



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

WILLIAN RODRIGUES XAVIER

**FABRICAÇÃO DIGITAL EM SISTEMAS DE AQUAPONIA**

TUCURUÍ

2024

WILLIAN RODRIGUES XAVIER

**FABRICAÇÃO DIGITAL EM SISTEMAS DE AQUAPONIA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Orientador:  
Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma.

TUCURUÍ

2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

X3f Xavier, Willian Rodrigues.  
Fabricação digital em sistemas de aquaponia / Willian  
Rodrigues Xavier. — 2025.  
49 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma  
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do  
Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia  
Elétrica, Tucuruí, 2025.

1. Aquaponia; fabricação digital; automação; ESP32.. I.  
Título.

CDD 620

---

Willian Rodrigues Xavier

## FABRICAÇÃO DIGITAL EM SISTEMAS DE AQUAPONIA

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Data de aprovação: 13 de março de 2025.

### Banca Examinadora:

---

**Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma**  
Orientador - FEE/CAMTUC/UFPA

---

**Prof. Dr. membro 1**  
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

---

**Prof. Dr. membro 2**  
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

TUCURUÍ

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

<b>Título</b>	FABRICAÇÃO DIGITAL EM SISTEMA DE AQUAPONIA
<b>Discente</b>	Willian Rodrigues Xavier
<b>Matrícula</b>	201933940022

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	André Felipe Souza da Cruz (CAMTUC/UFPA)	Examinador interno
2	Cleison Daniel Silva (CAMTUC/UFPA)	Examinador interno
3	Rafael Suzuki Bayma (CAMTUC/UFPA)	Orientador

Data da Defesa: 13/03/2025	Hora Início: 15:08	Hora Término: 15:49
----------------------------	--------------------	---------------------

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)			
Critério	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Formatação	9,0	9,0	9,0
Linguagem (gramática e semântica)	9,0	9,5	8,5
Conteúdo técnico	9,8	9,5	9,5
<b>Média</b>	<b>9,3</b>	<b>9,3</b>	<b>9,0</b>

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)			
Critério	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Sequência lógica de apresentação	9,0	10,0	9,5
Administração do tempo	10,0	10,0	10,0
Expressão oral	9,5	9,0	9,0
Domínio do tema	9,5	9,8	10,0
<b>Média</b>	<b>9,5</b>	<b>9,7</b>	<b>9,6</b>

<b>Média por examinador</b>	9,4	9,5	9,3
<b>Média Final</b>	<b>9,4</b>		
<b>Conceito Final</b>	<b>EXC</b>		

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ANDRE FELIPE SOUZA DA CRUZ  
Data: 13/03/2025 16:48:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

André Felipe Souza da Cruz  
*Membro*

Cleison Daniel Silva  
*Membro*

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RAFAEL SUZUKI BAYMA  
Data: 13/03/2025 16:45:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rafael Suzuki Bayma  
*Orientador*

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** CLEISON DANIEL SILVA  
Data: 14/03/2025 08:52:51-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dedico este trabalho aos meus pais, Messias Xavier e Keila Xavier, pelo apoio incondicional, incentivo e dedicação ao longo de toda a minha trajetória. Seus ensinamentos e exemplos de perseverança foram fundamentais para que eu alcançasse esta conquista.

## AGRADECIMENTOS

Finalmente chegou o momento de preparar minha carta de agradecimento a todos que me ajudaram a concluir mais um passo importante da minha carreira acadêmica.

Inicialmente, agradeço a Deus, que me deu forças e iluminação em cada momento dessa jornada. Aos meus familiares, deixo minha eterna gratidão: meus pais, Messias Xavier e Keila Xavier, por seu amor, apoio incondicional e ensinamentos valiosos; meus irmãos, Wellington e Kedna, que sempre estiveram ao meu lado; meus avós, Benedita Araújo e Domingos Rodrigues, que foram exemplos de dedicação e sabedoria; e à minha noiva, Amanda Reis, por sua compreensão, carinho e apoio constante. Não poderia deixar de agradecer também a todos os meus tios, que me apoiaram em todos os instantes da minha trajetória. Minha gratidão é imensurável.

Agradeço à Superintendência de Assistência Estudantil (SAEST) pelo suporte financeiro que recebi como bolsista do projeto, o qual foi essencial para a realização desta pesquisa. À equipe do Laboratório de Fabricação Digital (FABLAB), expresso minha gratidão pelo apoio e por terem acolhido o desenvolvimento deste trabalho.

Quero também manifestar meu profundo respeito e gratidão ao professor Rafael S. Bayma, que foi mais do que um orientador: foi um mentor e uma fonte constante de inspiração ao longo da minha trajetória acadêmica. Agradeço a todo o corpo docente, cujos ensinamentos valiosos serão fundamentais para minha carreira profissional.

É com grande alegria que agradeço aos meus amigos Fredson C. Júnior, Joanes Martins, Júlio Cesar, Angelo Aragão e Yuri Cota. Ter vocês como amigos durante esta jornada acadêmica foi um grande privilégio e apoio.

Por fim, deixo meu agradecimento aos meus amigos e colegas de pesquisa, que estiveram comigo no desenvolvimento deste projeto: Mizael A. Silva, Ryan Sousa, Davi Barroso, Ingrid Luna e Jonatas. Trabalhar ao lado de vocês foi uma experiência enriquecedora e gratificante.

Toda a minha trajetória foi abençoada pela presença e apoio de cada um de vocês, e este texto é apenas uma pequena demonstração da minha gratidão. Obrigado por fazerem parte dessa conquista.

## RESUMO

Neste trabalho, apresentamos o relatório de estágio desenvolvido entre março e julho de 2023, no âmbito do estágio supervisionado, sob orientação do professor Dr. Rafael Suzuki Bayma. O documento foi elaborado em conformidade com a Resolução nº 1/2024 da Faculdade de Engenharia Elétrica - CAMTUC, que regulamenta a flexibilização do Trabalho de Conclusão de Curso, conforme a IN nº 5/2023 da PROEG-UFPA. Este estudo aborda o desenvolvimento e a implementação de um sistema completo de aquaponia, integrando técnicas de fabricação digital e automação para otimizar o cultivo de hortaliças e a criação de peixes em um ambiente simbiótico. O projeto foi concebido utilizando processos de fabricação digital, como corte a laser, impressão 3D e fresagem CNC, permitindo a produção de componentes personalizados com alta precisão e modularidade. A automação do sistema foi implementada com o microcontrolador ESP32, viabilizando o monitoramento e controle de variáveis críticas, incluindo nível da água, alimentação dos peixes e irrigação das plantas. Os resultados obtidos demonstram que a aplicação de tecnologias de automação, aliada à fabricação digital, aprimora a eficiência e a confiabilidade do sistema, reduzindo desperdícios e aumentando sua sustentabilidade. Além disso, o trabalho contribui para estudos e soluções tecnológicas voltadas à engenharia aplicada, fornecendo uma base para pesquisas sobre a integração de sistemas inteligentes em processos agroindustriais.

**Palavras-chave:** Aquaponia; fabricação digital; automação; ESP32.

## ABSTRACT

In this work, we present the internship report developed between March and July 2023 as part of the supervised internship, under the guidance of teacher Dr. Rafael Suzuki Bayma. The document was prepared in accordance with Resolution No. 1/2024 of the Faculty of Electrical Engineering - CAMTUC, which regulates the flexibility of the Undergraduate Thesis, as established by IN No. 5/2023 of PROEG-UFPA. This study addresses the development and implementation of a complete aquaponics system, integrating digital manufacturing techniques and automation to optimize vegetable cultivation and fish farming in a symbiotic environment. The project was designed using digital manufacturing processes, such as laser cutting, 3D printing, and CNC milling, enabling the production of customized components with high precision and modularity. The system automation was implemented using the ESP32 microcontroller, allowing the monitoring and control of critical variables, including water level, fish feeding, and plant irrigation. The results obtained demonstrate that the application of automation technologies, combined with digital manufacturing, enhances the system's efficiency and reliability, reducing waste and increasing sustainability. Furthermore, this work contributes studies and technological solutions in applied engineering, providing a foundation for research on the integration of intelligent systems in agro-industrial processes.

**Keywords:** aquaponics; digital manufacturing; automation; ESP32.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Visão geral dos elementos fundamentais da aquaponia. . . . .	11
Figura 2 – Sistema hidropônico. . . . .	15
Figura 3 – Componentes biológicos de um sistema aquapônico. . . . .	17
Figura 4 – Representação das etapas de impressão 3D ou AM. . . . .	18
Figura 5 – Esquemático máquina corte a laser. . . . .	19
Figura 6 – Representação das etapas de impressão 3D ou AM. . . . .	19
Figura 7 – Representação fresadora cnc. . . . .	20
Figura 8 – Esp32 WROON-32 38 pinos. . . . .	22
Figura 9 – Diagrama de um sensor indutivo. . . . .	24
Figura 10 – Sensor capacitivo: representação da atuação. . . . .	25
Figura 11 – Sensor magnético com contatos abertos e contatos fechados. . . . .	26
Figura 12 – Estrutura simplificada de um relé. . . . .	27
Figura 13 – Atração dos contatos tipo NA. . . . .	27
Figura 14 – Atração dos contatos tipo NF. . . . .	28
Figura 15 – Tipos de comutação relé. . . . .	28
Figura 16 – Visão geral dos elementos fundamentais da aquaponia. . . . .	29
Figura 17 – Etapas de fabricação do projeto. . . . .	32
Figura 18 – Construção do protótipo inicial do aquário. . . . .	32
Figura 19 – Processo de fabricação dos aquários. . . . .	33
Figura 20 – Hastes de sustentação das tubulações. . . . .	33
Figura 21 – Fabricação da conexão entre as tubulações. . . . .	34
Figura 22 – Sistema hidroponico montado. . . . .	34
Figura 23 – Sistema de funcionamento da cisterna. . . . .	35
Figura 24 – Fabricação da cisterna retangular. . . . .	36
Figura 25 – Fase final cisterna. . . . .	36
Figura 26 – Fase inicial do decantador. . . . .	37
Figura 27 – Decantador. . . . .	37
Figura 28 – Projeto da placa de circuito impresso. . . . .	38
Figura 29 – Processo de fabricação da PCB fresa. . . . .	39
Figura 30 – Fabricação quadro de comando completo. . . . .	39
Figura 31 – Sistema de aquaponia completo. . . . .	40
Figura 32 – Sensores e atuadores do aquário. . . . .	41
Figura 33 – Lógica do sistema de automação. . . . .	43

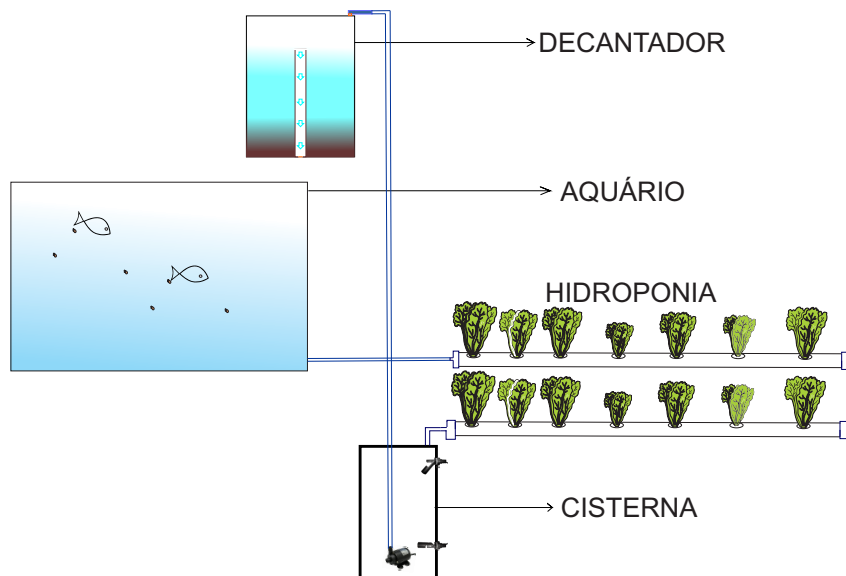
## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>TEXTO DE APRESENTAÇÃO</b>	<b>11</b>
	<b>ANEXO A – IMPLEMENTAÇÃO DA FABRICAÇÃO DIGITAL EM SISTEMA DE AQUAPONIA</b>	<b>14</b>
<b>A.1</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>14</b>
A.1.1	Princípios e aplicações da hidroponia	14
A.1.2	Integração da piscicultura com hidroponia	15
A.1.3	Fabricação digital	17
A.1.3.1	Impressora 3D	17
A.1.3.2	CNC corte a laser	18
A.1.3.3	Fresadora CNC de circuito impresso	20
A.1.4	Placa controladora ESP32	21
A.1.4.1	Pinos com sinal PWM ( <i>Pulse Width Modulation</i> )	22
A.1.4.2	Pinos DAC	23
A.1.4.3	Pinos ADC	23
A.1.5	Princípios de funcionamento de sensores	23
A.1.6	Relé eletromecânico	26
<b>A.2</b>	<b>JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS</b>	<b>28</b>
<b>A.3</b>	<b>PROCESSOS E ATIVIDADES</b>	<b>29</b>
A.3.1	Treinamentos	30
A.3.2	Trabalho e gestão de equipe	31
A.3.3	Processos de fabricação do sistema aquapônico	31
A.3.4	Etapa 1: fabricação dos aquários	31
A.3.5	Etapa 2: desenvolvimento do sistema de hidroponia	33
A.3.6	Etapa 3: construção da cisterna	35
A.3.7	Etapa 4: construção do decantador	36
A.3.8	Etapa 5: fabricação da placa de comando principal	38
A.3.9	Etapa 6: fabricação do quadro de comando	39
A.3.10	Resultados da montagem completa do sistema de aquaponia	40
A.3.11	Automação do sistema	40
<b>A.4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>45</b>
<b>A.5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>46</b>
	<b>Referências</b>	<b>48</b>

## 1 TEXTO DE APRESENTAÇÃO

A base de um sistema de aquaponia consiste na interação simbiótica entre peixes e plantas. Neste sistema, os peixes fornecem nutrientes essenciais às plantas através de seus resíduos fisiológicos, que contêm substâncias ricas em nitrogênio. Esses resíduos são transformados em formas utilizáveis pelas plantas por bactérias benéficas, que atuam como um sistema de filtragem natural. À medida que as plantas absorvem os nutrientes, a água é purificada e devolvida ao tanque de peixes, criando assim um ciclo altamente eficiente (JORDAN et al., 2018).

