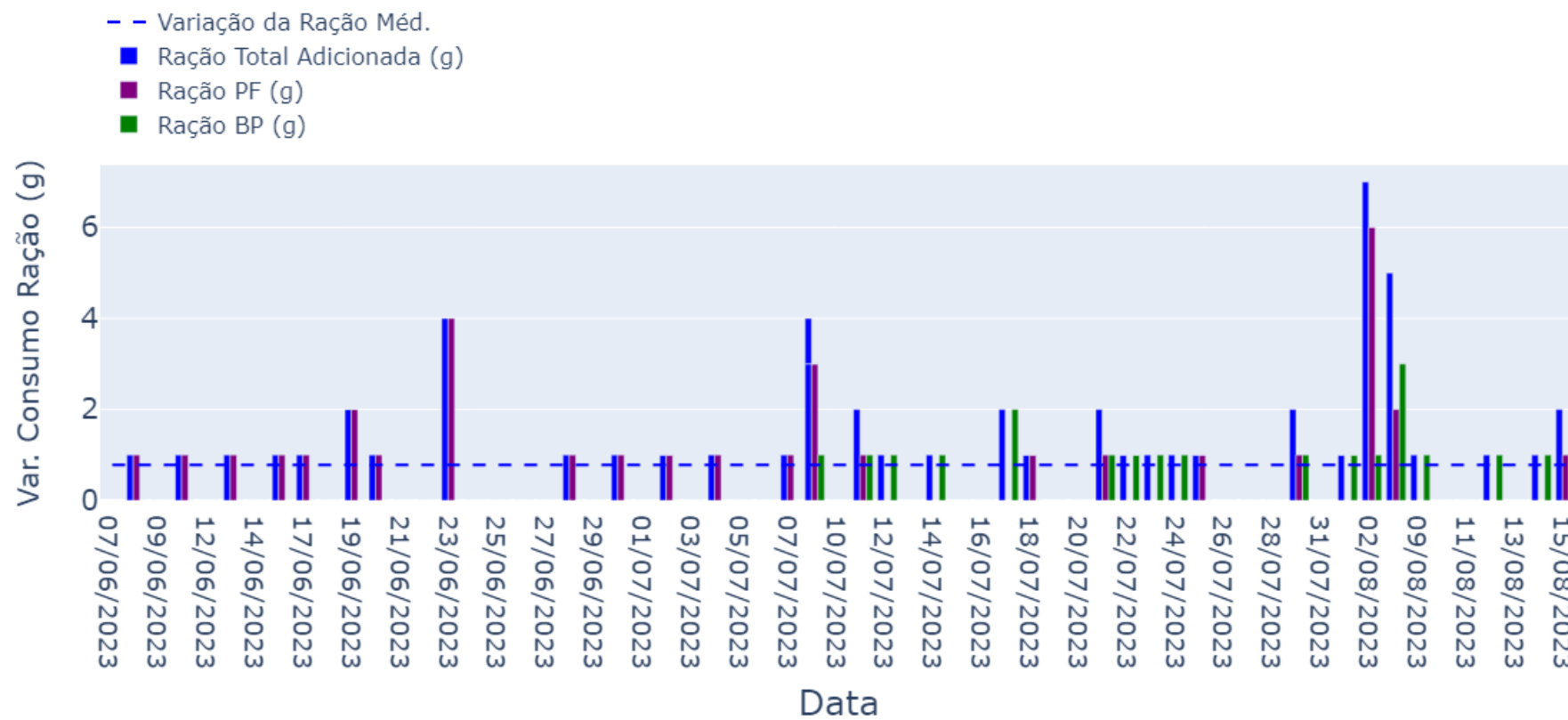
Fonte: AUTOR (2023)

A partir da tabela, identificou-se um acumulado negativo de 5,248 litros em relação ao primeiro dia de experimento, justificado pela falta de reposição de água nos últimos dias do estudo. Além disso, observou-se que a taxa média de evaporação diária foi em torno de 0,918 litros por dia. Para compensar essa perda, foi necessário adicionar, em média, 6,458 litros por semana ao sistema. Analisando os volumes destinados aos nutrientes, identificou-se que ao longo do experimento foram acrescentados 0,095 litros de cada nutriente (NPK, micro e Ferro) e no que diz respeito aos testes, foram utilizados 0,427 litros com os testes de pH e 0,232 litros com os testes de amônia.

4.2.2 Taxa de Alimentação e Produtividade

Explorando a relação entre a alimentação dos habitantes do sistema aquapônico e a produtividade das plantas, pode-se chegar ao valor da taxa de massa vegetal em relação à ração consumida para o ciclo. Ao acompanhar diariamente as flutuações de peso da ração, foi possível obter um valor preciso do consumo total durante todo o experimento. A Figura 15 ilustra esse panorama, exibindo um gráfico detalhado que descreve a variação no consumo de ração ao longo do tempo. Adicionalmente, a análise foi segmentada por tipo de ração, destacando a distribuição dos alimentos fornecidos aos habitantes do sistema.

Figura 15 - Gráfico Variação do Consumo de Ração ao Longo dos Dias.

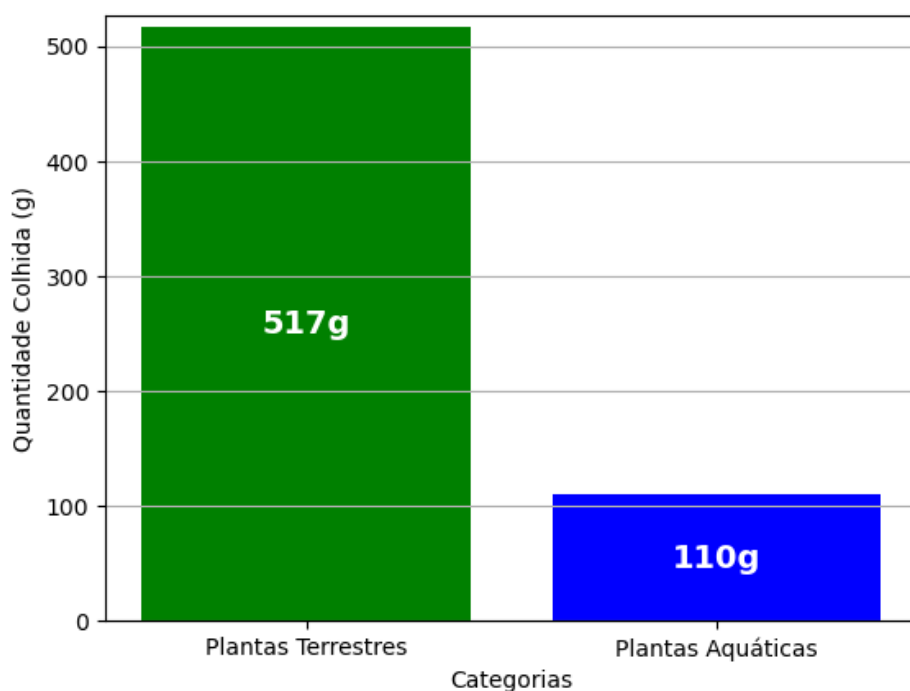


Fonte: AUTOR (2023)

A partir dessa análise, constatou-se que o consumo médio de ração por dia foi de 0,78g. Totalizando ao fim do experimento 54 gramas de ração, das quais 34 g foram ração em flocos e 20 g de ração extrusada para peixes de fundo.

No contexto das plantas cultivadas, ao longo do experimento, foram realizadas as colheitas das plantas terrestres e aquáticas. Totalizando 627 gramas de matéria vegetal, a distribuição de massa colhida por tipo de planta segue ilustrada na Figura 16, que contém um gráfico com a quantidade em gramas coletada por tipo de planta.

Figura 16 - Gráfico distribuição de massa para as plantas colhidas.



Fonte: AUTOR (2023)

Das plantas selecionadas para o cultivo, somente as três espécies de alface foram colhidas, enquanto a rúcula foi descartada por falta de desenvolvimento, contribuindo com apenas 2 gramas de material. Todas as plantas foram devidamente pesadas no momento da colheita, e as figuras 17 e 18 a seguir apresentam registros fotográficos das mesmas.

Figura 17 - Plantas Colhidas do Cultivo.



Fonte: AUTOR (2023)

Figura 18 - Plantas Colhidas do Aquário.



