

Protótipo de Sistema de Monitoramento e Automação em Microestufas Agrícolas

Daniel Martinez Dacol¹, Anderson Reinaldo da Silva¹,
Jeferson Fraytag¹

¹Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Lages (IFSC)
Rua Heitor Villa Lobos, 225 – 88.506-400 – Lages – SC – Brasil

danieldaol99@gmail.com, andersonreinaldo2347@gmail.com

jeferson.fraytag@ifsc.edu.br

Abstract. *Climate variations pose significant challenges to plant cultivation, especially in urban environments where space and time for agricultural practices are limited. This study presents the development of automated residential micro-greenhouses designed for enthusiasts seeking healthy, organic food while promoting sustainability and practicality in home gardening. The proposed system utilizes IoT technology to monitor and automatically control key variables essential for plant development. An ESP32 microcontroller is integrated with sensors for soil moisture, air humidity, and temperature, along with actuators such as a water pump, fan, exhaust, and RGB LEDs to support photosynthesis. For communication and management, an Android app developed in Flutter allows users to configure and monitor greenhouse conditions intuitively. Key challenges included the integration and operation of various devices in the system and the implementation of asynchronous communication between the ESP32 and the app. These obstacles were overcome to ensure the system is accessible and functional, enabling anyone, regardless of technical knowledge, to create and manage an ideal environment for plant cultivation. As a unique feature, the project provides a practical solution for incorporating organic gardening into an urban lifestyle. The automated micro-greenhouse optimizes resource use, such as water and energy, promoting responsible consumption practices aligned with sustainability principles.*

Resumo. *As limitações de espaço e as variações climáticas representam desafios para o cultivo doméstico, especialmente em áreas urbanas. Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma microestufa automatizada que utiliza tecnologias de IoT para monitorar e controlar variáveis como temperatura, umidade e iluminação. O sistema integra um ESP32 com sensores e atuadores, enquanto um aplicativo Android em Flutter permite ao usuário configurar e acompanhar o cultivo de forma intuitiva. Apesar dos desafios de integração e comunicação, o projeto oferece uma solução prática e sustentável, promovendo o cultivo doméstico de maneira acessível e eficiente.*

1. Introdução

As variações climáticas representam desafios significativos para o cultivo de plantas, tanto em grandes plantações quanto em pequenas hortas. Elas afetam diretamente o desenvolvimento das plantas e contribuem para o surgimento de pragas e doenças. Uma das soluções

para mitigar a influência desses desafios na criação de plantas é o cultivo em ambiente protegido.

O cultivo em ambiente protegido é um sistema agrícola especializado que pode controlar condições como temperatura, umidade do ar, radiação solar, solo, vento e composição atmosférica (Figueiredo, 2011). Um exemplo de ambiente protegido são as estufas, as quais desempenham um papel crucial na agricultura moderna, oferecendo um ambiente controlado que não só estende a temporada de crescimento das plantas, mas também as defende contra condições climáticas adversas (Bliska Júnior, 2011). Feitas geralmente de materiais como vidro ou plástico, essas estruturas normalmente aproveitam a energia solar para criar um microclima ideal para o desenvolvimento rápido e saudável das culturas.

Considerando os desafios contínuos enfrentados pela agricultura, como mudanças climáticas e a crescente demanda por alimentos, surge a necessidade de explorar tecnologias inovadoras para aprimorar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Nesse contexto, a integração da *Internet of Things* (IoT) desponta como uma solução promissora, permitindo o monitoramento e controle remoto preciso de variáveis ambientais críticas, como temperatura, umidade do ar, qualidade do solo e irrigação. Essa abordagem não apenas aumenta a produtividade e a qualidade dos cultivos, mas também reduz o desperdício de recursos e otimiza o uso de insumos agrícolas.