Figura 1 – Visão geral dos elementos fundamentais da aquaponia.



Fonte: Autor, (2023).

Com base nesse princípio, foi desenvolvido um sistema automatizado de aquaponia. Para isso, foi realizado um estudo abrangente sobre a cultura da aquaponia, complementado pela aplicação de técnicas de fabricação digital para produzir os componentes essenciais do projeto. O sistema abrange diversos elementos fundamentais, como um aquário, uma estrutura de hidroponia para o cultivo de hortaliças, uma cisterna para armazenar a água livre de nutrientes, um decantador para separar materiais sólidos da água e um quadro de comando para abrigar o sistema eletrônico de controle e potência desenvolvido especificamente para o projeto. A concepção e integração desses componentes consolidaram as atividades-chave necessárias para a constituição do sistema de aquaponia, conforme ilustrado na figura 1

O presente trabalho foi concebido com objetivo de desenvolver um sistema de aquaponia durante o período de um projeto feito junto a Superintendência de Assistência Estudantil (SAEST/UFPA), com início em 2022 no FABLAB - Laboratório de Fabricação

Digital do Campus Universitário de Tucuruí da Universidade Federal do Pará.

No período de março a julho de 2023, realizei um estágio acadêmico no FABLAB, com plano de trabalho definido para atender os objetivos de fabricação digital das partes funcionais do sistema de aquaponia proposto. O estágio acadêmico foi realizado com a supervisão do Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma, coordenador do Laboratório. Para construção desse sistema automatizado, foram utilizadas máquinas CNC para construção de componentes físicos, alinhado com linguagens de programação que permitiram a automatização do sistema por meio de microcontroladores devidamente conectados em circuitos eletrônicos, fabricados no laboratório. A partir dessa atividade acadêmica, foi produzido o relatório de estágio que é apresentado na próxima seção.

Para dar início ao processo de fabricação, foi necessário adquirir conhecimentos em softwares de apoio, como programas para modelagem 2D e 3D, realizar treinamentos para o manuseio de máquinas CNC (Controle Numérico por Computador) e utilizar programas voltados para simulação e prototipagem de placas de circuitos eletrônicos.

Durante a execução das atividades, diversos desafios foram enfrentados em diferentes etapas do projeto, exigindo ajustes e aprimoramentos para garantir a eficiência do sistema. O principal obstáculo esteve relacionado à concepção de um circuito fechado de reutilização da água, garantindo que todo o volume circulasse continuamente até retornar ao aquário sem desperdícios ou falhas no fluxo. Para superar essa dificuldade, foi necessário um planejamento detalhado do sistema hidráulico, levando em consideração a vazão das bombas, a inclinação das tubulações e a minimização de pontos de obstrução.

Além disso, no processo de automação, surgiram dificuldades devido à seleção incorreta dos pinos da placa controladora ESP32, o que comprometeu o funcionamento de sensores e atuadores. Como consequência, foi necessário revisar o mapeamento dos pinos e reconfigurar as conexões elétricas para assegurar a estabilidade do sistema, garantindo que todos os componentes eletrônicos operassem de maneira integrada e eficiente.

Paralelamente, a modelagem 2D e 3D também representou um desafio significativo, uma vez que demandou um intenso aprendizado sobre softwares de CAD para a criação precisa das peças. Esse processo foi fundamental para a fabricação digital dos componentes, pois qualquer erro na modelagem poderia comprometer a montagem final do sistema. Somado a isso, a operação das máquinas de fabricação digital, como impressoras 3D, cortadoras a laser e fresadoras CNC, exigiu não apenas conhecimento técnico específico, mas também prática para otimizar os parâmetros de corte e impressão, assegurando a qualidade das peças fabricadas.

Após a fabricação dos componentes físicos, a etapa de montagem revelou novos desafios, principalmente no que diz respeito ao encaixe adequado das peças e à vedação eficiente dos reservatórios e tubulações. Para lidar com essas dificuldades, foi necessário

empregar técnicas especiais de ajuste, como o uso de selantes apropriados e a realização de testes de estanqueidade, garantindo que não houvesse vazamentos e que o sistema funcionasse conforme projetado.

Dessa forma, superar esses desafios foi essencial para o desenvolvimento do sistema, promovendo um aprendizado significativo em automação, modelagem digital e técnicas de fabricação. Além disso, as dificuldades enfrentadas contribuíram para a melhoria contínua do projeto, proporcionando um sistema mais robusto e confiável, alinhado aos princípios da engenharia aplicada.

O trabalho em questão foi apresentado como parte integrante do Trabalho de Conclusão de Curso, por meio de uma estratégia de flexibilização, definida pela INSTRUÇÃO NORMATIVA N<sup>o</sup> 05/2023 – PROEG/UFPA, e a utilização do trabalho com o objetivo proposto, tem autorização dos demais autores e coordenadores do trabalho original, como declarado na autorização em anexo, e anuência do colegiado da Faculdade de Engenharia Elétrica.

## ANEXO A – IMPLEMENTAÇÃO DA FABRICAÇÃO DIGITAL EM SISTEMA DE AQUAPONIA

### A.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O sistema de aquaponia combina processos distintos, integrando o cultivo de hortaliças com a criação de peixes em um modelo sustentável. Essa interação, conhecida como aquaponia, baseia-se no princípio da simbiose, onde ambos os sistemas se beneficiam mutuamente. Para a implementação desse sistema, foram utilizadas técnicas de fabricação digital, garantindo sua concepção e produção de forma eficiente e completo.

#### A.1.1 Princípios e aplicações da hidroponia

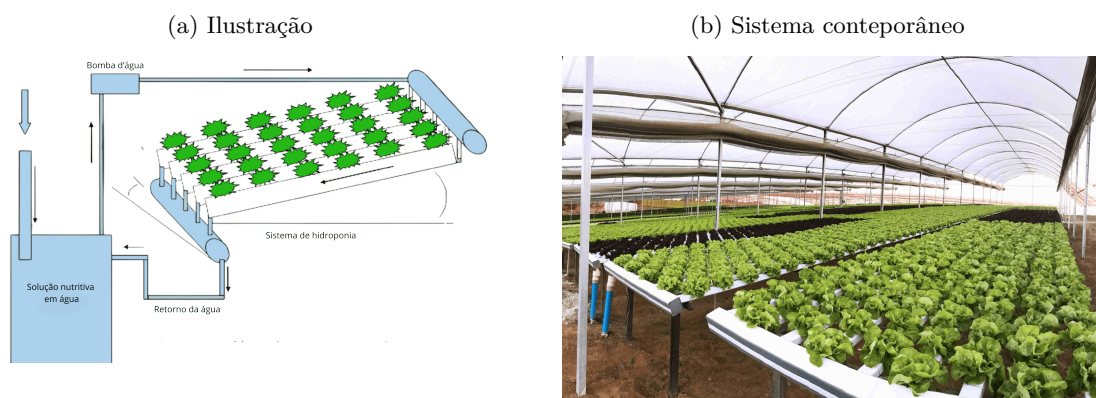
No sistema convencional de cultivo de hortas, os produtores optam por regiões ou épocas de plantio que são mais favoráveis para a cultura que desejam explorar. Essa prática leva à regionalização ou sazonalidade das produções, o que, por sua vez, impacta a regularidade no abastecimento. Esse processo pode ser influenciado por diversos fatores, como a qualidade do solo, sua composição química, além de interferências climáticas que afetam a absorção adequada dos nutrientes pelas plantas (CARRIJO et al., 2000).

É nesse contexto que a hidroponia surge com uma alternativa promissa. Esse método de cultivo dispensa o uso do solo, utilizando uma solução nutritiva em água composta por macronutrientes, como carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), enxofre (S) e magnésio (Mg), além de micronutrientes essenciais, como ferro (Fe), cloro (Cl), manganês (Mn), boro (B), zinco (Zn) e molibdênio (Mo). As soluções hidropônicas possuem proporções bem definidas desses elementos e os disponibilizam na forma iônica, com exceção de C, H e O, que são absorvidos diretamente do ar e da água. Esse sistema proporciona vantagens significativas em relação ao cultivo tradicional, promovendo maior eficiência na absorção de nutrientes e no desenvolvimento das plantas (RESH, 2022).

A hidroponia permite um controle preciso do ambiente de cultivo, eliminando variáveis do solo e garantindo condições ideais para o desenvolvimento das plantas durante todo o ano. Seu principal diferencial está na eficiência no uso da água, que é recirculada no sistema, reduzindo desperdícios e tornando a produção mais sustentável. Assim, essa técnica surge como uma solução eficaz para os desafios do cultivo convencional de hortaliças (JORDAN et al., 2018).

O cultivo hidropônico em sistemas fechados, como o NFT (*Nutrient Film Technique*), oferece diversas vantagens para a produção de hortaliças de folhas e raízes curtas, como alface, rúcula e espinafre. Nesse sistema, a solução nutritiva circula continuamente sobre

Figura 2 – Sistema hidropônico.



Fonte: (ECOEFICIENTE, 2019).

as raízes das plantas em tubulações, garantindo um fornecimento constante de nutrientes e água, conforme ilustrado na figura 2.

Conforme (CARRIJO et al., 2000), o NFT é particularmente adequado para espécies de pequeno porte e ciclo curto, devido à sua eficiência no uso de água e nutrientes. No entanto, outros sistemas como o DFT (*Deep Flow Technique*), a aeroponia e o cultivo em substrato também podem ser utilizados, cada um com suas características e aplicações específicas.

O DFT, por exemplo, consiste em um reservatório com solução nutritiva onde as plantas são flutuantes. A aeroponia, por sua vez, utiliza a nebulização da solução nutritiva sobre as raízes expostas ao ar. Já o cultivo em substrato combina elementos da hidroponia com o uso de um substrato inerte para sustentar as plantas.

#### A.1.2 Integração da piscicultura com hidroponia

A piscicultura refere-se à atividade de criação de peixes, que pode ser conduzida de forma natural, com controle parcial ou por meio de manejo totalmente mediado pela ação humana. Seu objetivo engloba o desenvolvimento, a reprodução e a colheita de peixes, atendendo a diversos propósitos. Ao longo do tempo, foram desenvolvidos diferentes sistemas de criação, cada um adequado a contextos e objetivos específicos. De acordo com (LIMA, 2013), três sistemas principais de piscicultura são amplamente reconhecidos:

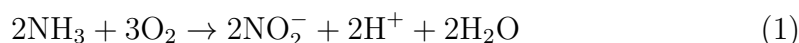
- Extensivo: Uso de corpos d'água naturais, sem manejo significativo, onde os peixes dependem exclusivamente dos recursos naturais.
- Semi-intensivo: Combina fertilização do corpo d'água para aumentar a produtividade natural e alimentação complementar com ração, geralmente em viveiros escavados.
- Intensivo: Requer manejo rigoroso e monitoramento constante, com cultivo em tanques ou viveiros, demandando trocas regulares de água e controle de parâmetros como amônia, pH, temperatura e oxigênio dissolvido para maximizar a produtividade.

No sistema de piscicultura intensiva, é essencial monitorar regularmente a qualidade da água, realizando trocas mais frequentes para tratar o excesso de amônia ( $\text{NH}_3$ ), que se acumula devido ao considerável volume de resíduos liberados pelos peixes, provenientes tanto da alimentação, quanto dos processos metabólicos. Além disso, o monitoramento diário de parâmetros como temperatura, transparência da água, pH e oxigênio dissolvido, aliado a verificações periódicas de compostos como amônia, nitrito e nitrato, é crucial para o sucesso dessa técnica, conforme destacado por (LIMA, 2013).

Diante dos desafios da piscicultura intensiva e semi-intensiva, a integração com a hidroponia surge como uma solução sustentável e eficiente. Essa abordagem, chamada aquaponia, cria um ciclo sinérgico entre água, peixes e plantas, promovendo benefícios mútuos e equilíbrio ecológico (CARNEIRO et al., 2018). Segundo (SANTOS, 2023) Um dos elementos essenciais desse sistema é a ação das bactérias nitrificantes, que convertem a amônia ( $\text{NH}_3$ ) excretada pelos peixes em compostos assimiláveis pelas plantas, como nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). As bactérias do gênero *Nitrosomonas* realizam a oxidação da amônia em nitrito, enquanto as *Nitrobacter* convertem o nitrito em nitrato, menos tóxico e essencial para o crescimento vegetal. Esse processo de nitrificação ocorre em duas etapas:

1. Oxidação da amônia ( $\text{NH}_3$ ) a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ):

- A bactéria *Nitrosomonas* converte a amônia ( $\text{NH}_3$ ) em nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) por meio da reação:



- Esse processo consome oxigênio e gera íons hidrogênio ( $\text{H}^+$ ), reduzindo o pH da água.