Fonte: AUTOR (2023)

A partir dessas análises pode-se inferir a taxa de gramas de plantas colhidas por gramas de ração consumida como sendo igual a 0,17 por dia, ou 4,97 por mês, fornecendo uma medida do rendimento das plantas em relação à alimentação fornecida.

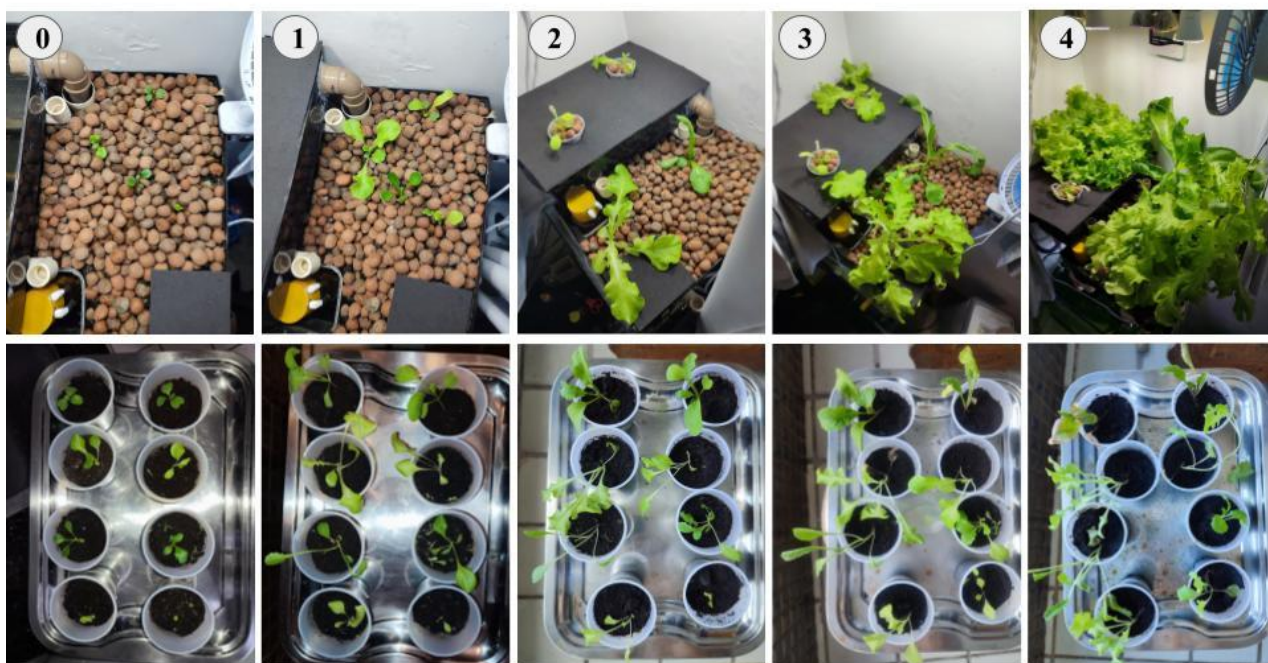
4.2.3 Comparação com as Plantas De Controle

No dia 07/06/2023, o experimento de cultivo de plantas teve seu início com a semeadura das sementes de Alface Americana, Mimosa, Itapuã e Rúcula Cultivada.

As sementes foram plantadas de acordo com as orientações do fabricante, em copos plásticos preenchidos com uma camada inferior de pedras, seguida de substrato fértil e húmus de minhoca. A primeira tentativa de germinação não teve êxito em todos os copos, o que levou a uma segunda tentativa em 14/06/2023, obtendo resultados mais satisfatórios.

No dia 28/06/2023, após as plantas atingirem um estágio adequado de crescimento, foi realizada a seleção de uma planta de cada espécie para ser cultivada no sistema aquapônico, enquanto outras duas de cada espécie foram alocadas para o grupo de controle. As plantas de controle foram transferidas para outro local, onde puderam receber luz direta do sol durante algumas horas da manhã e luz indireta durante o restante do dia. Além disso, foram regadas conforme a necessidade. A Figura 19 abaixo ilustra a evolução das plantas do estudo ao longo do tempo, a partir desta data.

Figura 19 - Evolução das plantas ao longo de 1, 9, 17, 26 e 42 dias, seguindo a ordem das imagens.



Fonte: AUTOR (2023)

Observa-se, através da Figura 19, que as plantas cultivadas no sistema aquapônico apresentaram um crescimento significativamente superior e uma aparência mais saudável em comparação com as plantas de controle. Mesmo que as plantas de controle tenham recebido luz natural, o desenvolvimento delas foi

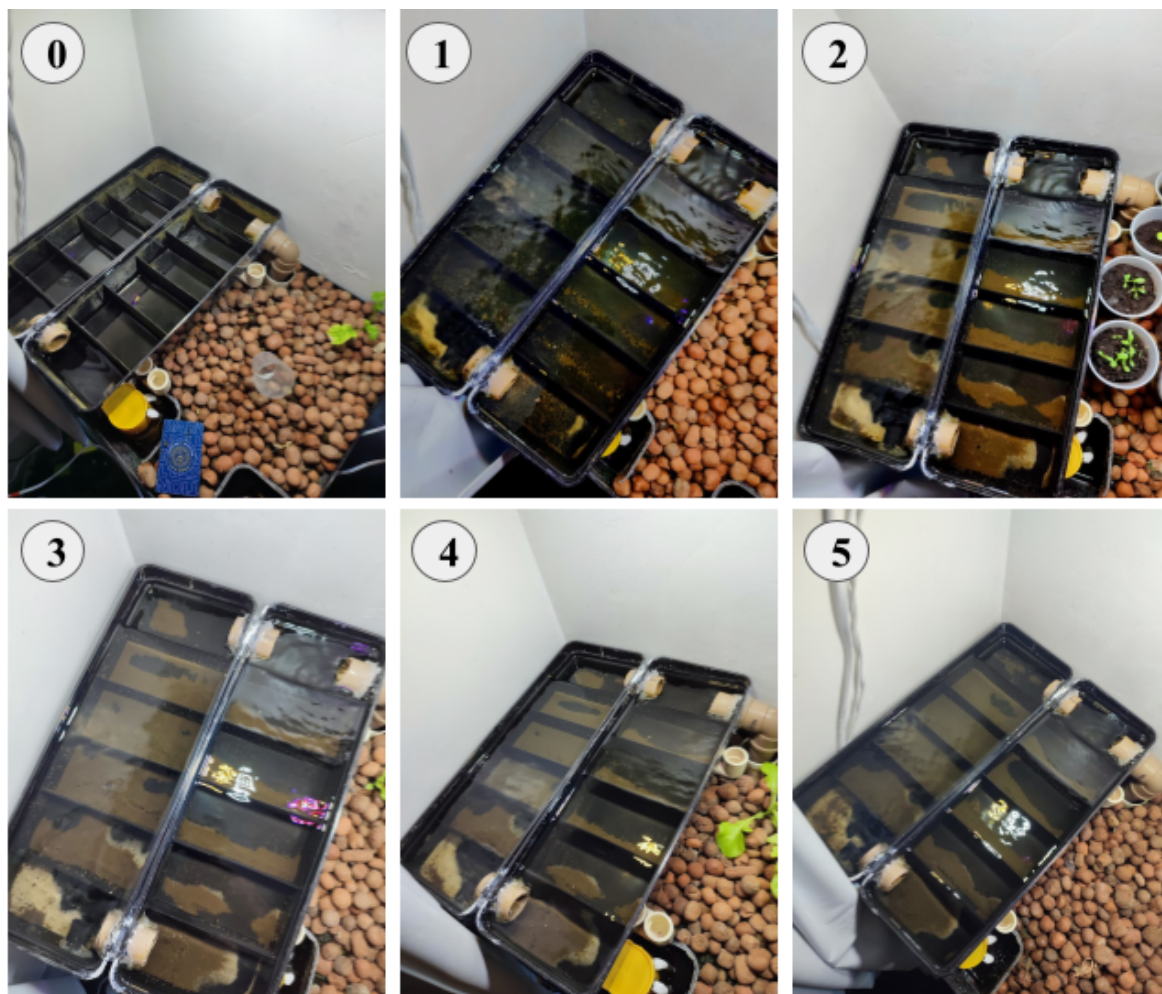
prejudicado por diversos fatores, incluindo dias chuvosos, que são comuns durante a época do ano em que o experimento foi conduzido. Por outro lado, o ambiente controlado do sistema aquapônico não sofreu com esses desafios climáticos. Esse contraste ressalta o impacto positivo de um ambiente controlado nos resultados do cultivo, destacando a capacidade desse sistema em proporcionar um ambiente favorável para o crescimento das plantas.