Tendo em vista tais benefícios, este trabalho visa apresentar o quanto o cultivo é beneficiado com a integração de *Internet of Things* (IoT) na agricultura, tornando o cultivo em estufa um sistema totalmente autônomo com controle de condições climáticas necessárias para um adequado crescimento da planta, desde temperatura até a fertilização do solo.

Além de proporcionar praticidade no cultivo, as microestufas residenciais oferecem uma série de vantagens que impactam diretamente a qualidade de vida dos usuários. Com um sistema que otimiza o ambiente para o desenvolvimento das plantas, é possível cultivar alimentos frescos e orgânicos em casa, promovendo uma alimentação saudável e livre de agrotóxicos. A tecnologia também permite o cultivo de uma variedade de ervas e hortaliças durante o ano todo, independentemente das condições climáticas, o que incentiva o consumo de alimentos frescos e locais.

Para usuários que buscam praticidade e sustentabilidade, a microestufa representa uma solução completa: o sistema automatizado requer pouca intervenção e adapta-se a pequenos espaços, sendo ideal para ambientes urbanos. Além disso, com a redução do desperdício de água e energia promovida pela IoT, o projeto se alinha com a demanda crescente por práticas de consumo mais responsáveis, oferecendo uma alternativa ecológica para quem deseja incorporar o plantio orgânico no cotidiano de forma prática e acessível.

Desta forma, o objetivo geral deste trabalho é explorar como a aplicação de IoT em sistemas de monitoramento e automação para estufas agrícolas e microestufas residenciais pode aumentar a eficiência e a produtividade do cultivo, tornando o processo acessível e prático para produtores e usuários domésticos. A proposta visa demonstrar como essa tecnologia pode facilitar o cultivo saudável e sustentável, atendendo ao interesse crescente por práticas de cultivo orgânico e alimentação natural.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Conhecer as principais necessidades de melhoria no cultivo em estufa;
- Projetar e construir uma estufa com foco em uma aplicação residencial para proporcionar um ambiente de proteção e controle para o cultivo;
- Desenvolver sistemas automatizados para controle da temperatura e umidade do ar, bem como para monitoramento e manutenção da umidade do solo, garantindo condições ideais para o cultivo.
- Adquirir dados e disponibilizá-los em uma aplicação;

O trabalho foi composto por cinco etapas distintas. A primeira etapa do projeto iniciou-se com uma investigação detalhada de referências bibliográficas, visando compreender projetos semelhantes e suas aplicações. Este processo forneceu um embasamento teórico sólido, essencial para o sucesso do projeto proposto. Além disso, foi fundamental identificar as principais necessidades de melhoria no cultivo em estufas. Isso abrangeu questões relacionadas às características das culturas cultivadas, como temperatura, luminosidade e qualidade do solo, garantindo condições ideais para o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Com as necessidades identificadas na etapa anterior, a segunda etapa foi utilizada para o desenvolvimento dos sistemas de controle de clima e solo da estufa. Este processo incluiu a seleção e instalação de sensores para monitoramento das condições ambientais e atuadores para controlar o estado da estufa, bem como o desenvolvimento de algoritmos para monitoramento e controle automático das variáveis climáticas. Na terceira etapa, foi implementado um sistema para adquirir os dados dos sensores instalados na estufa e disponibilizá-los em uma aplicação. Para isso, foram exploradas tecnologias de IoT para controle e coleta de dados em tempo real. Na quarta etapa, foi desenvolvido um aplicativo como ferramenta de interface de usuário. Este aplicativo foi essencial para proporcionar acesso fácil e intuitivo aos dados coletados, além de permitir o gerenciamento completo da estufa. Por fim, na quinta e última etapa, foi criado um protótipo para realização de testes práticos, visando validar a implementação do sistema em um ambiente real. Esta fase foi crucial para identificar possíveis ajustes e refinamentos antes da implementação completa do projeto.