2. Conversão do nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) em nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ):

- A bactéria *Nitrobacter* converte o nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) em nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), menos tóxico para os peixes e essencial para as plantas:

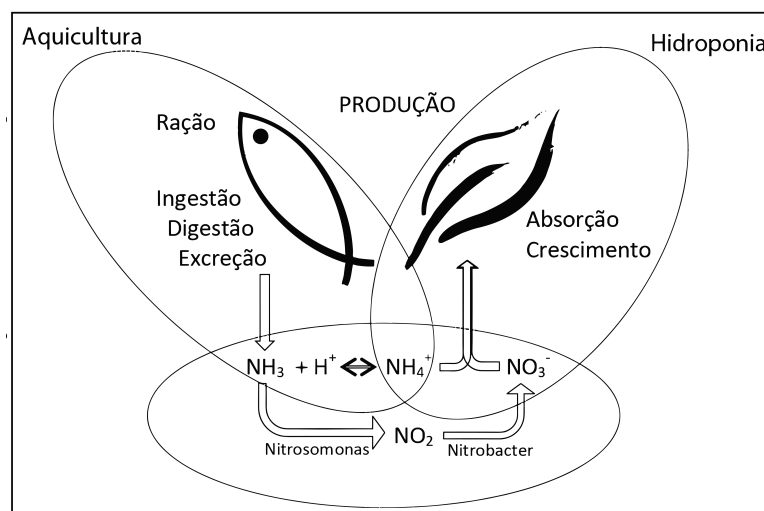


Esse ciclo biológico é essencial para manter a qualidade da água no sistema de aquaponia, garantindo um ambiente saudável para os peixes e fornecendo nutrientes para as plantas.

Ao absorverem esses nutrientes, as plantas, em colaboração com as bactérias, cumprem uma função essencial na filtragem biológica da água. Esse mecanismo não apenas assegura a qualidade da água para o desenvolvimento saudável dos peixes, mas também cria um ambiente ideal para o crescimento das plantas. Tal relação simbiótica

fundamenta o funcionamento da aquaponia, onde todos os organismos envolvidos se beneficiam mutuamente, como destacado por (JORDAN et al., 2018). A dinâmica desse sistema é representada na figura 3.

Figura 3 – Componentes biológicos de um sistema aquapônico.



Fonte: (CARNEIRO et al., 2018).

Assim, o sistema natural de simbiose inspira o modelo aquapônico, que se baseia em ciclos biológicos naturais para estabelecer um fluxo contínuo de nutrientes e recursos (JORDAN et al., 2018).

Com base nisso, o projeto foi desenvolvido utilizando técnicas de fabricação digital para conceber e produzir as diferentes etapas de um sistema de aquaponia.

### A.1.3 Fabricação digital

Após entender a metodologia do processo de aquaponia, foi necessário realizar estudos voltados para a fabricação digital com o objetivo de desenvolver um sistema básico funcional. Segundo (GERSHENFELD, 2012), o termo “fabricação digital” refere-se a processos que utilizam máquinas controladas por computador, isto é, máquinas de comando numérico computadorizado (CNC) capazes de interpretar arquivos de CAD (Desenho Assistido por Computador) da sigla do inglês (*computer-aided design*), traduzindo-os em coordenadas para a fabricação do objeto, seja por adição ou subtração de material.

#### A.1.3.1 Impressora 3D

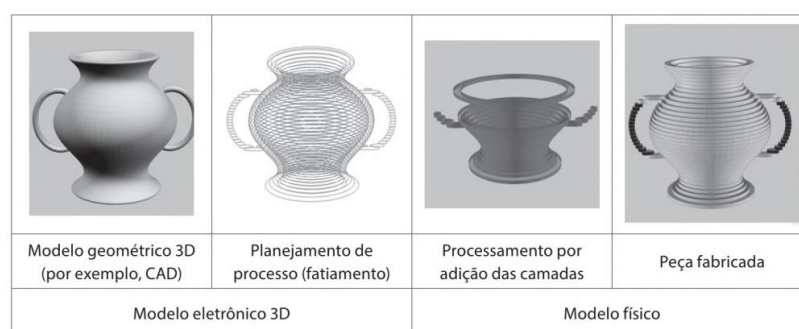
A AM (*Additive Manufacturing*) pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente, como ilustrado na figura 4. Normalmente, essa representação é na forma de um modelo geométrico 3D originado de um sistema CAD. Esse processo aditivo permite fabricar componentes

físicos a partir de vários tipos de materiais, em diferentes formas e a partir de diversos princípios. O processo de construção é totalmente automatizado e ocorre de maneira relativamente rápida, se comparado aos meios tradicionais de fabricação (VOLPATO, 2021).

O processo tem início com o modelo 3D da peça sendo fatiado eletronicamente, obtendo-se as curvas de nível 2D que definirão, em cada camada, onde será ou não adicionado material. A peça física é, então, gerada por meio do empilhamento (e da adesão) sequencial das camadas, iniciando na base até atingir o seu topo, conforme ilustra a figura 4. De uma forma geral e mais detalhada, as etapas do processo compreendem:

1. A modelagem tridimensional, na qual se gera um modelo geométrico 3D da peça, utilizando, por exemplo, um sistema CAD;
2. A obtenção do modelo geométrico 3D em um formato específico para AM, geralmente representado por uma malha de triângulos em um padrão adequado, como STL (*STereoLithography*) ou AMF (*Additive Manufacturing Format*), entre outros;
3. O planejamento do processo para a fabricação por camadas, incluindo o fatiamento, a definição de estruturas de suporte e as estratégias de deposição de material;
4. A fabricação da peça no equipamento.

Figura 4 – Representação das etapas de impressão 3D ou AM.



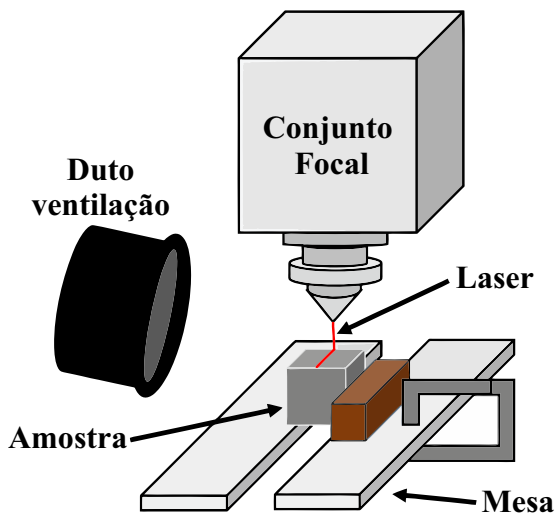
Fonte: (VOLPATO, 2021).

#### A.1.3.2 CNC corte a laser

Nas máquinas CNC de corte a laser o sistema é composto por um gás misto de CO<sub>2</sub>, que opera principalmente na região espectral do infravermelho médio (3–30 μm) e possui um comprimento de onda de 10,6 μm. Sua eficiência de conversão é relativamente alta, e o calor gerado pode ser rapidamente dissipado para fora da região de ganho por meio de convecção ou radiação. Dessa forma, a potência média de saída pode atingir níveis elevados (acima de 10 kW), atendendo aos requisitos de processamento à laser de alta potência (SEO; LEE; PYO, 2020).

Essas máquinas são capazes de cortar materiais tais como metálicas e madeira, acrílico, polipropileno (PP) e polimetilmetacrilato (PMMA) (HE et al., 2022).

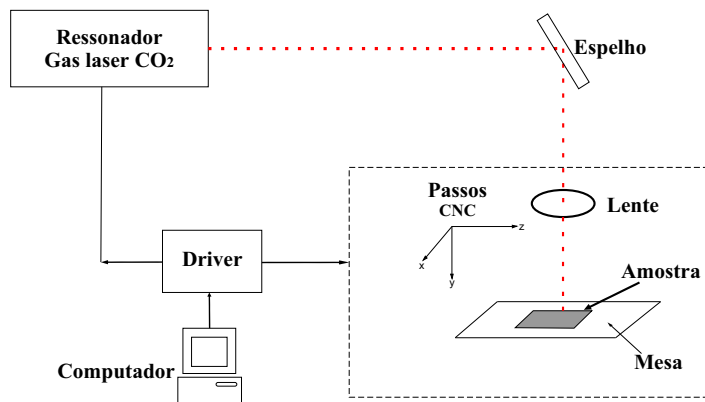
Figura 5 – Esquemático máquina corte a laser.



Fonte: Adaptado de (SEO; LEE; PYO, 2020).

Em sistemas laser de CO<sub>2</sub> uma coluna de luz de altíssima intensidade que viaja no ressonador laser, o qual cria o feixe, é refletida por espelhos até o conjunto focal composto de um bico com uma lente especial ou por um espelho curvo, conforme ilustra a figura 6 e figura 5.

Figura 6 – Representação das etapas de impressão 3D ou AM.



Fonte: Adaptado de (TAHIR et al., 2012).

Segundo (GERCK; LIMA, 1997), tais sistemas são compostos por uma mesa posicionadora, onde a peça de trabalho é apoiada e/ou fixada, e uma sistema de controle CNC. A unidade (driver) controla conjuntos responsáveis por monitorar as funções dos componentes cinemáticos (movimentos da mesa e do bico de corte à laser) nas coordenadas (X, Y, Z) do plano cartesiano.

Todo esse controle é realizado por meio de programas instalados na memória de leitura do driver CNC, que executam tarefas específicas de corte. Esse processo é ilustrado na figura 6.

### A.1.3.3 Fresadora CNC de circuito impresso

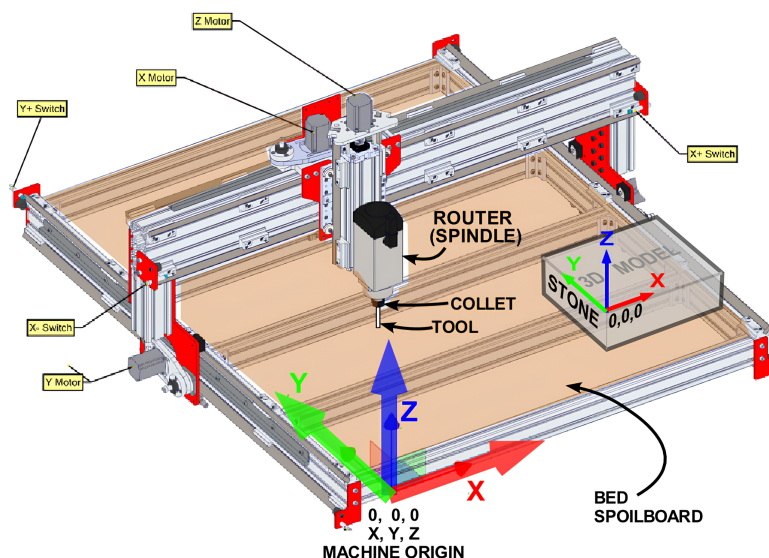
Para a prototipagem de circuitos impressos, métodos tradicionais, como a corrosão ácida utilizando perclorato férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), são amplamente empregados, no entanto, esses processos apresentam riscos significativos, como queimaduras químicas, problemas respiratórios e a geração de resíduos tóxicos, e também podem causar contaminação ambiental (AVANZI, 2024).

Diante desses desafios, surge o método de fresagem de circuitos utilizando fresadoras CNC, que apresenta diversas vantagens, como rapidez, segurança e eficiência para a produção de circuitos impressos. Além disso, elimina a necessidade do uso de produtos químicos agressivos, tornando-se uma alternativa mais limpa e sustentável.

A fresadora CNC funciona de maneira subtrativa, removendo uma parte do substrato de cobre (Cu) da placa utilizando pequenas fresas (*Tool*) fixadas no motor (*Spindle*). Essa máquina possui características de controle que permitem o movimento simultâneo da mesa e do spindle, conforme ilustrado na figura 7. O funcionamento dos movimentos é descrito da seguinte forma:

- **X Motor:** Motor responsável pelo movimento no eixo X (esquerda e direita).
- **Y Motor:** Motor que controla o movimento da mesa no eixo Y (frente e trás).
- **Z Motor:** Motor responsável pelo movimento no eixo Z (controle de altura do *spindle*).

Figura 7 – Representação fresadora cnc.



Fonte: (Northwest Sculpture Symposium Association, 2017).

Segundo (REICHERT, 2015), existe um longo processo até a execução da fresagem da PCB, que inclui várias etapas importantes, dentre essas:

A PCB (*Printed Circuit Board*), ou placa de circuito impresso, é uma estrutura composta por um material isolante revestido com uma camada condutora de cobre. Essa placa serve como base para conectar eletronicamente e fixar mecanicamente os componentes de um circuito. As conexões elétricas são feitas por meio de trilhas e pontos de contato chamados **pads**. Os pads são áreas metálicas expostas na PCB onde os componentes eletrônicos são soldados. Eles podem ser projetados para componentes montados diretamente na superfície da placa (SMT - *Surface Mount Technology*) ou para aqueles que utilizam furos atravessando a placa (THT - *Through-Hole Technology*).

O processo de fabricação da PCB começa com a criação digital do circuito, incluindo as trilhas e pads, utilizando softwares de *design* eletrônico. Após a finalização do projeto, os arquivos são exportados nos formatos Gerber e Drill, que contêm as informações necessárias sobre as trilhas e os furos da PCB. Esses arquivos, então, passam por um processo de conversão para o formato G-code, utilizando ferramentas como o FlatCAM, possibilitando que a fresadora interprete e execute as instruções de usinagem.

Com o arquivo G-code preparado, o processo de fabricação é iniciado. Um *software* controlador, como o GRBL, é utilizado para enviar os comandos à fresadora CNC. A máquina realiza a usinagem das trilhas, a perfuração dos furos para os componentes e, se necessário, o corte do contorno da placa, (SARGUROH; RANE, 2018).