A comparação entre as plantas cultivadas no sistema aquapônico e as plantas de controle revela que, apesar dos custos envolvidos, o cultivo aquapônico pode ser uma alternativa viável, especialmente em situações em que métodos convencionais de cultivo enfrentam dificuldades para produzir plantas de qualidade. Portanto, apesar da necessidade de melhorar a viabilidade econômica desse tipo de cultivo, os resultados demonstram seu potencial, especialmente quando os métodos tradicionais não são eficazes.

4.2.4 Análise Qualitativa do Lodo Gerado

A documentação por meio de fotografias possibilitou o acompanhamento do acúmulo de lodo gerado pelo sistema ao longo dos dias. Esse acúmulo, predominantemente constituído por matéria orgânica, origina-se de resíduos como restos de ração e fezes dos animais, além da incorporação de partículas de areia arrastadas pela bomba. A Figura 20 reúne uma compilação de imagens que ilustram a evolução desse acúmulo ao longo do tempo.

Figura 20 - Evolução do acúmulo de lodo com 0, 1, 17, 26, 37 e 75 dias, seguindo a ordem das imagens.



Fonte: AUTOR (2023)

Desde o primeiro dia do experimento, o processo de decantação teve início, especialmente o das partículas mais densas, como as de areia. Essas partículas mais pesadas se concentram, conforme o esperado, nos compartimentos iniciais do decantador. Ao longo do tempo, outra diferença notável foi a elevação na densidade do material orgânico, seguida de seu escurecimento. Esse escurecimento poderia indicar a ocorrência de oxidação da matéria orgânica. Além disso, observou-se uma estabilização no acúmulo de resíduos, sem incremento nos níveis de amônia. Esse comportamento reflete a estabilidade do sistema, ressaltando que não houve necessidade de intervenção para limpeza durante o período analisado.

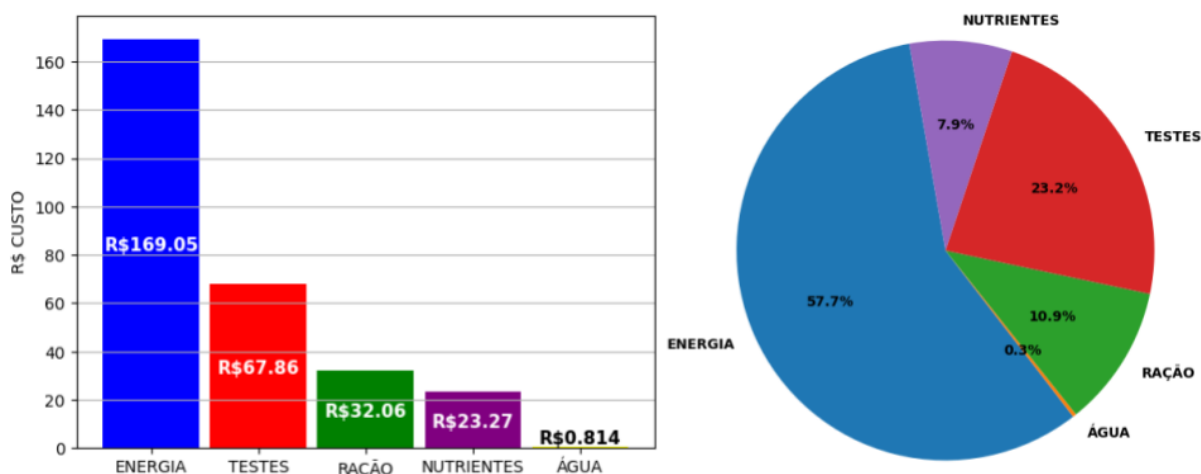
4.2.5 Taxa de Mortalidade

O experimento iniciou com um contingente de 36 animais e um peso coletivo aproximado de 270,7g, observou-se ao longo das operações uma redução para 22 indivíduos, correspondendo a um peso total de cerca de 241,05g. Essa diminuição resultou em uma taxa de mortalidade aproximada de 40%, e uma variação de massa de aproximadamente 11%. Tal índice de mortalidade elevado pode ser justificado pela inadequada adaptação dos camarões *Neocaridina davidi* ao pH ácido. Estes camarões não conseguiram se reproduzir no ambiente e, com o tempo, todos os 6 indivíduos foram perdidos. Similarmente, 3 dos camarões-fantasma também foram perdidos. Quanto aos peixes, a perda foi de 5 indivíduos. O declínio na população é uma ocorrência comum após determinado período, podendo ser associado a fatores como a qualidade dos peixes adquiridos nas lojas. Conflitos territoriais entre os peixes também podem levar a ferimentos que, com o passar do tempo, culminam em óbito. Apesar dos desafios, ao longo do experimento, foram envidados esforços para proporcionar um ambiente ideal para todas as espécies. Vale ressaltar também, que alguns indivíduos conseguiram se adaptar e prosperar, demonstrando a complexidade das interações entre os habitantes do sistema e a importância de um equilíbrio ambiental propício.

4.3 CUSTO DE OPERAÇÃO E EFICIÊNCIA

A avaliação detalhada dos custos de operação é fundamental para determinar a viabilidade financeira e o retorno do investimento em sistemas aquapônicos. Durante o decorrer do experimento, realizou-se um acompanhamento dos custos associados aos insumos utilizados, incluindo gastos referentes à energia elétrica, aquisição de nutrientes, avaliação de amônia e pH do sistema, ração fornecida e consumo de água. Essa avaliação proporcionou uma visão abrangente dos investimentos financeiros envolvidos no funcionamento do sistema. Além disso, a comparação com a alternativa de um aquário convencional sem tratamento oferece uma perspectiva mais completa sobre os *trade-offs* financeiros desse tipo de sistema. Os resultados obtidos nessa análise contribuem para a compreensão global do desempenho do protótipo, não apenas em termos de benefícios ambientais, mas também do ponto de vista econômico. A Figura 21 apresenta gráficos que ilustram a contribuição de cada uma das variáveis mencionadas.

Figura 21 - Gráficos da contribuição para o custo operacional ao fim do experimento.

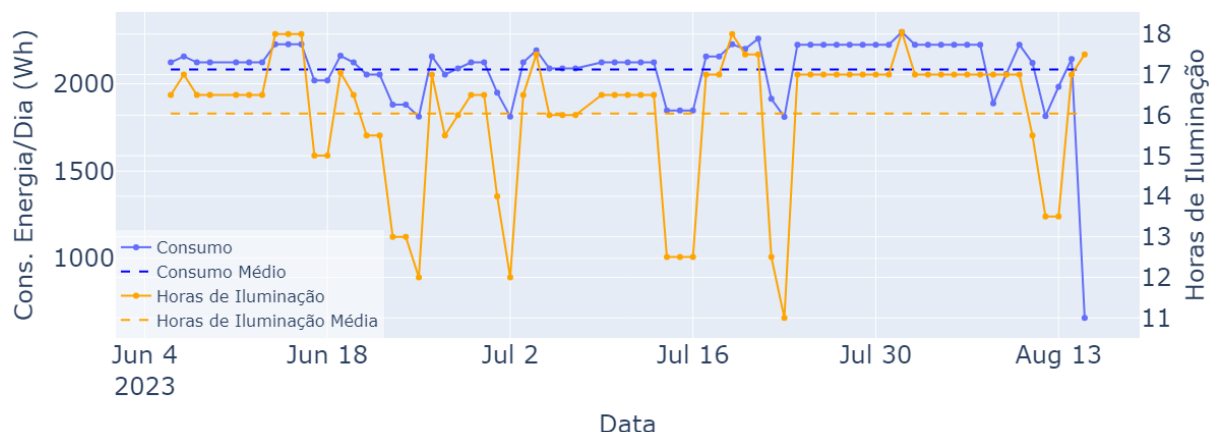


Fonte: AUTOR (2023)

4.3.1 Custo Energético

A análise da Figura 21 revela que o gasto mais significativo corresponde à eletricidade. Este elemento representa 57,7% do custo operacional, totalizando 169,05 reais ao término do experimento, no qual durante o período de 70 dias, o consumo totalizou 145,73 KWh. Para avaliar o custo unitário da energia, foi estimado a partir das contas de energia da residência do autor, o valor de 1,16 reais por KWh. O consumo diário médio girou em torno de 2,08KWh e a partir desses dados, determinou-se que o custo médio diário de energia foi de aproximadamente 2,42 reais, equivalente a um total de 72,46 reais por mês. O monitoramento do consumo elétrico ocorreu diariamente, calculado com base no consumo dos dispositivos em funcionamento e nas horas de iluminação fornecidas ao sistema. É importante ressaltar que tanto a iluminação do aquário quanto a do cultivo estão sincronizadas, ligando e desligando simultaneamente. Durante todo o experimento, foram registradas um total de 1106 horas de iluminação, correspondendo a uma média de 16 horas por dia. O gráfico apresentado na Figura 22 ilustra essa relação, exibindo em azul o consumo em KWh e em amarelo as horas de iluminação fornecidas ao sistema em cada dia.

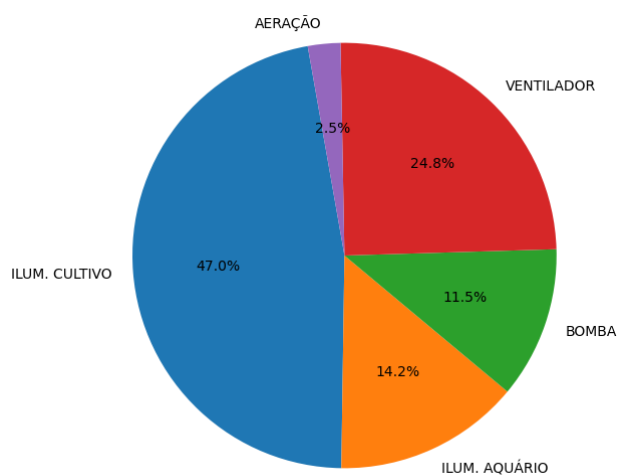
Figura 22 - Gráficos do consumo de energia e horas de iluminação.



Fonte: AUTOR (2023)

No gráfico da Figura 22, é evidente que o consumo de energia segue uma tendência semelhante às horas de iluminação do sistema na maioria dos pontos, indicando o grande peso que essa variável possui para o consumo energético. No entanto, existem pontos no gráfico que não seguem essa tendência. Esses pontos atípicos ocorrem em situações específicas, como momentos de desmobilização ou adição de novos equipamentos. Por exemplo, a introdução de um aerador no sistema, com o propósito de reduzir a carga orgânica e otimizar a eficiência dos filtros, ou como após a colheita, em que todos os equipamentos de cultivo foram desligados. Essas situações impactaram o consumo de energia em determinados momentos e resultaram em uma mudança nesse padrão. A Figura 23 apresenta o impacto de cada elemento consumidor de energia no consumo total do sistema, oferecendo uma visão detalhada das contribuições de cada componente.

Figura 23 - Gráficos do impacto de cada elemento consumidor de energia no consumo total.



Fonte: AUTOR (2023)

Pelo gráfico da Figura 23, é notável que a iluminação do cultivo é o componente mais exigente em termos de consumo energético, representando aproximadamente 50% do total, tornando-se assim a variável mais dispendiosa do sistema. Em seguida, encontra-se a ventilação, responsável por aproximadamente 25% do consumo energético. A iluminação do aquário também desempenha um papel significativo, contribuindo em torno de 15% do consumo total. Dessa forma, a iluminação, como um todo, corresponde a surpreendentes 61,2% do consumo energético global do sistema.

Essa análise detalhada revela diversos gargalos que precisam ser abordados para tornar o sistema viável do ponto de vista econômico. Quando comparado o custo operacional do sistema aquapônico com um aquário convencional, retirando os componentes exclusivos do cultivo, percebe-se que o custo do último é aproximadamente 70% menor para o mesmo período de duração do experimento, totalizando apenas R\$53,53. Essa diferença significativa levanta questionamentos sobre a eficácia financeira do protótipo em seu formato atual e destaca a necessidade de otimizar o uso de energia, especialmente na iluminação, para tornar o sistema mais competitivo no aspecto econômico.

4.3.2 Custo com Testes, Ração e Nutrientes

Os custos associados aos testes realizados, despesas com a alimentação e adições de nutrientes foram agrupados neste tópico, uma vez que seriam custos equivalentes, independentemente da presença do sistema de cultivo. Entre esses custos, os testes dos parâmetros da água emergiram como o segundo maior custo operacional do experimento, totalizando R\$ 67.86.

Ao longo do projeto, foram conduzidos 61 testes de pH, representando um gasto de R\$ 11.13, e 58 testes para avaliar a concentração de amônia tóxica, totalizando R\$ 56.72. Vale ressaltar que, embora essas despesas possam parecer consideráveis, isso se deve principalmente ao tamanho reduzido deste protótipo. Na realidade, esses custos permaneceriam praticamente inalterados em sistemas de maior escala, tornando essa consideração financeira menos impactante.

No que diz respeito à alimentação dos organismos, o custo total atingiu R\$ 32.06. Desse montante, R\$ 25.26 foram destinados à aquisição de ração em flocos, enquanto R\$ 6.80 foram alocados para a ração extrusada. Essas despesas refletem

o comprometimento financeiro necessário para fornecer a quantidade adequada de alimento aos habitantes do sistema, sendo um componente mais oneroso em sistemas de maior porte.

Quanto às adições de nutrientes ao longo do experimento, foram realizadas um total de 44 adições, com 15 adições de NPK, 14 de micronutrientes e 15 de ferro. Cada adição teve um custo uniforme, totalizando um custo de R\$ 23.27. Estes gastos são essenciais para manter um ambiente propício ao crescimento das plantas, representando uma parte crítica do investimento operacional do sistema aquapônico. É importante notar que o custo das adições de nutrientes pode variar consideravelmente com o volume de água do sistema.

A análise dessas despesas contribui significativamente para a compreensão abrangente dos custos operacionais deste sistema experimental, destacando as possíveis áreas de melhoria e como os custos podem variar em relação à escala do sistema.

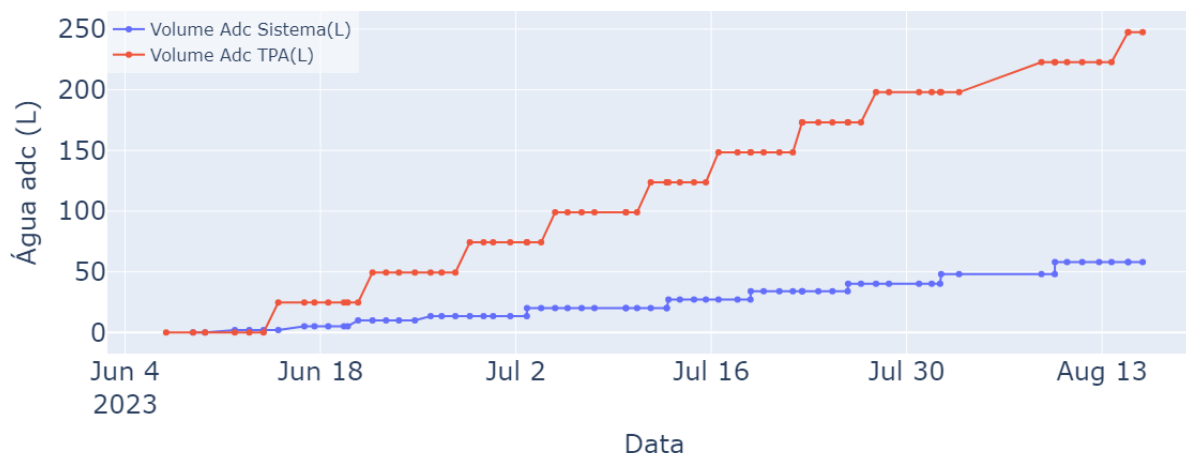
4.3.3 Custo com Água

No contexto dos custos operacionais, o custo associado à água destaca-se por ser o menor percentual, representando apenas 0.3% do custo final, um montante de R\$0.814, que foi alocado ao longo de todo o experimento, uma fração financeira pouco expressiva.

Contudo, é fundamental salientar que, sob a perspectiva da eficiência e sustentabilidade, quando comparado ao consumo de água de um aquário convencional, o sistema aquapônico demonstra sua superioridade. No caso do aquário convencional, com dimensões equivalentes, seria necessário descartar e substituir aproximadamente 1/3 do volume de água a cada semana. Esse constante desperdício de água fresca é evitado pelo sistema aquapônico, no qual o volume de efluente gerado é zero.