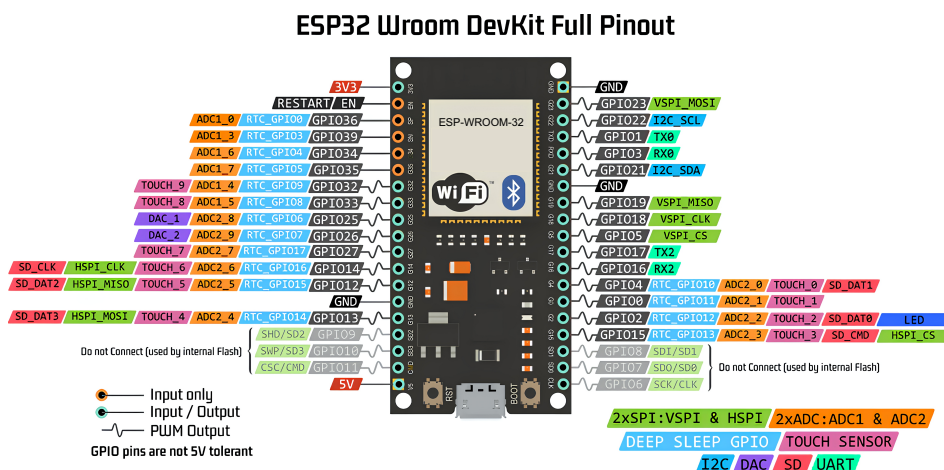
#### A.1.4 Placa controladora ESP32

O ESP32 WROOM-32 é um módulo de sistema em chip (SoC) integrado, projetado pela *Espressif Systems*, que combina um microcontrolador dual-core Xtensa LX6 de 32bits de baixo consumo, com *wi-Fi* e *bluetooth*. Essa combinação o torna uma escolha popular para uma ampla gama de aplicações de Internet das Coisas (IoT), automação, sensores, controle industrial e muito mais. O ESP32 pode interagir com outros sistemas para fornecer funcionalidade *wi-Fi* e *bluetooth* por meio de suas interfaces SPI / SDIO ou I2C / UART. Além disso, pode ser programado em diversas linguagens, como Python, Lua e C/C++, (Upesy, 2023).

A linguagem C/C++ é a linguagem padrão para a programação de microcontroladores, oferecendo um alto grau de controle sobre o *hardware*. Amplamente utilizada no desenvolvimento de aplicações e compatível com plataformas como Arduino IDE e *Visual Studio Code*.

O ESP32-WROOM-32 possui 38 pinos, mas nem todos estão disponíveis para uso em projetos personalizados. De acordo com a documentação da Espressif (Espressif Systems, 2023), os pinos listados na tabela 1 (correspondentes aos GPIO6 a GPIO11) estão diretamente conectados ao *flash* SPI interno do módulo. Essa conexão impede sua utilização para outras funções, garantindo o funcionamento correto da memória flash.

Figura 8 – Esp32 WROOM-32 38 pinos.



Fonte: (Upesy, 2023).

Tabela 1 – Pinos conectados à memória Flash do ESP32.

GPIO	Nome possível	Descrição
6	SCK/CLK	Conectado ao flash interno
7	SDO/SD0	Conectado ao flash interno
8	SDI/SD1	Conectado ao flash interno
9	SHD/SD2	Conectado ao flash interno
10	SWP/SD3	Conectado ao flash interno
11	CSC/CMD	Conectado ao flash interno

Fonte: Adaptado de (Upesy, 2023).

Com base na figura 8, que ilustra a disposição dos pinos e suas respectivas funções, é possível destacar os seguintes pinos de alimentação:

- 5V: Responsável pela entrada de tensão, sendo utilizado para a alimentação do módulo em 5 Volts;
- 3V3: Saída de tensão de 3,3V, destinada à alimentação de periféricos externos;
- GND: Pino de referência elétrica (*ground*), essencial para o fechamento do circuito.

Segundo o fabricante (Espressif Systems, 2023), o ESP32 possui 32 pinos GPIO (*General Purpose Input/Output*), que podem ser configurados como entrada ou saída. Entre eles, destacam-se:

#### A.1.4.1 Pinos com sinal PWM (*Pulse Width Modulation*)

A modulação por largura de pulso (*PWM*) é uma técnica utilizada para gerar sinais digitais com formato de onda controlável, sendo amplamente empregada no controle de motores, ajuste da intensidade de LEDs e acionamento de outros componentes analógicos de forma digital.

No ESP32, todos os pinos GPIO podem ser configurados para operar no modo de saída, com exceção dos GPIO36, GPIO39, GPIO34 e GPIO35, que são exclusivamente de entrada e, portanto, não suportam a funcionalidade PWM.

#### A.1.4.2 Pinos DAC

Os conversores **DAC** Conversores Digitais para Analógicos (*DAC - Digital-to-Analog Converter*), presentes nos pinos GPIO25 e GPIO26, permitem a conversão de sinais digitais em sinais analógicos. Isso possibilita a geração de uma saída analógica para aplicações que demandam variação contínua de tensão, como controle de áudio e modulação de sinais.

#### A.1.4.3 Pinos ADC

Os conversores **ADC** Conversores Analógico-Digital (*ADC - Analog-to-Digital Converter*) são responsáveis pela conversão de sinais analógicos (contínuos) em digitais (discretos), permitindo medições com uma resolução de até 12 bits. Dessa forma, os valores gerados podem variar de 0 a 4095. O microcontrolador ESP32 conta com dois blocos ADC: ADC1 e ADC2.

1. O ADC1 abrange os pinos ADC1\_0 a ADC1\_5.
2. O ADC2 inclui os pinos ADC2\_0 a ADC2\_9.

Esses pinos são capazes de detectar tensões analógicas que variam de **0 V a 3,3 V**.

#### A.1.5 Princípios de funcionamento de sensores

Sensores são dispositivos essenciais que permeiam o mundo moderno, permitindo a captura e interpretação de informações na mudança de estado, seja medindo temperatura, detectando movimento ou convertendo luz em sinais elétricos (WILSON, 2004).

Os sensores podem ser classificados de diversas maneiras. Do ponto de vista do condicionamento de sinal, é útil classificar os sensores como ativos ou passivos. Um sensor ativo requer uma fonte externa de excitação. Sensores baseados em resistores, como termistores, RTD (detectores de temperatura de resistência) e extensômetros são exemplos de sensores ativos, porque uma corrente deve passar através deles e a tensão correspondente medida para determinar o valor da resistência.

Por outro lado, sensores passivos (ou autogerados) geram seu próprio sinal de saída elétrico sem exigir tensões ou correntes externas. Exemplos de sensores passivos são termopares e fotodiodos que geram tensões termoelétricas e fotocorrentes, respectivamente, que são independentes de circuitos externos. Deve-se notar que estas definições (ativo vs.

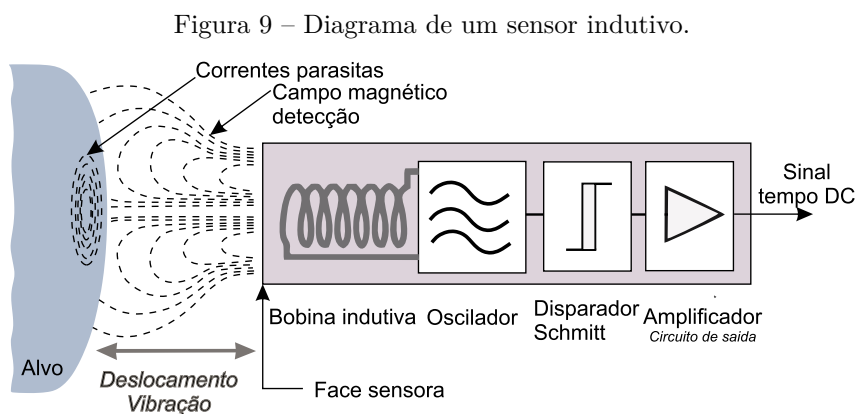
passivo) referem-se à necessidade (ou falta) de circuitos ativos externos para produzir o sinal de saída elétrico do sensor.

O transdutor em um sensor desempenha um papel de capturar e reagir à grandeza física específica sob medida. Sua constituição pode variar consideravelmente dependendo do tipo de sensor e das propriedades da grandeza física em análise. Quando o elemento sensor interage com a grandeza física medida, ele gera um sinal elétrico correlacionado à variação da condição física, representando assim a resposta do sensor à mudança no ambiente circundante. O tipo de sinal gerado é determinado pelo princípio de operação do sensor.

Para exemplificar, em sensores de temperatura baseados em resistência, a alteração na temperatura resulta em uma mudança na resistência elétrica, originando um sinal elétrico proporcional (WENDLING, 2010). Outros sensores seguem um raciocínio semelhante, onde o elemento sensor responde de maneira específica, mas gera um sinal elétrico em conformidade com o princípio subjacente de funcionamento.

Diante disso, existem diversos tipos de sensores, mas alguns são mais utilizados em aplicações específicas devido às suas características particulares. Dentre esses, destacam-se os sensores indutivos, capacitivos e magnéticos, conforme destacado por (WENDLING, 2010).

**Sensores Indutivos:** são dispositivos eletrônicos projetados para detectar a proximidade de elementos metálicos sem a necessidade de contato direto. O princípio fundamental desses sensores envolve a geração de um campo eletromagnético por meio de uma bobina ressonante localizada na face sensora. Quando um objeto metálico se aproxima desse campo, ocorre a absorção de energia, resultando na diminuição da amplitude do sinal gerado pelo oscilador. Essa redução em relação ao valor original desencadeia a ativação do estágio de saída. A figura 9 apresenta um esquema simplificado de um sensor indutivo.



Fonte: Adptado de (Brüel & Kjær Vibro, 2025).

**Sensores capacitivos:** são dispositivos eletrônicos projetados para detectar a proximidade de uma variedade de materiais, como orgânicos, plásticos, pós, líquidos, entre

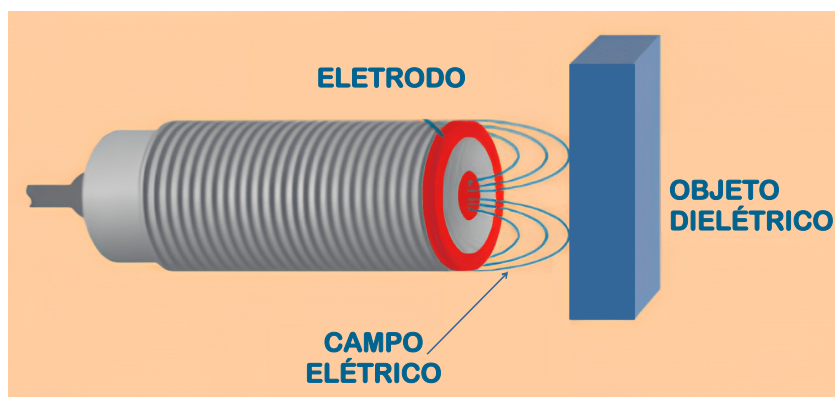
outros, sem a necessidade de contato físico. O princípio subjacente ao seu funcionamento envolve a geração de um campo elétrico por meio de um oscilador controlado por capacitor. Esse capacitor é constituído por duas placas metálicas posicionadas na face sensora, direcionando o campo elétrico para fora do sensor.

Quando um material se aproxima do sensor capacitivo, ocorre uma alteração na permissividade elétrica ( $\varepsilon$ ) do meio dielétrico, resultando em uma variação da capacitância do sistema. Essa relação pode ser descrita pela equação 3.

$$C = \varepsilon \times \frac{A}{d} \quad (3)$$

Onde  $C$  é a capacitância do sensor,  $\varepsilon$  representa a constante dielétrica do meio,  $A$  corresponde à área efetiva das placas capacitivas e  $d$  é a distância entre elas. Como a capacitância é inversamente proporcional à separação entre as placas e diretamente proporcional à constante dielétrica e à área, qualquer alteração nesses parâmetros modifica a resposta elétrica do sensor. Essa variação capacitiva é detectada e processada pelo circuito de medição, acionando o estágio de saída do sensor conforme ilustrado na figura 10.

Figura 10 – Sensor capacitivo: representação da atuação.



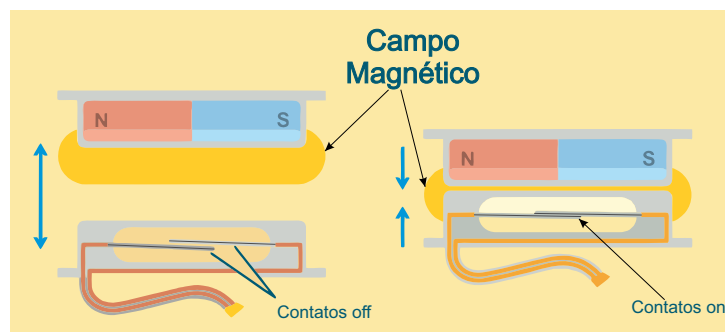
Fonte: Adaptado de (ROGGIA; FUENTES, 2016).

Este tipo de sensor permite fazer ajustes de sensibilidade que geralmente é realizado por um parafuso localizado no corpo do instrumento.

**Sensores magnéticos:** Os sensores magnéticos são ativados pela proximidade de um campo magnético gerado por um ímã, acionando um contato normalmente aberto em sua saída. Durante seu funcionamento, o campo magnético interage com os contatos do sensor, permitindo que eles sejam fechados ou abertos, conforme necessário, como ilustrado na figura 11.

Conforme destacado por (ROGGIA; FUENTES, 2016), sensores raramente operam de maneira isolada. Eles são frequentemente componentes integrados em sistemas mais amplos, envolvendo condicionadores de sinal e diversos circuitos para processamento

Figura 11 – Sensor magnético com contatos abertos e contatos fechados.



Fonte: (ROGGIA; FUENTES, 2016).

analógico ou digital. De acordo com a natureza do sinal de saída, os sensores podem ser classificados em sensores digitais (discretos) e sensores analógicos (contínuos). Sensores analógicos geram sinais contínuos proporcionais à mudança na grandeza medida, enquanto sensores digitais convertem esses sinais para formato binário (0 ou 1).