A Figura 24 proporciona uma visão clara da evolução do total de água fresca adicionada aos sistemas ao longo do período experimental, realçando a eficiência do sistema aquapônico em conservar recursos hídricos, tornando-o uma opção mais sustentável no aspecto do manejo da água.

Figura 24 - Gráficos do consumo de água para cada sistema ao longo do tempo.

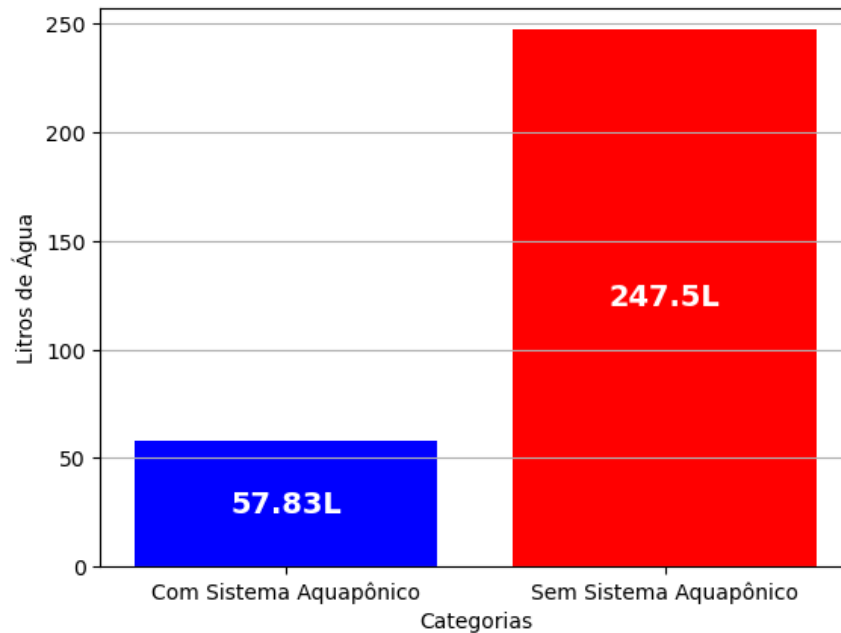


Fonte: AUTOR (2023)

A discrepância entre as curvas exibidas no gráfico da Figura 24 é notável, e essa disparidade tende a se acentuar à medida que o tempo avança. Em resumo, seriam necessários 247,5 litros de água fresca para manter um aquário convencional funcionando, gerando um volume igual de efluentes ao final do período em análise. Surpreendentemente, esse montante de água representa apenas um custo de R\$3,46.

Embora a economia de água ao final do experimento tenha sido substancial, totalizando 189,67 litros, equivalente a 4,3 vezes menos consumo, o impacto financeiro desse ganho foi relativamente insignificante, resultando em economias de apenas R\$2,65. A Figura 25, apresentada a seguir, proporciona uma representação visual da comparação entre os consumos de água dos dois sistemas, ilustrando de maneira evidente a notável diferença na gestão desse recurso essencial.

Figura 25 - Gráficos de barras do consumo total para cada sistema.

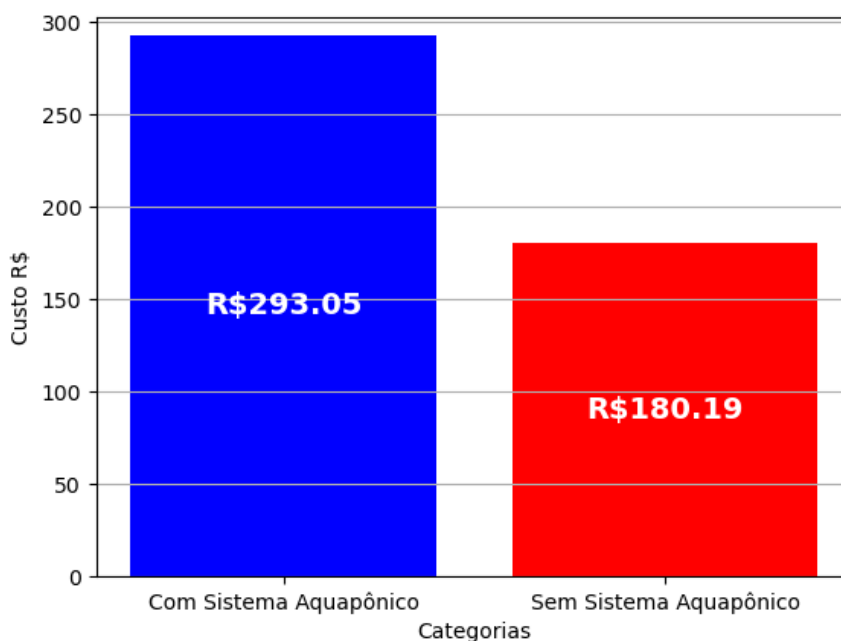


Fonte: AUTOR (2023)

4.3.4 Análise Comparativa de Custos: Sistema Aquapônico vs. Aquário Convencional

Por fim, o custo total da operação do protótipo ao concluir o período do experimento, chegou a um montante de 293,05 reais. Em contrapartida, para um aquário convencional, o custo total no mesmo período se situaria em 180,19 reais, considerando as mesmas variáveis. Isso revela uma diferença de custo de R\$112,86, representando um acréscimo de 63,35% no custo ao optar pelo sistema aquapônico. O gráfico da figura 26, apresenta a comparação entre o custo com e sem aquaponia.

Figura 26 - Gráficos de barras do custo total para cada sistema.



Fonte: AUTOR (2023)

Assim, o custo diário da operação do sistema aquapônico ficou em torno de 4,16 reais, enquanto que para um sistema sem aquaponia, o custo diário foi de 2,55 reais. Esses números refletem a diferença financeira entre as duas abordagens, destacando os desafios associados à implementação do sistema aquapônico em comparação com o método convencional. Dessa forma, é evidente que, para atingir viabilidade econômica e atrair investidores, o sistema deve ser minuciosamente planejado, priorizando a eficiência energética. Além disso, é preferível que o sistema seja destinado ao cultivo de vegetais e peixes de alto valor agregado.

Uma estratégia interessante é aproveitar a luz natural, reduzindo a necessidade de iluminação artificial, e adotar sistemas de ventilação de baixo consumo, o que pode ser alcançado com o uso de tendas, ou estufas. Além disso, a inovação desempenha um papel fundamental, sendo essencial explorar novas formas de integração de processos, a fim de otimizar ao máximo o desempenho do sistema.

4.4 CONDIÇÕES DE CULTIVO E ACOMPANHAMENTO DO SISTEMA

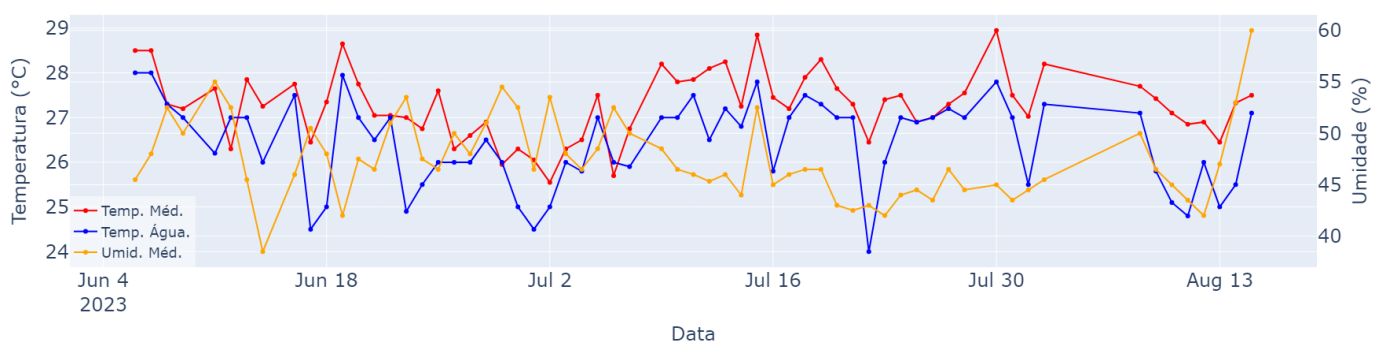
O acompanhamento das condições ambientais desempenha um papel crítico no sucesso de qualquer sistema envolvendo seres vivos. Diversas variáveis essenciais foram monitoradas de perto durante todo o experimento. Tais parâmetros

são fundamentais para compreender como o ambiente impacta o desenvolvimento das plantas e animais no sistema, bem como para garantir que as condições sejam mantidas em níveis ideais para um crescimento saudável e eficiente.