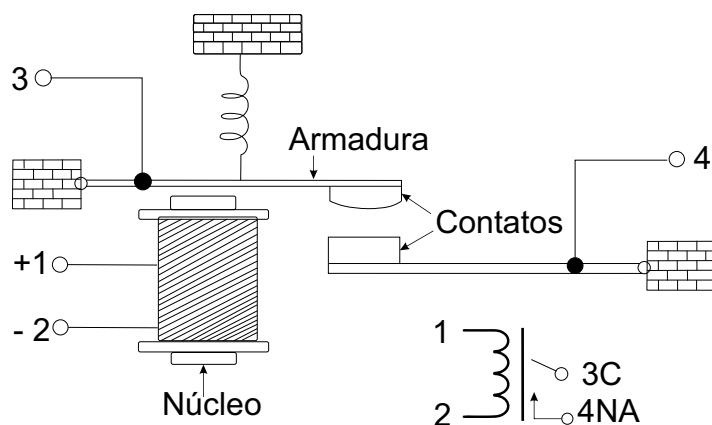
#### A.1.6 Relé eletromecânico

O relé é um dispositivo capaz de comandar circuitos elétricos de saída através de um circuito de controle de entrada.

Os relés eletromecânicos operam com base no princípio do eletromagnetismo e são amplamente utilizados em instalações industriais de baixa, média e alta tensão. Esses dispositivos desempenham um papel fundamental no controle e proteção de circuitos elétricos, sendo compostos, de forma geral, pelos seguintes elementos, conforme ilustrado na figura 12.

- Bobina e núcleo (eletroímã): Responsável por gerar o campo magnético necessário para o acionamento do relé;
- Armadura (ferro móvel): Elemento que se desloca quando a bobina é energizada, fechando ou abrindo os contatos;
- Contatos: Incluem os contatos fixos e móveis, responsáveis pela comutação do circuito elétrico;
- Mola de retorno: Restaura a posição inicial da armadura quando a bobina é desenergizada;
- Terminais de conexão +1 e -2: Representam os pontos de controle da entrada.

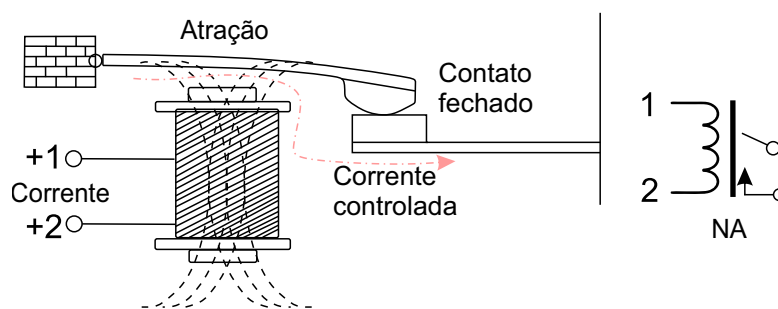
Figura 12 – Estrutura simplificada de um relé.



Fonte: (BRAGA, 2017).

Segundo (BRAGA, 2017), nas proximidades de um eletroímã é posicionada uma armadura móvel de metal ferroso, que gera um campo magnético com a finalidade de controlar um conjunto de contatos. Quando a bobina é percorrida por uma corrente elétrica, o campo magnético criado atua sobre a armadura, provocando sua atração. Esse movimento faz com que a armadura e, conseqüentemente, os contatos se desloquem, permitindo que o contato móvel se encoste no contato fixo inferior. Ao interromper a corrente elétrica, o campo magnético se dissipa, e os contatos retornam à posição inicial pela ação de uma mola, conforme ilustrado na figura 13 com contatos normalmente abertos ou NA (em inglês: "normally open").

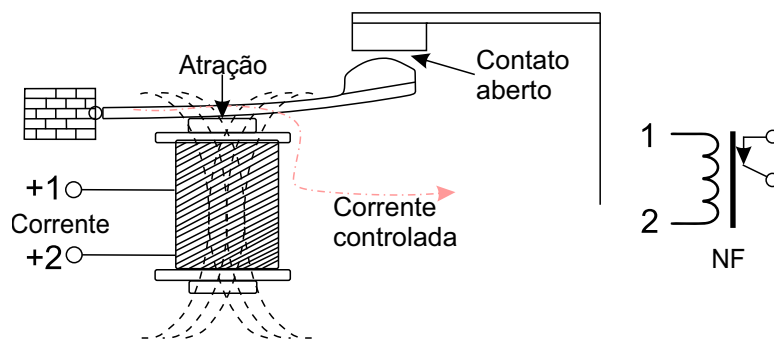
Figura 13 – Atração dos contatos tipo NA.



Fonte: (BRAGA, 2017).

Outra possibilidade de controle de um relé é explorada na configuração da figura 14. Nela, na condição normal, os contatos permanecem encostados um ao outro, contatos normalmente fechados ou NF (em inglês: *normally closed*), e com isso a corrente controlada pode circular. Quando a bobina é energizada, ou seja, quando através dela passa a circular uma corrente de controle, o campo magnético criado movimenta um dos contactos de modo que ele se separe do outro. Com isso, o circuito controlado é aberto, (BRAGA, 2017).

Figura 14 – Atração dos contatos tipo NF.

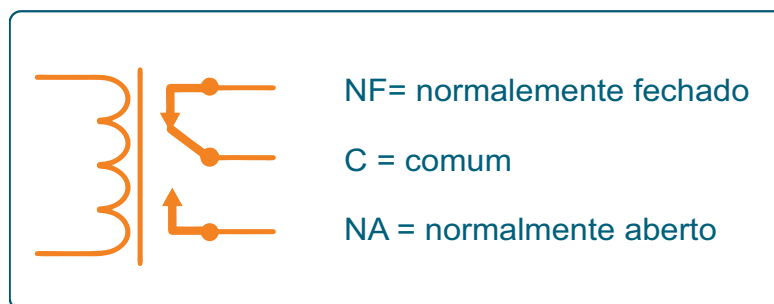


Fonte: (BRAGA, 2017).

A figura figura 15 apresenta o diagrama simplificado dos contatos de comutação de relé eletromecânico.

- NF (Normalmente Fechado): Este contato está fechado quando o relé não está energizado e se abre quando a bobina é ativada.
- NA (Normalmente Aberto): O oposto do NF, este contato está aberto em condições normais e se fecha quando a bobina é energizada.
- C (Comum): É o terminal comum a ambos os contatos, NA e NF.

Figura 15 – Tipos de comutação relé.



Fonte: (ROGGIA; FUENTES, 2016).

Uma característica importante do relé é sua capacidade de permitir que circuitos e cargas que demandam altas correntes durante o funcionamento sejam acionados por uma corrente de baixa intensidade, suficiente apenas para energizar a bobina do relé. Dessa forma, é possível controlar cargas como motores e máquinas industriais pesadas utilizando dispositivos eletrônicos de baixa potência, como transistores e circuitos integrados (ROGGIA; FUENTES, 2016).

## A.2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

O desenvolvimento de um sistema completo de aquaponia utilizando técnicas de fabricação digital justifica-se pela busca de soluções mais sustentáveis e pelo uso eficiente da

água, além de contribuir para os estudos de engenharia aplicada. A aquaponia, que integra aquicultura e hidroponia, representa um campo promissor para o desenvolvimento de sistemas automatizados. A aplicação de processos precisos e controlados reduz desperdícios e falhas, tornando o sistema mais eficiente e com menor impacto ambiental.

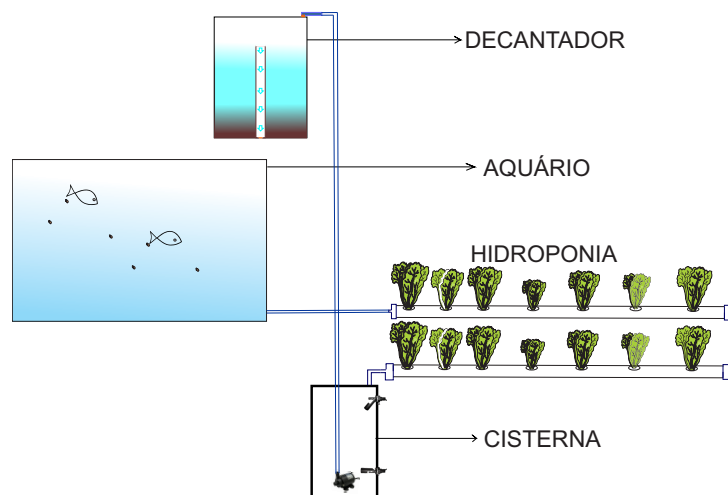
Dessa forma, este trabalho tem os seguintes objetivos:

- Maximizar a eficiência no uso de recursos naturais por meio da implementação de um sistema automatizado e sustentável;
- Criar um ambiente propício para pesquisas e aplicação de tecnologias de automação;
- Empregar técnicas de fabricação digital, como impressão 3D e corte a laser, para desenvolver componentes personalizados e modulares, facilitando a experimentação e adaptação do sistema a diferentes necessidades;
- Viabilizar o estudo e a aplicação de circuitos elétricos, controle de sistemas e integração de sensores, ampliando as possibilidades de aprendizado e inovação.

### A.3 PROCESSOS E ATIVIDADES

O sistema de aquaponia abrange diversas partes fundamentais, tais como um aquário, uma estrutura de hidroponia para o cultivo das hortaliças, uma cisterna destinada a receber a água livre de nutrientes, um decantador para separar materiais pesados da água e um quadro de comando para abrigar o sistema eletrônico de comando e potência desenvolvido especificamente para o projeto. A concepção e integração destes componentes estabeleceram as atividades-chave necessárias para a constituição do sistema de Aquaponia. Na figura 16, é possível visualizar a disposição de cada parte do projeto.

Figura 16 – Visão geral dos elementos fundamentais da aquaponia.



Fonte: Autor, (2023).

O sistema funciona de forma integrada entre o aquário, a hidroponia, a cisterna e o decantador, conforme representado no esquema. O processo é descrito da seguinte maneira:

No **aquário**, ocorre a produção de resíduos metabólicos dos peixes, onde bactérias nitrificantes, como as *Nitrosomonas*, transformam o amônio ( $NH_3$ ) em nitrito ( $NO_2$ ) e posteriormente em nitrato ( $NO_3$ ). Os nitratos são nutrientes importantes para as plantas, mas sua concentração excessiva no aquário pode prejudicar a saúde dos peixes devido à toxicidade do amônio.

Para evitar esse desequilíbrio, a água do aquário é bombeada para o sistema de **hidroponia**, onde as plantas absorvem os nutrientes dissolvidos, como o nitrato. Este processo ajuda a filtrar a água, removendo parte dos compostos nitrogenados e permitindo o crescimento saudável das plantas.

Após passar pela hidroponia, a água filtrada segue para uma **cisterna**, onde é armazenada temporariamente antes de retornar ao aquário. Em seguida, a água é bombeada da cisterna para o **decantador**, que tem a função de separar materiais sólidos e resíduos pesados que possam estar suspensos na água.

Do decantador, a água retorna ao aquário com uma menor concentração de amônio ( $NH_3$ ), mantendo o equilíbrio do sistema. Esse ciclo fechado promove uma simbiose entre peixes e plantas, onde os resíduos gerados pelos peixes servem de nutrientes para as plantas, enquanto as plantas filtram a água, garantindo um ambiente mais saudável para os peixes.

Esse sistema sustentável, conforme descrito no capítulo anterior, demonstra a importância do equilíbrio entre as partes, garantindo a saúde dos organismos envolvidos e a eficiência do ciclo de nutrientes.

O objetivo do estágio foi o desenvolvimento de cada uma das partes do sistema mostrado na figura 16. Adicionalmente, foi também necessário produzir e desenvolver a eletrônica e a programação a lógica para automatizar os seguintes processos:

1. Alimentação dos peixes;
2. Bombeamento da água para os canos de hidroponia;
3. Controle de nível de água;
4. Monitoramento remoto das variáveis de ambiente, como temperatura da água do aquário, pH e nível de água.

### A.3.1 Treinamentos

Para iniciar o processo de fabricação, foi necessário aprender a utilizar softwares de apoio, por exemplo modelagem 2D e 3D, além de simulação e prototipagem de placas

de circuitos elétricos e eletrônicos.

Além do treinamento em *software*, foi necessário adquirir habilidades no uso das máquinas de fabricação disponíveis do laboratório, tais como:

- 1. Router Laser VS 6040, para corte e gravação em superfícies planas;
- 2. Fresadora 3018, para prototipagem de circuitos elétricos;
- 3. Ender 3, impressora 3D.

### A.3.2 Trabalho e gestão de equipe

O projeto de Aquaponia também foi utilizado para auxiliar o desenvolvimento de habilidades de gerência e liderança. Neste contexto, o estagiário ficou responsável pela iniciativa de organizar um processo seletivo e montar a equipe do projeto. O propósito subjacente à formação dessa equipe era otimizar a eficácia operacional do projeto, além de compreender a dinâmica das responsabilidades profissionais associadas à gestão da equipe. Isso incluiu o cumprimento de prazos, manuseio adequado dos equipamentos e a prevenção de problemas relacionados às máquinas utilizadas.

A equipe foi formada por alunos de diferentes cursos de Engenharia do Campus Tucuruí. A criação dessa equipe multidisciplinar demonstrou ser uma escolha estratégica, pois permitiu uma abordagem abrangente aos desafios do projeto. Cada membro da equipe trouxe suas habilidades e conhecimentos específicos, contribuindo para uma maior eficiência na gestão de tarefas, garantindo o respeito aos prazos estabelecidos, a manutenção adequada dos equipamentos e a prevenção proativa de quaisquer problemas que pudessem surgir durante o processo.

Essa colaboração multidisciplinar fortaleceu significativamente a capacidade da equipe em lidar com os desafios complexos que surgem em projetos desse tipo, resultando em um ambiente de trabalho mais coeso e eficaz.