4.4.1 Temperatura e Umidade no Sistema

A partir do acompanhamento diário das temperaturas e umidade do sistema, foram estabelecidas a temperatura e umidade média no ambiente de cultivo, bem como a temperatura média da água para todo o período de estudo. Estes dados estão representados visualmente no gráfico da Figura 27, permitindo uma análise mais clara das variações ao longo do experimento e ressaltando as interações entre elas.

Figura 27 - Gráficos das Temperaturas e Umidade do sistema.



Fonte: AUTOR (2023)

A análise revela que a temperatura média na estufa se manteve em 27,28°C, enquanto a umidade média alcançou 47,42%, ambas dentro das faixas consideradas ideais para o cultivo. Em relação à água, a temperatura média registrada foi de 26,43°C, também mantendo-se dentro dos parâmetros aceitáveis. A tabela 7, apresentada abaixo, mostra os registros de máximas e mínimas para o período de operação.

Tabela 7 - Máximas e Mínimas de Temperatura e Umidade no sistema

	Máx.	Mín.
Temp. Água (°C)	28	24
Temp. Cultivo (°C)	30,7	22,7
Umidade Cultivo (%)	73	33

Fonte: AUTOR(2023)

As variações foram de 4 °C para a água e de 8 °C para o cultivo. Dentro dessa faixa, essas variações têm um impacto mínimo nos organismos do aquário. Além disso, como o clima da região se mantém estável, com valores dentro dessa faixa ao longo do ano, não é necessário investir em equipamentos adicionais para regular a temperatura.

Por outro lado, a umidade apresentou uma flutuação de 40%, o que é considerado elevado e aponta para a necessidade de um controle mais eficaz dessa variável. O gerenciamento da umidade em ambientes externos pode ser desafiador, mas em cultivos fechados, como estufas, torna-se consideravelmente mais viável. A eficácia e as estratégias para implementar esse controle, no entanto, variam de acordo com a região e seu clima.

4.4.2 Vazão da Bomba e Sistema de Sifão

O sistema aquapônico é altamente sensível às vazões da bomba e do sifão. Inicialmente, monitorava-se apenas a vazão da bomba, mas à medida que se percebeu sua influência direta na eficácia do sifão, decidiu-se explorar essa relação em detalhes.

É crucial mencionar que a eficiência de um sifão busca atingir a maior vazão possível, determinada principalmente pelo diâmetro do tubo, diferença de altura e vazão de entrada. Caso a vazão de entrada seja insuficiente, o sifão permite a entrada de ar no tubo, impedindo o acúmulo de pressão. Por outro lado, uma vazão de entrada excessiva pode equilibrar-se com a vazão do sifão em determinado ponto, à medida que a água é drenada e a diferença de altura diminui. No primeiro cenário, o nível da água permanece constantemente cheio, o que impede a entrada de oxigênio para as bactérias no filtro biológico. No outro, o nível permanece baixo, resultando na ausência de água em parte do equipamento. Essas situações comprometem a eficácia do sifão e, por conseguinte, a operação do sistema.

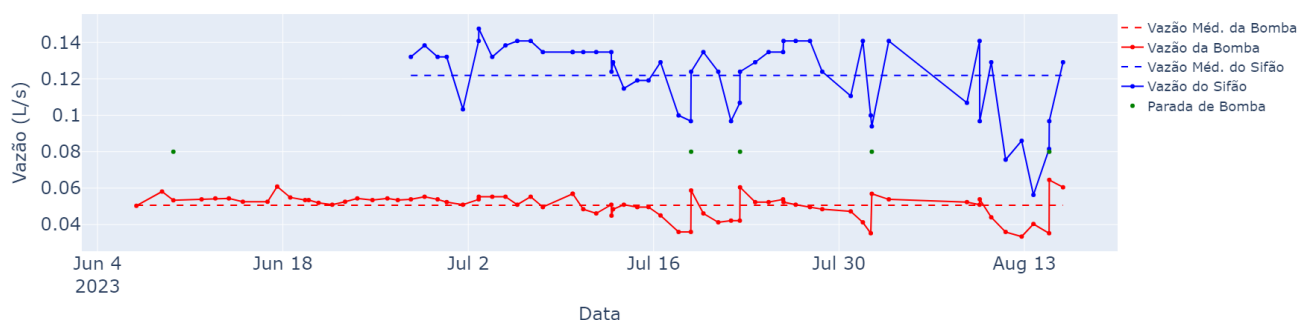
Durante todo o experimento, a vazão média do sifão foi de 7,310 L/s, enquanto a vazão média da bomba ficou registrada em 3,032 L/min. A Tabela 8, apresenta os pontos de máximo e mínimo para as vazões durante o período, e o gráfico da Figura 28, mostra a variação das vazões da bomba (em vermelho) e do sifão (em azul).

Tabela 8 - Máximas e Mínimas das vazões no sistema

	Máx.	Mín.
Vazão Bomba (L/min)	3,87	2,00
Vazão Sifão (L/min)	8,85	3,38

Fonte: AUTOR (2023)

Figura 28 - Gráficos das vazões da bomba e sifão.



Fonte: AUTOR (2023)

Uma análise detalhada do gráfico revela que, nos momentos em que a bomba foi desligada (pontos destacados em verde), tanto a vazão da bomba quanto a do sifão melhoraram consideravelmente, retornando a níveis ideais de operação. Durante o estudo, foram realizadas 5 paradas para manutenção da bomba, garantindo, assim, o funcionamento ideal do sistema aquapônico. Esta relação, se monitorada constantemente, poderia ser valiosa para a execução de manutenções preventivas, inclusive explorando a possibilidade de automação do processo, baseada simplesmente no desligamento e religamento do equipamento. Esse tipo de automação poderia otimizar ainda mais a eficiência operacional, minimizando falhas imprevistas.

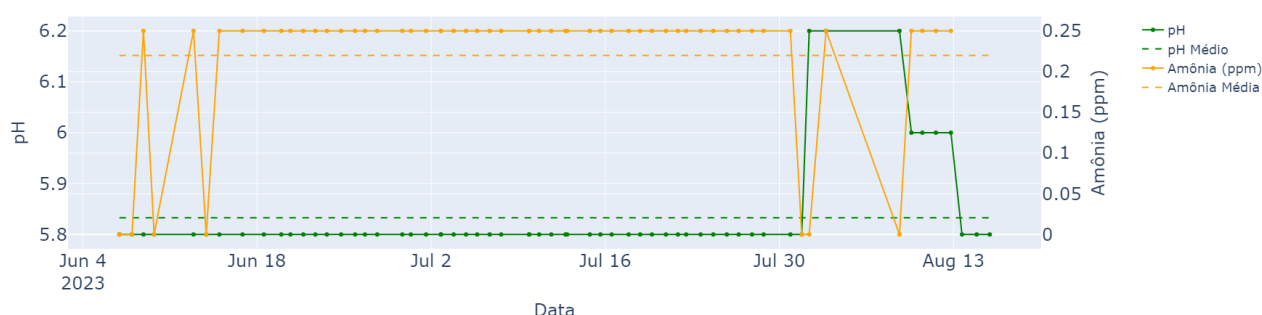
4.4.3 pH e Níveis de Amônia

O pH e os níveis de amônia foram continuamente monitorados ao longo de todo o experimento, permanecendo relativamente estáveis na maior parte do tempo.

O pH, importante indicador da acidez ou alcalinidade da água, apresentou um ligeiro desvio da faixa ideal para a aquaponia. Próximo ao final do período de acompanhamento, uma intervenção foi realizada no sistema para ajustar o pH. Um pequeno pedaço de casca de ovo, conhecida por seu efeito alcalinizante, foi adicionado. Após alguns dias, o pH aumentou para 6,2. A casca de ovo foi então removida, e em alguns dias o pH retornou aos valores normais de 5,8.

Enquanto isso, os níveis de amônia se mantiveram estáveis em torno de 0,25 ppm na maior parte da operação, mas ocasionalmente atingiram zero. O pH desempenha um papel fundamental na eficiência do filtro biológico, onde a amônia é convertida. Portanto, a variação no pH pode explicar por que os níveis de amônia não permaneceram em zero durante todo o experimento. Algumas estratégias foram testadas para alterar essa variável, como a introdução de oxigenação no filtro e ajustes na alimentação dos organismos. No entanto, essas tentativas não demonstraram impacto significativo nos níveis de amônia. O Gráfico da Figura 29, ilustra as variações de pH e amônia ao longo do tempo.

Figura 29 - Gráficos da Variação de pH e amônia.



Fonte: AUTOR (2023)

Ao analisar o gráfico, fica evidente que apenas após o ligeiro aumento do pH é que os níveis de amônia finalmente caíram até zero, após prolongado período de estabilidade. Essa observação reforça a conclusão de que o pH estava afetando o desempenho do filtro biológico e, por consequência, os níveis de amônia.

Os resultados obtidos indicam que o monitoramento regular desses parâmetros desempenhou um papel fundamental na avaliação da saúde do sistema. Durante todo o experimento, não foram observadas doenças ou problemas associados à baixa qualidade da água, visto que a maioria dos organismos parecia

saudável e bem adaptada às condições. Optou-se, portanto, por manter o pH na faixa em que se encontrava, considerando a estabilidade do sistema.

Entretanto, é importante salientar que o controle do pH pode ser desafiador quando realizado manualmente, e qualquer erro nesse processo tem o potencial de desequilibrar o sistema, demandando vários dias para correção. Nesse contexto, considerando o potencial de aprimoramento do projeto, especialmente no que se refere ao monitoramento destas e outras variáveis, como a concentração de nutrientes na água, a implementação de sensores automáticos poderia proporcionar um controle ainda mais preciso, permitindo correções imediatas e a antecipação de problemas, contribuindo para a otimização do sistema aquapônico em questão.

4.5 OTIMIZAÇÃO DO FLUXO, POSSÍVEIS MELHORIAS E CONTROLE

Ao longo deste estudo, ficou clara a interconexão de variáveis essenciais no sistema aquapônico. Notavelmente, as vazões da bomba e do sifão estão intrinsecamente ligadas, assim como a relação entre o pH e os níveis de amônia na água. Essas observações destacam a oportunidade de implementar sistemas de controle e monitoramento contínuo para aprimorar o desempenho do sistema e reduzir ainda mais as necessidades de manutenção.

No que diz respeito à bomba, uma abordagem eficaz seria monitorar sua vazão de maneira constante. Caso ela caia abaixo de um valor específico, o sistema poderia ser programado para desligá-la por alguns segundos e, em seguida, religá-la. Isso garantiria o funcionamento adequado do sifão, contribuindo para um sistema mais estável. Paralelamente, o pH da água também poderia ser continuamente monitorado e ajustado conforme necessário para manter as condições ideais para a conversão da amônia. A comunicação entre esses dois processos é crucial, pois níveis inadequados de pH podem afetar negativamente a eficiência do ciclo de nitrogênio.

Além disso, outra questão crítica que merece atenção é a gestão dos nutrientes no sistema. Embora os mesmos tenham sido adicionados de forma regular, a concentração desses elementos na água não foi monitorada de maneira adequada. Monitorar cada variável de nutrientes de forma isolada seria extremamente custoso e complexo. Uma abordagem prática para solucionar esse

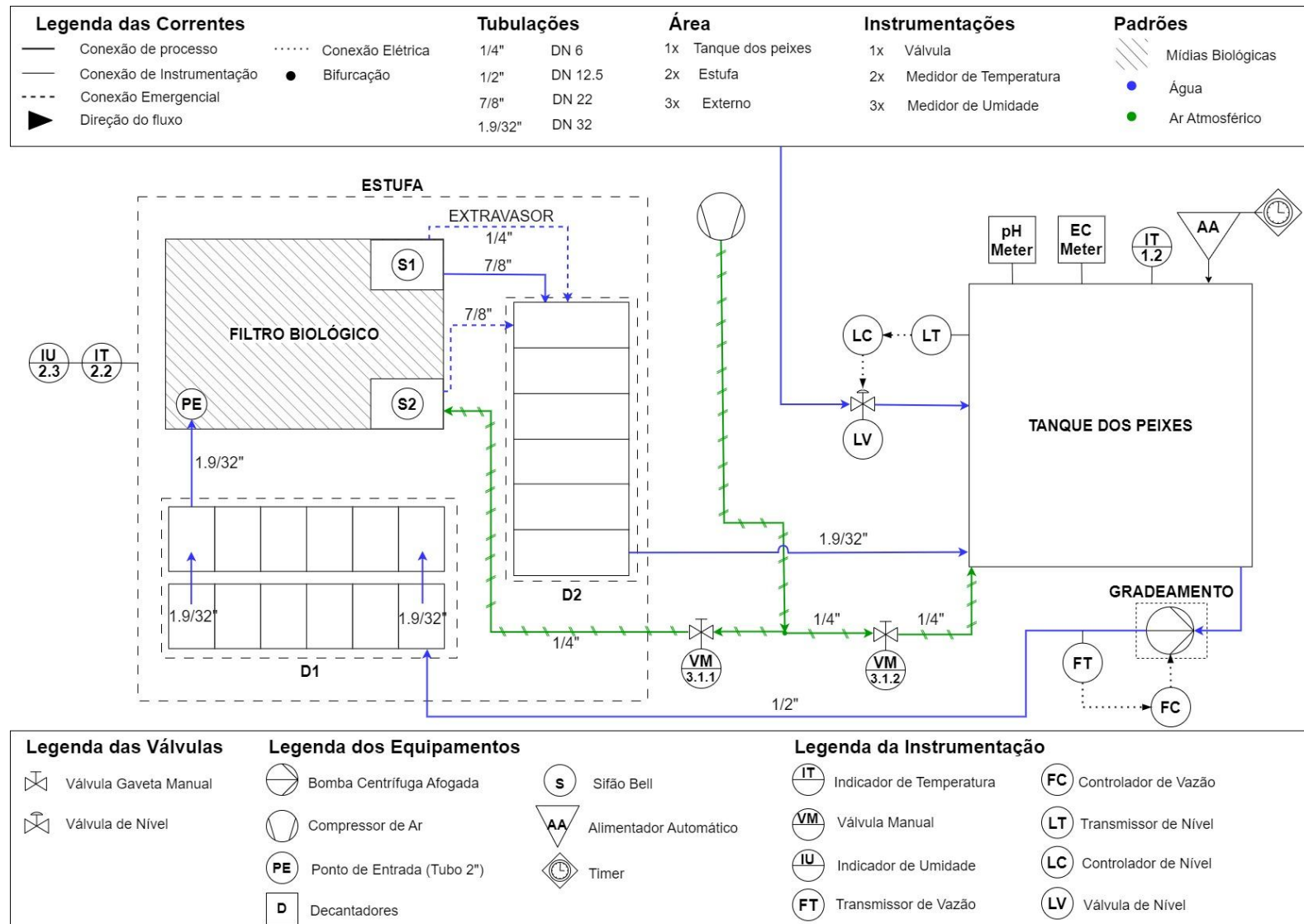
desafio seria a introdução de um sistema de monitoramento da condutividade elétrica da água, que proporcionaria uma avaliação mais abrangente da concentração de íons em solução. Em vez de medir cada composto nutricional separadamente, esse método forneceria uma visão geral do equilíbrio osmótico no sistema e da concentração total de sais na água. Dessa forma, seria possível administrar os nutrientes com maior precisão, evitando super dosagens e reduzindo o desperdício.

Uma consideração adicional, que não foi abordada no trabalho, mas é de relevância prática, envolve o acúmulo de lodo gerado pelo filtro biológico. Esse lodo, ao ser lançado no aquário, acaba por cobrir a superfície das folhas das plantas aquáticas. Embora não represente uma ameaça crítica para a saúde dos peixes, dado o caráter ornamental do projeto, seria aconselhável a implementação de um pequeno módulo de decantação após o filtro biológico. Esse módulo teria a função de separar e remover o lodo da água, otimizando assim o fluxo do processo e mantendo a estética do sistema aquapônico.

Outra melhoria relevante a ser considerada é a introdução de um sistema de alimentação ininterrupta, conhecido como *No-Break*, no sistema aquapônico. Isso se torna particularmente importante em casos de queda de energia, onde a falta de oxigenação poderia representar uma ameaça à vida dos peixes. Ainda melhor, seria a introdução de fontes de energia renovável como a solar, minimizando esse risco e ainda reduzindo o custo energético.