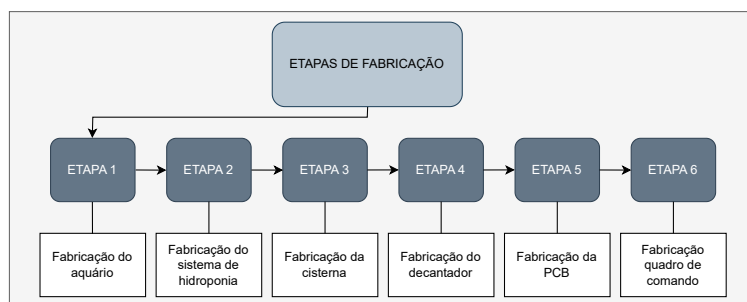
### A.3.3 Processos de fabricação do sistema aquapônico

O processo de fabricação teve como principal enfoque a aplicação de técnicas de modelagem em desenho 2D e 3D, juntamente com a operação de máquinas CNCs apresentadas anteriormente, para a produção das etapas fundamentais de um sistema de aquaponia. Este processo foi dividido em seis etapas distintas ilustrado na figura 17.

### A.3.4 Etapa 1: fabricação dos aquários

Na etapa 1, foram testados três aquários. O primeiro com dimensões de 34 cm de comprimento, 25 cm de largura e 25 cm de altura, tinha a finalidade de possuir duas

Figura 17 – Etapas de fabricação do projeto.



Fonte: Autor, (2023).

laterais de acrílico para acomodar sensores por meio de furos, como mostrado na figura 18a, em que as partes de acrílico estão destacadas em vermelho. As partes de acrílicos foram cortado na *Router Laser*. No entanto, o processo de fabricação desse primeiro sistema não foi bem-sucedido, pois essa combinação apresentou fragilidades, pois o contato entre o vidro e o acrílico não era satisfatório. Além disso, a cola de silicone usada não era adequada para o acrílico. Esses problemas se tornaram evidentes durante os testes, resultando em vazamentos e rachaduras no acrílico.

Figura 18 – Construção do protótipo inicial do aquário.

(a) Ilustração aquário com laterais de acrílico.



(b) Aquário fabricado.



Fonte: Autor, (2023).

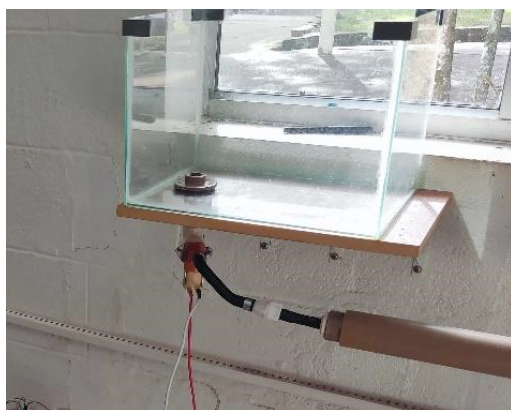
Para o segundo protótipo do aquário, levando em consideração as falhas do primeiro, foi decidido projetá-lo inteiramente em vidro, mantendo as mesmas dimensões do primeiro protótipo de aquário para reutilizar as peças de vidro. Os cortes foram feitos com um cortador de vidro tipo caneta. O segundo protótipo do aquário foi bem-sucedido com os testes. No entanto, as dimensões eram restritas para acomodar mais de um peixe. O segundo aquário está ilustrado na figura 19a

No terceiro aquário, o objetivo era acomodar três peixes da espécie *Acaratinga* (*Geophagus proximus*). Para isso, foi necessário um aquário com dimensões de 55 cm de comprimento, 35 cm de altura e 30 cm de largura, com vidro com espessura de pelo menos 4 mm para suportar 60 litros de água. Como o laboratório não dispunha dos materiais

adequados nem das ferramentas necessárias, optou-se por buscar assistência profissional para realizar o corte do vidro de 4 mm e a colagem. O terceiro aquário está representado na figura 19b.

Figura 19 – Processo de fabricação dos aquários.

(a) Segundo aquário



(b) Terceiro aquário



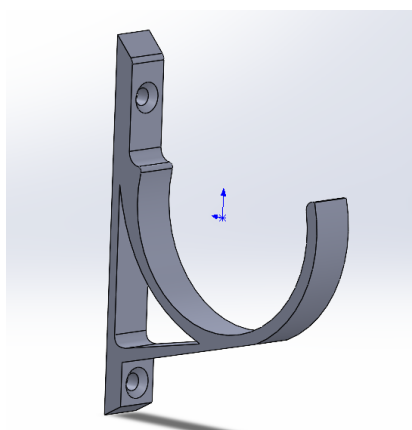
Fonte: Autor, (2023).

### A.3.5 Etapa 2: desenvolvimento do sistema de hidroponia

Nessa etapa, foi implementado o sistema de hidroponia. O funcionamento desse sistema é bastante simples: a água com nutrientes é bombeada para circular pelas tubulações, fornecendo os nutrientes necessários para as hortaliças. As hastes que sustentam essas tubulações foram projetadas por meio de modelagem e impressão 3D, como mostrado na figura 20.

Figura 20 – Hastes de sustentação das tubulações.

(a) Modelo geométrico 3D



(b) Modelo fabricado

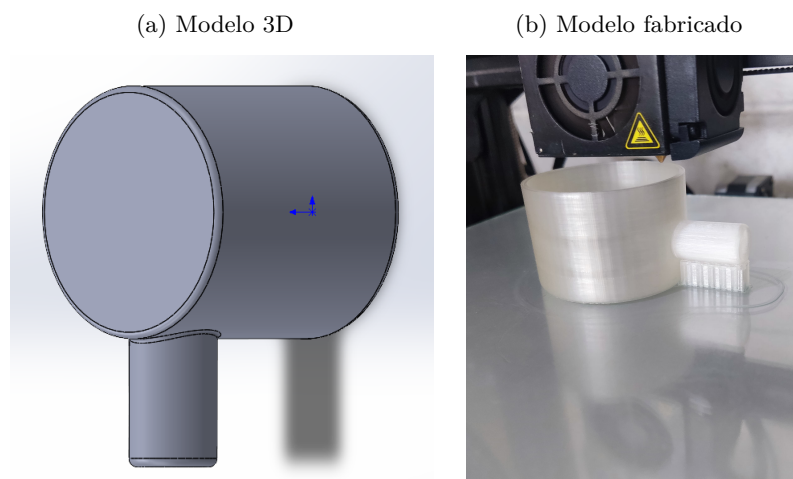


Fonte: Autor, (2023).

No sistema de hidroponia do projetado, foram usadas duas tubulações, nas quais é necessário que a água flua de uma para a outra. Para permitir esse fluxo contínuo, foram desenvolvidas conexões que possibilitam o transbordamento da água entre as tubulações

quando o nível adequado é atingido. Essas conexões foram projetadas de maneira similar às hastes, mas, devido às peças estarem em contato constante com a água durante o funcionamento do sistema, optou-se pelo uso do filamento PETG (polietileno tereftalato glicol) para impressão.

Figura 21 – Fabricação da conexão entre as tubulações.



Fonte: Autor, (2023).

Esse material foi escolhido por sua resistência mecânica, durabilidade e, principalmente, por sua alta resistência à umidade e aos produtos químicos que podem estar presentes na água. O PETG é um material plástico amplamente utilizado em impressão 3D devido à sua facilidade de processamento e propriedades superiores em relação ao PET tradicional. Além disso, o PETG é mais resistente à trinca e ao desgaste, tornando-o ideal para peças que exigem durabilidade em ambientes com umidade constante, como no caso das conexões do sistema de hidroponia. A peça está ilustrada na figura 21. O sistema hidroponico está montado conforme mostrado na figura 22.

Figura 22 – Sistema hidroponico montado.

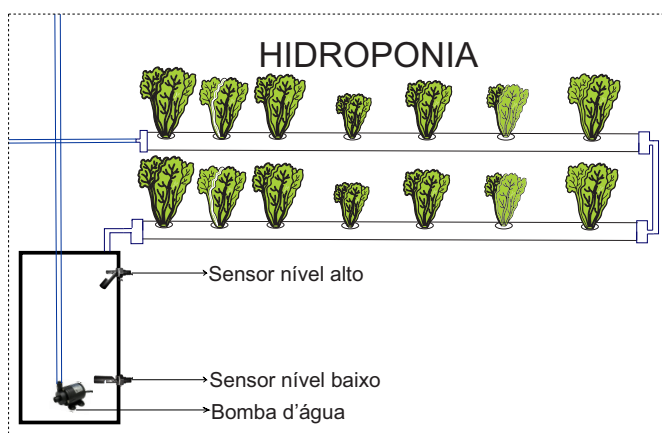


Fonte: Autor, (2023).

### A.3.6 Etapa 3: construção da cisterna

Para esta etapa, foi incorporado um modelo de cisterna projetado para captar a água proveniente do final do sistema de hidroponia. Essa cisterna foi incluída no projeto com a finalidade de automatizar a bomba, evitando seu funcionamento sem água. O sistema é controlado por dois sensores magnético do tipo bóia conforme explicado o funcionamento na [subseção A.1.5](#), que operam em dois períodos: a bomba é acionada quando o nível de água atinge o ponto alto e é desativada quando atinge o ponto baixo, conforme ilustra a figura 23.

Figura 23 – Sistema de funcionamento da cisterna.



Fonte: Autor, (2023).

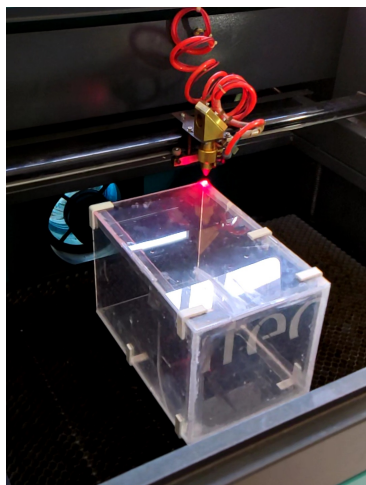
O processo de fabricação teve início com o projeto em desenho 2D. Após a conclusão do projeto da cisterna, o próximo passo foi realizar os cortes a laser utilizando a CNC Router Laser VS 6040. Logo após os cortes, procedemos com o processo de colagem utilizando silicone próprio para acrílico.

Para a instalação dos sensores, foram feitos dois furos utilizando corte a laser para acomodá-los, como ilustrado na figura 24a. O sistema completo da cisterna montada é mostrado na figura 24b.

Houve problemas de vazamento na cisterna inicial, que possuía um formato retangular e era construída inteiramente de acrílico. O problema foi causado pelo ressecamento das fixações laterais, comprometendo a vedação. Para mitigar essa falha e reduzir ao máximo o uso de silicone nas junções, optou-se pela substituição do reservatório por uma tubulação de PVC com 150 mm de diâmetro, minimizando os pontos de vedação e aumentando a confiabilidade estrutural.

Figura 24 – Fabricação da cisterna retangular.

(a) Corte de furo para sensor



(b) Montagem completa

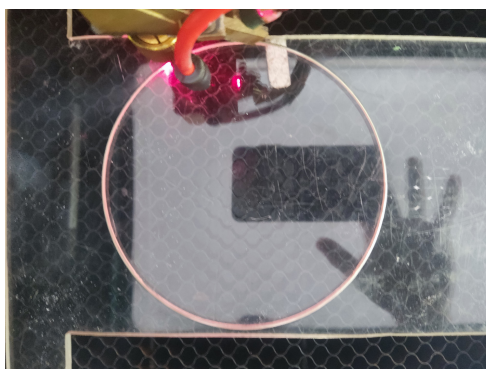


Fonte: Autor, (2023).

A base e a parte superior, feitas de acrílico, foram cortadas a laser para garantir maior precisão no encaixe, e foram realizados furos para a passagem dos fios de alimentação e da mangueira responsável pelo bombeamento da água para o decantador conforme mostrado na figura 25a. Além disso, sensores magnéticos foram instalados na lateral, com os devidos furos para fixação. Os testes realizados com a nova configuração foram bem-sucedidos sem vazamentos, garantindo a eficiência do sistema representado na figura 25b.

Figura 25 – Fase final cisterna.

(a) Junções de acrílico



(b) Cisterna completa



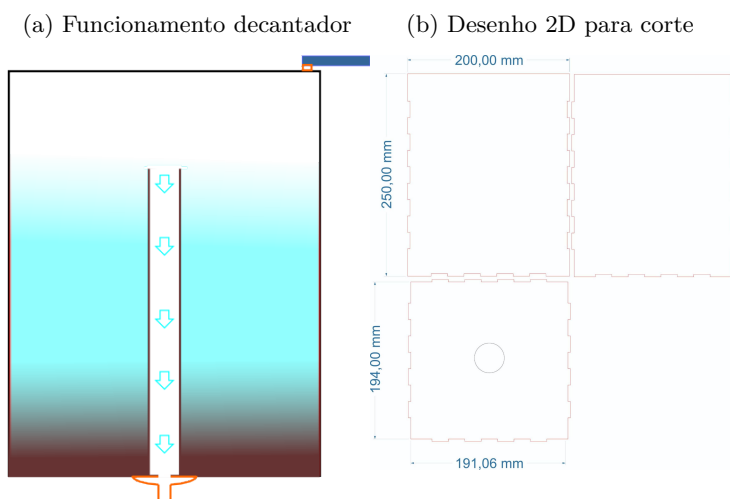
Fonte: Autor, (2023).

#### A.3.7 Etapa 4: construção do decantador

A inserção desse componente no sistema tem como objetivo lidar com o alto índice de matéria pesada e algas que surgem ao longo do tempo no sistema de hidroponia. No sistema de Aquaponia, a água retorna para o aquário, e, com o propósito de reduzir esses problemas, foi projetado e inserido um decantador para separar impurezas sólidas ou sedimentáveis da água, utilizando a ação da gravidade. Quando a água atinge um nível

alto, a água limpa transborda por uma tubulação para o aquário. Esse entendimento pode ser visto na figura 26a.

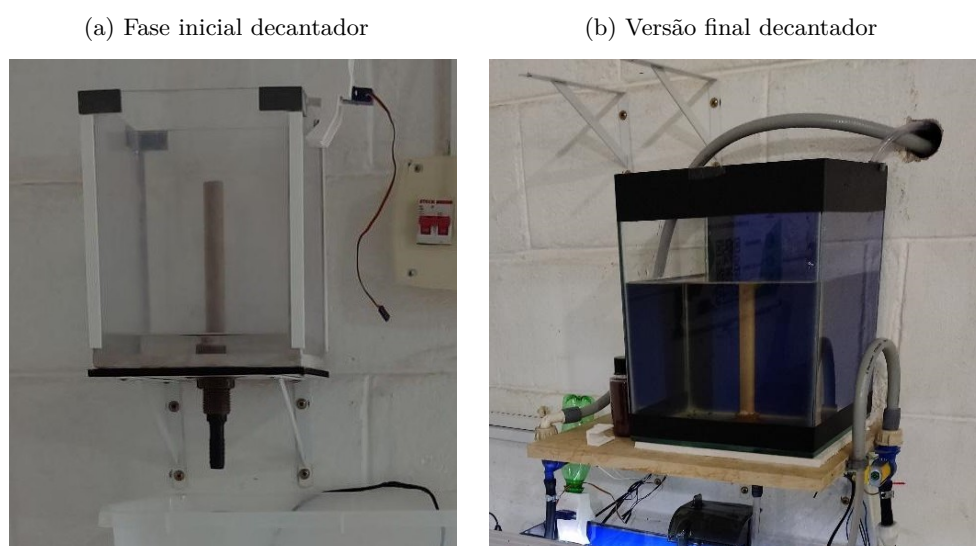
Figura 26 – Fase inicial do decantador.



Fonte: Autor, (2023).

O decantador passou por duas versões de desenvolvimento. Na primeira versão, as partes foram confeccionadas em acrílico, seguindo o projeto baseado em um desenho 2D. A figura 26b ilustra o desenho 2D, que foi enviado para o corte a laser, com as laterais projetadas com dentes para encaixe. A figura 27a mostra o decantador fabricado, montado e em fase de testes. Após a realização dos testes, foram identificadas melhorias para aumentar a confiabilidade do sistema, resultando em uma versão final completamente construída em vidro, conforme ilustrado na figura 27b.

Figura 27 – Decantador.



Fonte: Autor, (2023).

### A.3.8 Etapa 5: fabricação da placa de comando principal

A placa principal utilizada no projeto é o ESP32, equipada com o módulo *Wi-Fi* WROOM-32. Esse módulo é responsável por gerenciar as conexões principais para análise de dados dos sensores e controle do sistema de automação. Para garantir o desempenho adequado, é essencial que as conexões não apresentem ruídos ou interferências, especialmente nos sinais captados pelos sensores.

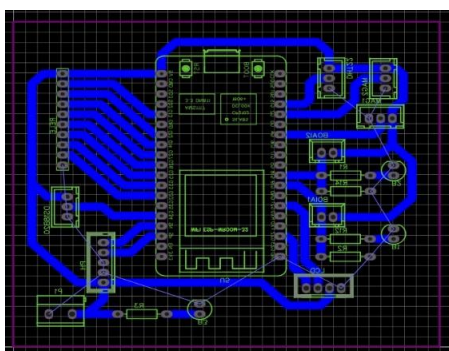
A placa de circuito impresso (PCB - *Printed Circuit Board*) foi projetada com o objetivo de minimizar falhas de contato entre os terminais e reduzir interferências no sistema, garantindo maior confiabilidade nos dados dos sensores e nos comandos executados.

O circuito foi desenvolvido para acomodar todos os sensores e o controle por relé. A etapa de simulação e validação foi realizada utilizando o *software* Proteus, permitindo testar e ajustar o circuito antes da fabricação.

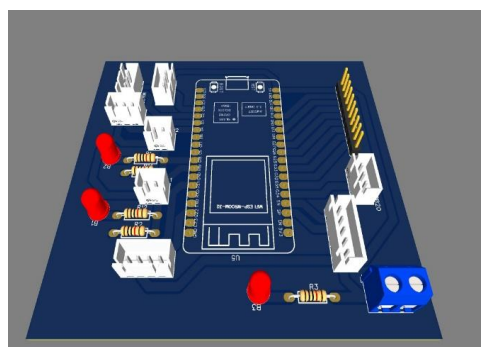
Durante o desenvolvimento do sistema automatizado, foram identificados erros na configuração dos pinos GPIO do ESP32, que comprometiam o funcionamento de subsistemas nos testes iniciais da placa. Alguns pinos foram atribuídos sem considerar suas funções reservadas ou comportamentos específicos, resultando em instabilidade no acionamento de relés e leituras inconsistentes dos sensores. A solução adotada envolveu uma revisão do mapeamento dos pinos, garantindo que apenas GPIOs compatíveis fossem utilizados para cada função. Após a correção da configuração e seleção dos pinos, foi conduzido um novo protótipo da PCB.

Figura 28 – Projeto da placa de circuito impresso.

(a) Conexões trilhas ESP-32



(b) Modelo 3D da placa



Fonte: Autor, (2023).

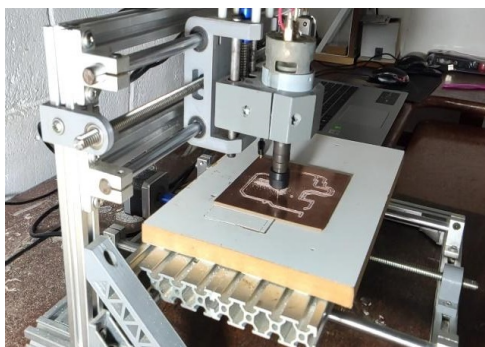
O *layout* da PCB foi projetado utilizando o *software* online [EasyEDA](#), que oferece ferramentas avançadas para o desenho das trilhas e organização dos componentes. As figuras figura 28a e figura 28b apresentam, respectivamente, o layout das trilhas e a visualização 3D da placa.

Após a finalização do projeto no [EasyEDA](#), o arquivo GCODE foi gerado e utilizado na fabricação do circuito. A usinagem foi realizada na fresadora CNC modelo 3018

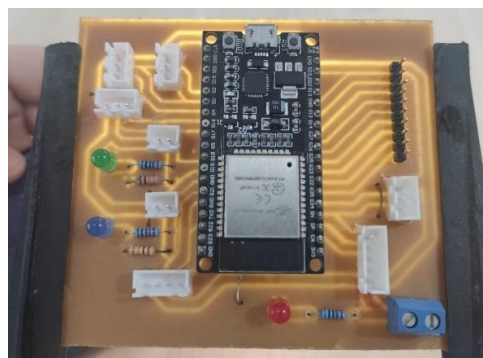
disponível no FabLab, conforme ilustrado na figura 29a. A versão final da placa, já fresada e pronta para uso, está apresentada na figura 29b.

Figura 29 – Processo de fabricação da PCB fresa.

(a) Fabricação da placa



(b) Modelo final



Fonte: Autor, (2023).

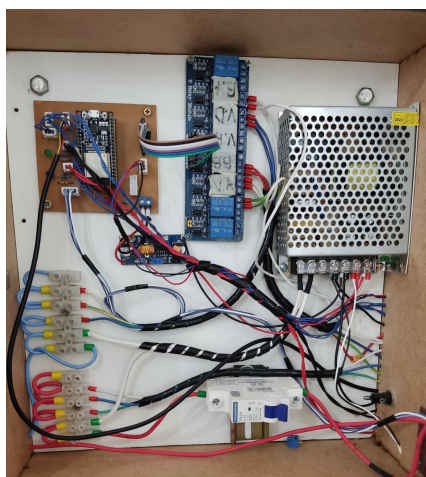
### A.3.9 Etapa 6: fabricação do quadro de comando

O sistema final de Aquaponia incluiu vários componentes eletrônicos, tais como a placa de circuito impresso principal, um módulo relé de 8 canais, uma fonte de alimentação DC 12V, um barramento N/F, um regulador de tensão e um disjuntor.

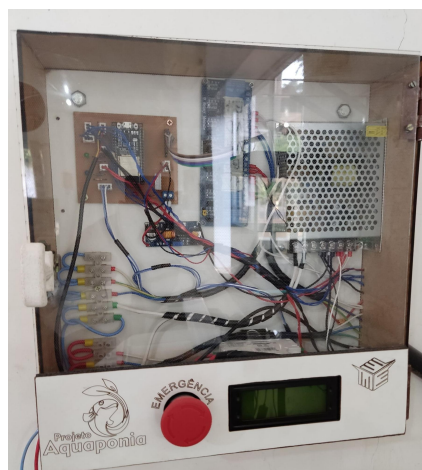
Para acomodar todo esse sistema, foi necessária a fabricação de um quadro, semelhante aos convencionais disponíveis no mercado. O quadro de controle foi inicialmente desenvolvido em um desenho 2D e, posteriormente, cortado a laser e montado por meio de colagem e fixação com parafusos. Os materiais utilizados para essa finalidade foram acrílico e MDF de 2 mm de espessura, ambos. A finalização dessa etapa está ilustrada na figura 30.

Figura 30 – Fabricação quadro de comando completo.

(a) Componentes eletrônicos do quadro



(b) visualização externa do quadro



Fonte: Autor, (2023).

### A.3.10 Resultados da montagem completa do sistema de aquaponia

Com a conclusão da fabricação e integração de todos os componentes, o sistema de aquaponia encontra-se totalmente montado e operacional. A figura 31a apresenta a estrutura final do sistema, destacando o quadro de comando, o decantador e o aquário, elementos essenciais para a manutenção do equilíbrio entre aquicultura e hidroponia.

Além disso, a figura 31b ilustra o sistema hidropônico juntamente com a cisterna, responsável pelo armazenamento e recirculação da água no sistema. A finalização da montagem assegura a funcionalidade de todos os subsistemas, permitindo o início da fase de testes para validação do desempenho hidráulico, elétrico e automatizado do sistema.

Figura 31 – Sistema de aquaponia completo.

- (a) Quadro de comando, decantador e aquário      (b) Sistema de hidroponia e Cisterna Integrados



Fonte: Autor, (2023).

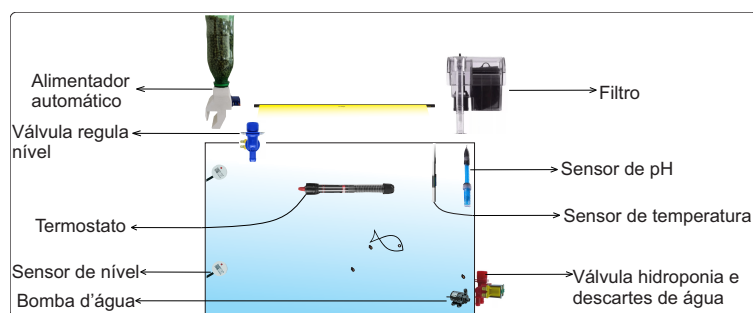
### A.3.11 Automação do sistema

Após a conclusão de todas as etapas de fabricação, iniciou-se a implementação do sistema de automação, etapa essencial para a otimização dos processos, redução do consumo de água e aumento da precisão no controle das operações diárias. Para atender a esses objetivos, foi desenvolvido um sistema automatizado utilizando o microcontrolador ESP32 como unidade de controle principal.

Para automatizar os processos do sistema do projeto descrito na seção A.3, foi necessário integrar sensores e atuadores controlados pelo microcontrolador, conforme ilustrado na figura 33.

O sistema do aquário é equipado com 3 sensores distintos, projetados para monitorar variações nos parâmetros operacionais das condições do ambiente aquático, sendo temperatura, nível de água e pH. Com isso, os sensores do aquário incluem:

Figura 32 – Sensores e atuadores do aquário.



Fonte: Autor, (2023).

- **Sensor de temperatura (1 unidade):** modelo DS18B20, em aço inoxidável e resistente à água. Esse sensor monitora a temperatura da água e ativa o sistema de aquecimento para manter os níveis ideais.
- **Sensores de nível (2 unidades):** dois sensores capacitivos sem contato (modelo XKC-Y25 NPN) cujo funcionamento explicado na [subseção A.1.5](#), responsáveis por verificar continuamente o nível de água no aquário e garantir que ele permaneça dentro dos limites seguros, enviando sinais para ativar a válvula solenóide que regula o nível.
- **Sensor de pH (1 unidade):** Modelo Zigzou (faixa de 0 a 14), utilizado para medir os níveis de pH da água, assegurando condições ideais para a saúde dos peixes e das hortaliças.

Além dos sensores, o aquário conta com 6 atuadores, responsáveis por assegurar o funcionamento eficiente e automatizado das operações, incluindo:

- **Filtro externo HF-400 Ocean Tech:** com vazão de 450 L/h, remove impurezas e oxigena a água.
- **Bomba submersível Saliflo:** modelo 12VDC, impermeável (IP68), corrente nominal de 1000 mA, potência de 19 W e vazão máxima de 800 L/h. Essa bomba transfere a água do aquário para o sistema hidropônico de forma automatizada.
- **Termostato submersível HT50:** com potência de 50 W e capacidade para até 60l. Fabricado pela Seven Master, é utilizado para aquecer a água, mantendo a temperatura ideal para os peixes.
- **Alimentador automático:** desenvolvido por meio de impressão 3D, utiliza um microservo motor (modelo Tower Pro SG90) para fornecer alimentos aos peixes em horários programados.