Por fim, a adição de controle de nível seria interessante para manter o nível do tanque sempre estável e reduzir o trabalho manual. Essas melhorias não apenas aprimorariam o desempenho operacional do sistema, mas também reforçariam sua robustez e confiabilidade em face de desafios inesperados, e o tornariam mais resiliente e autônomo a longo prazo. O novo diagrama P&ID do sistema é apresentado abaixo na Figura 30. Esse diagrama ilustra visualmente como as melhorias propostas se integrariam ao sistema, proporcionando uma visão clara de como cada componente e processo se relaciona.

Figura 30 - P&ID otimizado do processo.



Fonte: AUTOR (2023)

5 CONCLUSÃO

Considerando todas as análises e experimentos conduzidos neste estudo, é inegável que os sistemas aquapônicos desempenham um papel fundamental na busca por métodos agrícolas mais sustentáveis e eficientes. A observação das interações entre variáveis, como a vazão da bomba e do sifão, bem como a relação entre pH e amônia, destaca claramente o potencial para a implementação de sistemas de controle e monitoramento contínuo. Esses sistemas desempenham um papel crucial na otimização do desempenho, reduzindo, assim, a necessidade de manutenções constantes e aumentando a eficiência operacional.

Embora a aquaponia ofereça inúmeras vantagens ambientais, ela enfrenta desafios econômicos significativos, especialmente em relação ao custo de energia, que permanece como uma barreira financeira. Apesar das oportunidades de minimizar esse custo por meio de fontes renováveis, como a energia fotovoltaica, é imperativo buscar inovações que tornem o sistema mais acessível economicamente, atraindo investimentos e interesse do mercado.

A aquaponia demonstrou ser altamente eficaz em termos de qualidade e produtividade, bem como na utilização responsável dos recursos hídricos, destacando-se em comparação com os métodos de cultivo convencionais. Portanto, uma estratégia promissora é direcionar a produção para cultivos de alto valor agregado, nos quais a qualidade seja um fator determinante. Por exemplo, plantas medicinais e culturas de manejo mais complexo podem atrair o interesse de um mercado de alto padrão. Da mesma forma, a escolha de espécies de peixes e camarões mais valorizados, como trutas, tilápias e camarões de água doce, pode abrir oportunidades significativas no mercado, pois essas espécies são reconhecidas por seu valor gastronômico e são frequentemente procuradas por consumidores dispostos a pagar mais por produtos de qualidade superior.

Ao diversificar a produção e focar em cultivos de alta qualidade e valor agregado, é possível aumentar a rentabilidade do sistema e torná-lo mais atraente para investidores e consumidores em busca de alimentos premium. Essa abordagem estratégica pode ser a chave para superar os desafios econômicos e posicionar a aquaponia como uma solução viável e lucrativa no mercado atual.

Em resumo, a aquaponia surge como uma alternativa crucial na busca por práticas agrícolas mais limpas e sustentáveis, especialmente em condições climáticas extremas e em regiões com escassez de água, onde métodos convencionais podem não ser viáveis localmente. O futuro da aquaponia depende em grande parte da capacidade de atrair investimentos por meio de inovação e estratégias focadas na qualidade dos produtos. Portanto, à medida que continuamos a explorar soluções alimentares sustentáveis, a aquaponia permanece como uma opção valiosa e promissora na transição para um sistema alimentar mais eficiente, ecológico e capaz de atender às demandas de áreas com recursos limitados.

REFERÊNCIAS

ANTONIOILLI, Alessandro. **Sistema de monitoramento automatizado para controle de qualidade de água em sistema aquapônico**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2019.

Aquaculture: Are Fish Farms the Future? | Heinrich Böll Stiftung. Disponível em: <<https://www.boell.de/en/2017/05/30/aquaculture-are-fish-farms-future>>. Acesso em: 2 fev. 2023.

Aquaponics Monitor Update. Disponível em: <<https://fullstack-adventure.com/aquaponics-monitor-update/>>. Acesso em: 1 fev. 2023.

BRUCE, Dunn.; SINGH, Hardeep. **Electrical Conductivity and pH Guide for Hydroponics**. 2016. HLA-6722. Division of Agricultural Sciences and Natural Resources, Oklahoma State University, 2016.

CORDEIRO, M. P&ID(diagrama de tubulação e instrumentação). Disponível em: <<https://mauricioscordeiro.wixsite.com/instrumentacao/post/p-id-diagrama-de-tubulacao-e-instrumentacao#:~:text=O%20diagrama%20de%20tubulacao%20e%20instrumentacao%20%28P&ID%29%20%C3%A9%20>>. Acesso em: 2 fev. 2023.

COUNCIL, N. R.; AGRICULTURE, B. ON; POLICY, C. ON L.-R. S. AND W. C. **Soil and Water Quality: An Agenda for Agriculture**. [s.l.] National Academies Press, 1993.

DAUDA, A. B. et al. Waste production in aquaculture: Sources, components and managements in different culture systems. *Aquaculture and Fisheries*, v. 4, n. 3, p. 81–88, maio 2019.

FAO (1988). **Definition of aquaculture**, *Seventh Session of the IPFC Working Party of Experts on Aquaculture*, IPFC/WPA/WPZ, p.1-3, RAPA/FAO, Bangkok.

MANCOSU, N. et al. Water Scarcity and Future Challenges for Food Production. *Water*, v. 7, n. 12, p. 975–992, 10 mar. 2015. *Water | Free Full-Text | Water Scarcity and Future Challenges for Food Production (mdpi.com)*

Getting Started with Aquaponics: Cycling Your Fish Tank [Step by Step Guide]. Disponível em: <<https://www.leaffin.com/cycle-new-aquaponics-system/>>. Acesso em: 1 fev. 2023.

GODDEK, S. et al. Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability*, v. 7, n. 4, p. 4199–4224, 10 abr. 2015. *Sustainability | Free Full-Text | Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics (mdpi.com)*

History of aquaculture. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/ag158e/AG158E01.htm#ch1>>. Acesso em: 30 jan. 2023.

MILLER, D.; SEMMENS, K. Waste Management in Aquaculture Aquaculture Information Series Publication #AQ02-1 Extension Service ®. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://freshwater-aquaculture.extension.org/wp-content/uploads/2019/08/WasteManagementinAquaculture.pdf>>.

ONDRUŠKA, V. et al. Resource optimisation in aquaponics facility via process monitoring and graph-theoretical approach. Carbon Resources Conversion, maio 2022.

Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Disponível em: <<https://ideiasustentavel.com.br/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel/>>.

PANNIRSELVAM, Pagandai V. et al. Produção de alimentos, ração animal e de energia a partir da biomassa produzida em sisteminha embrapa; experiências do nordeste brasil, 2015.

PILLAY, T. V. R. Aquaculture and the Environment. [s.l.] John Wiley & Sons, 2008.

ROBERTO, K. How-to Hydroponics. [s.l.] Futuregarden, Inc., 2003.

SALLENAVE, Rossana. **Important Water Quality Parameters in Aquaponics Systems**. 2016. Circular 680.p.5-6. Extension Aquatic Ecology Specialist, Department of Extension Animal Sciences and Natural Resources, New Mexico State University, 2016.

VERMEULEN, A. C. J. et al. What horticulture and space exploration can learn from each other: The Mission to Mars initiative in the Netherlands. Acta Astronautica, v. 177, p. 421–424, dez. 2020. What horticulture and space exploration can learn from each other: The Mission to Mars initiative in the Netherlands - ScienceDirect

Worldometer - Estatísticas mundiais em tempo real. Disponível em: <<https://www.worldometers.info/pt/>>. Acesso em: 22 jan. 2023.

World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision | Agrifood Economics | Food and Agriculture Organization of the United Nations (fao.org) (ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. WORLD AGRICULTURE TOWARDS 2030/2050: The 2012 Revision. Acesso em: 22 jan. 2023.)

YANES, A. R.; MARTINEZ, P.; AHMAD, R. Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems. Journal of Cleaner Production, v. 263, p. 121571, 1 ago. 2020.

HIMMELBLAU, D. M. Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering. Pearson. 2017.

SEIDER, W. D.; SEADER, J. D.; LEWIN, D. R.; WIDAGDO, S. & GANI, R. Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis, and Evaluation. John Wiley & Sons. 2017.