- **Válvulas solenóides:** uma válvula de duas vias (entrada  $\frac{3}{4}$  e saída  $\frac{1}{2}$ , fabricante Emicol, 127 V) direciona a água para descarte ou para o sistema hidropônico; outra válvula de uma via (mesmas especificações) regula o nível do aquário.

Os custos relacionados a atuadores, sensores e demais componentes do sistema estão detalhados e disponíveis através do link [tabela de custos do projeto](#).

Os atuadores são acionados quando ocorre uma mudança de estado detectada pelos sensores. Esse acionamento é realizado por meio de um sinal elétrico enviado pela placa controladora, que, ao energizar os relés eletromecânicos, fecha o circuito e ativa os dispositivos conectados. Esse processo garante uma resposta eficiente às condições monitoradas pelo sistema.

Para a cisterna, foram implementados dois sensores magnéticos tipo boia horizontal (fabricante Elesave), que indicam os níveis baixo e alto. O sistema conta com uma bomba submersível da fabricante Saliflo (especificações idênticas à anterior) que é acionada ao atingir o nível alto, transferindo água para o decantador. A bomba desliga automaticamente ao atingir o nível baixo indicado pelos sensores, conforme ilustrado na figura 23.

No projeto, foi integrado um banco de relés de 8 vias, responsável pelo acionamento e desligamento de diversos processos. A figura 33 ilustra a lógica do sistema de automação implementado para o controle do aquário e do sistema hidropônico, destacando os fluxos de decisão e as interações entre sensores e atuadores, que são armazenados na memória do microcontrolador ESP32 por meio da programação em C.

O código que implementa essa lógica foi desenvolvido em linguagem C e organiza o fluxo do sistema em duas funções principais: `setup()`, que realiza a configuração inicial dos pinos, sensores e atuadores; e `loop()`, que executa continuamente o monitoramento e controle baseado nas condições programadas. A [Tabela 2](#) apresenta uma descrição dos principais trechos do [código](#) que está disponível para acesso no GitHub.



Tabela 2 – Descrição das Funções e Bibliotecas do Sistema.

Trecho de Código	Descrição
<code>void setup()</code>	Configura os pinos como entrada ou saída e inicializa a comunicação serial, sensores e atuadores.
<code>void loop()</code>	Função principal onde o sistema verifica os sensores e atuadores, controlando-os com base em condições estabelecidas.
<code>mostrarLCD()</code>	Função utilizada para mostrar se o sistema tem conexão com a internet e se os sensores e atuadores estão ativos ou não.
<code>regarPlantas()</code>	Função que verifica se todas as condições necessárias para regar as plantas foram atendidas, salvando os resultados no banco de dados e ligando válvulas para levar a água do aquário para as plantas.
<code>encherDecantador()</code>	Função que analisa os dados emitidos pelos sensores da caixa cisterna. Com base na análise, a bomba cisterna é acionada para encher o decantador.
<code>reabastecerAquario()</code>	Função que ativa a válvula para encher o aquário caso o sensor de nível baixo do aquário não esteja detectando água. Quando o sensor de nível alto detecta água, a válvula é automaticamente desligada para evitar transbordamento.
<code>if (horaAtual == 8    horaAtual == 17)</code>	Verifica se o horário atual corresponde aos horários programados (08h00 e 17h00) para alimentação dos peixes. Se verdadeiro, aciona o motor alimentador.
<code>#include &lt;LiquidCrystal_I2C.h&gt;</code>	Biblioteca para utilizar as propriedades do monitor LCD.
<code>lcd.init(); lcd.backlight();</code>	Métodos utilizados para ativar o monitor LCD e definir sua tonalidade.
<code>#include &lt;WiFiMulti.h&gt; #include &lt;WiFi.h&gt;</code>	Bibliotecas utilizadas para visualizar e conectar ao Wi-Fi.
<code>#include &lt;Firebase_ESP_Client.h&gt;</code>	Biblioteca utilizada para armazenar o estado dos sensores e atuadores no banco de dados Firebase.
<code>digitalWrite(valvulaDescarte, LOW); digitalWrite(valvulaHidroponia, HIGH); digitalWrite(bombaAquario, LOW);</code>	Métodos utilizados para desativar a válvula de descarte de água poluída e ativar a válvula que leva água para as plantas e sua bomba.

Fonte: Autor (2024).

## **A.4 RESULTADOS**

O sistema de aquaponia desenvolvido com técnicas de fabricação digital demonstrou desempenho eficiente e alinhado aos objetivos propostos. A integração da automação em processos críticos, como alimentação dos peixes, irrigação das plantas e controle dos níveis de água, resultou em um sistema autônomo, com redução de desperdícios e otimização do uso da água, elemento crucial em sistemas simbióticos como este.

A fabricação digital, através do corte a laser e impressão 3D, possibilitou a criação de componentes modulares precisos e específicos para atender às necessidades do sistema, simplificando a montagem e manutenção do projeto. No âmbito eletrônico, a substituição de conexões provisórias por uma placa de circuito impresso (PCB), fabricada por fresagem, garantiu maior estabilidade elétrica, eliminando falhas intermitentes em sensores e atuadores. Adicionalmente, o redesenho do mapeamento dos pinos GPIO do ESP32 corrigiu problemas de comunicação com relés e sensores, assegurando leituras e acionamentos confiáveis.

A otimização do uso da água representou um fator prioritário ao longo do ciclo do projeto. O objetivo principal era evitar o uso tradicional de água em hortas, implementando um sistema de recirculação. No sistema projetado, a água é recirculada em um ambiente simbiótico, promovendo um uso mais eficiente e sustentável desse recurso.

Todas as etapas de fabricação do projeto foram concluídas, incluindo o aquário, a hidroponia, a cisterna, o decantador e o quadro de componentes eletrônicos.

A conclusão desta etapa de desenvolvimento representa um marco importante no projeto. O sistema de aquaponia, agora funcional e automatizado, demonstra o potencial da integração entre a fabricação digital e a aquaponia. Os resultados obtidos até o momento validam a abordagem metodológica adotada e abrem caminho para futuras pesquisas e aprimoramentos. O sistema está pronto para ser explorado em estudos aplicados de engenharia, oferecendo um ambiente para investigação e aprimoramento contínuos, com potencial para gerar valiosas contribuições para a área.

## A.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A figura 16, ilustra o objetivo principal: a fabricação de todas as etapas representadas nesta figura. Todos os processos foram concluídos com sucesso, como pode ser visto nas figura 31a e figura 31b.

Impressão pessoal: Ao concluir este estágio bem-sucedido, é gratificante destacar como ele contribuiu para o meu desenvolvimento em várias dimensões cruciais da engenharia elétrica. Durante este período, pude aplicar e expandir meus conhecimentos matemáticos, científicos e tecnológicos de maneira prática e relevante.

Um dos principais critérios para o sucesso deste estágio foi a aplicação eficaz desses conhecimentos. Isso incluiu a utilização de ferramentas e técnicas de Engenharia Elétrica para projetar e implementar soluções para desafios reais, como software de simulação para circuitos elétricos e técnicas de fabricação digital, bem como o uso de software de modelagem em desenho 2D e 3D. Através da minha participação neste projeto de Aquaponia, adquiri experiência prática na operação de equipamentos e máquinas como a mini fresadora 3018 para placas de circuitos elétricos, a CNC VS 6040 para corte a laser e a impressora 3D para criar componentes personalizados. Essas habilidades práticas foram fundamentais para o sucesso do projeto.

Além disso, o trabalho em equipe desempenhou um papel vital ao longo deste estágio. Tive a oportunidade de atuar em equipes multidisciplinares, colaborando com colegas que possuíam diferentes áreas de especialização. Isso me permitiu entender a importância de integrar diversas perspectivas para alcançar soluções abrangentes e eficazes.

Outro aspecto significativo deste estágio foi a aplicação dos princípios éticos e das responsabilidades profissionais. O projeto de Aquaponia envolveu decisões críticas relacionadas à sustentabilidade e ao impacto ambiental, destacando a importância da ética em nossas ações como futuros engenheiros eletricitas.

Os testes iniciais para o cultivo de alface no sistema não foram bem-sucedidos devido a uma série de fatores identificados durante a operação. O primeiro problema observado foi o aquecimento excessivo da água, causado pela exposição direta da tubulação à luz solar, o que comprometeu o desenvolvimento das plantas. Além disso, a proliferação excessiva de algas dificultou o fluxo de bombeamento, reduzindo a eficiência do sistema hidráulico. Outro fator limitante foi a falta de experiência no manejo do cultivo, incluindo a definição inadequada da frequência de irrigação e da quantidade de nutrientes necessários para o crescimento adequado das hortaliças. Esses desafios resultaram na ineficiência do sistema para o cultivo das plantas.

Diante dessas limitações, a próxima etapa do projeto envolverá a implementação de ajustes técnicos específicos para otimizar os parâmetros de automação. Paralelamente, serão realizados novos testes na hidroponia, com modificações estruturais e operacionais,

além da participação de agricultores locais na inserção de mudas nos perfis das tubulações. Esse processo permitirá a avaliação do equilíbrio nutricional da solução aquosa e o acompanhamento do desenvolvimento das plantas, possibilitando a verificação da eficácia e qualidade do sistema.

Além das melhorias no cultivo, o projeto continuará focado na otimização da fabricação de componentes personalizados, buscando aumentar a eficiência e a durabilidade do sistema. Essas ações refletem o compromisso contínuo da equipe com a inovação e a excelência em cada fase do desenvolvimento, visando aprimorar a confiabilidade e a aplicabilidade da tecnologia desenvolvida.

## Referências

- AVANZI, Q. *Cloreto Férrico: o que é, suas utilizações e como manipular com segurança*. 2024. Disponível em: <<https://avanziquimica.com.br/blog/blog-p/cuidados-produtos-quimicos/cloreto-ferrico-o-que-e-suas-utilizacoes-e-como-manipular-com-seguranca>>. Citado na página 20.
- BRAGA, N. C. *Relés: Circuitos e aplicações*. [S.l.]: Editora Newton C. Braga, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- Brüel & Kjær Vibro. *Non-Contacting Displacement Sensors - Brüel & Kjær Vibro*. 2025. Acesso em: 2 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.bkvibro.com/product-category/products/vibration-sensors-transmitters/non-contacting-displacement-sensors/>>. Citado na página 24.
- CARNEIRO, P. C. F. et al. Produção integrada de peixes e vegetais em aquaponia. 2015. *Acesso em*, v. 15, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- CARRIJO, O. A. et al. *Princípios de hidroponia*. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2000., 2000. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- ECOEFICIENTE, S. *O que é Hidroponia?* 2019. <<https://www.ecoeficientes.com.br/o-que-e-hidroponia/>>. Acesso em: 25 de janeiro 2024. Citado na página 15.
- Espressif Systems. *ESP32-WROOM-32 Datasheet*. [S.l.], 2023. Acesso em: 8 jan. 2025. Disponível em: <[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- GERCK, E.; LIMA, J. L. O corte a laser: da teoria à máquina. *97º Seminário Internacional “Láseres: usos e aplicações industriais*, p. 1–43, 1997. Citado na página 19.
- GERSHENFELD, N. How to make almost anything: The digital fabrication revolution. *Foreign Aff.*, HeinOnline, v. 91, p. 43, 2012. Citado na página 17.
- HE, Y. et al. Laser cutting technologies and corresponding pollution control strategy. *Processes*, MDPI, v. 10, n. 4, p. 732, 2022. Citado na página 19.
- JORDAN, R. A. et al. Yield of lettuce grown in aquaponic system using different substrates. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 22, p. 27–31, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 11, 14 e 17.
- LIMA, A. F. Sistemas de produção de peixes. *Piscicultura de água doce. Multiplicando conhecimentos*, v. 1, p. 97–140, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- Northwest Sculpture Symposium Association. *CNC 2017*. 2017. Acesso em: 14 dez. 2024. Disponível em: <<https://nwssa.org/sculpture-northwest/directory-sculpture-northwest/79-tools-manual/1148-cnc-2017>>. Citado na página 20.
- REICHERT, L. Aplicação de metodologia multiprojeto à confecção de placas de circuito impresso em trabalhos acadêmicos. 2015. Citado na página 20.

- RESH, H. M. *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. [S.l.]: CRC press, 2022. Citado na página 14.
- ROGGIA, L.; FUENTES, R. C. Automação industrial. *Santa Maria: E-tec Brasil*, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 28.
- SANTOS, V. S. d. Ciclo do nitrogênio. *Brasil Escola, sd Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/biologia/ciclo-nitrogenio.html>*. Acesso em, v. 5, 2023. Citado na página 16.
- SARGUROH, S. S.; RANE, A. B. Using grbl-arduino-based controller to run a two-axis computerized numerical control machine. In: IEEE. *2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET)*. [S.l.], 2018. p. 1–6. Citado na página 21.
- SEO, Y.; LEE, D.; PYO, S. High-power fiber laser cutting for 50-mm-thick cement-based materials. *Materials*, MDPI, v. 13, n. 5, p. 1113, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- TAHIR, B. A. et al. Cutting of nonmetallic materials using nd: Yag laser beam. *Chinese Physics B*, IOP Publishing, v. 21, n. 4, p. 044201, 2012. Citado na página 19.
- Upesy. *ESP32 Pinout Reference: GPIO Pins Ultimate Guide*. 2023. Acesso em: 8 jan. 2025. Disponível em: <https://www.upesy.com/blogs/tutorials/esp32-pinout-reference-gpio-pins-ultimate-guide>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- VOLPATO, N. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. [S.l.]: Editora Blucher, 2021. Citado na página 18.
- WENDLING, M. Sensores. *Universidade Estadual Paulista. São Paulo*, v. 2010, p. 20, 2010. Citado na página 24.
- WILSON, J. S. *Sensor technology handbook*. [S.l.]: Elsevier, 2004. Citado na página 23.