Quanto à classificação, este trabalho, do ponto de vista da natureza, foi categorizado como pesquisa aplicada, uma vez que visava gerar conhecimento para aplicação prática e solução de problemas específicos. No que diz respeito à forma de abordagem do problema, foi adotada uma abordagem qualitativa, com o intuito de criar um sistema que pudesse automatizar e controlar a estufa de forma eficiente. Em relação aos procedimentos técnicos, foi utilizada a pesquisa bibliográfica, que foi realizada a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas e publicadas, como livros, artigos científicos, páginas de websites, entre outros.

O trabalho está dividido da seguinte forma: Na Seção 2, é abordado o embasamento teórico necessário para a compreensão das atividades implementadas neste projeto. Na Seção 3, é apresentado o processo de desenvolvimento do projeto, com os materiais utilizados para integração dos sensores e atuadores necessários para a automatização e monitoramento da estufa. Na Seção 4, são apontados e relatados os objetivos alcançados, apresentando os resultados obtidos. Na Seção 5, é apresentado o projeto realizado e as respectivas conclusões.

2. Referencial Teórico

Esta seção é dedicada à apresentação e entendimento de tecnologias utilizadas para o desenvolvimento de estufas automatizadas e seu uso para melhoria da eficiência no cultivo agrícola.

2.1. Agricultura 5.0

A tecnologia vem transformando o mundo e, cada vez mais, a agricultura é impactada pelas novidades tecnológicas. A Agricultura 5.0 é uma tendência que vem ganhando força, diferenciando-se da Agricultura 4.0 por promover uma maior interação entre pessoas e tecnologia, além de introduzir inovações que fazem diferença (Verde, 2024).

A Agricultura 5.0 utiliza inovações tecnológicas para enfrentar desafios como as mudanças climáticas. Para tanto, é fundamental direcionar o avanço tecnológico para a adaptação de culturas, estimular políticas públicas que fomentem práticas sustentáveis e garantir o acesso às tecnologias por agricultores em estabelecimentos menores ou regiões vulneráveis. Além disso, a agricultura mais preditiva e inteligente, com o uso de ferramentas como a inteligência artificial (IA), permite atender às crescentes demandas de produção e produtividade de forma sustentável, abrangendo dimensões econômicas, sociais e ambientais. Assim, ela tem o potencial de mitigar os impactos climáticos na produção agrícola (Barichello, 2024).

A Figura 1 apresenta um panorama das transformações tecnológicas na agricultura ao longo do tempo, desde a Agricultura 1.0 até a Agricultura 5.0. Essa evolução reflete as mudanças significativas nos métodos de produção, nas tecnologias adotadas e nos objetivos prioritários ao longo das eras.

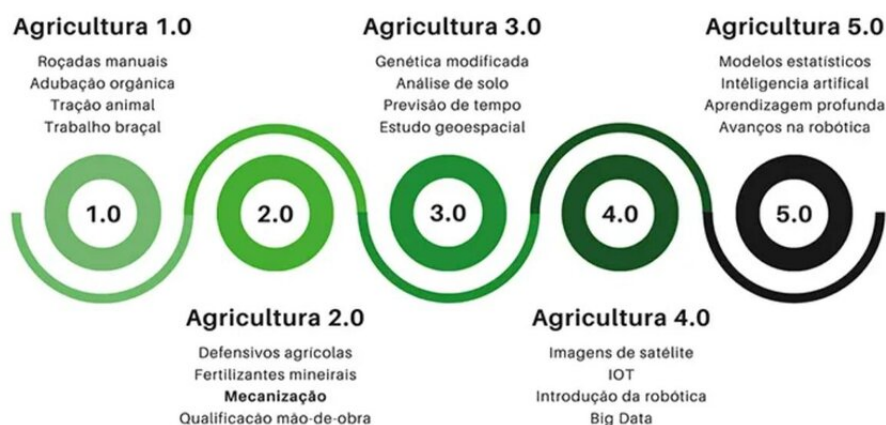


Figura 1. Evolução tecnológica da Agricultura. (Barichello, 2024).

Segundo Alasse (2023), a Agricultura 5.0 é sustentada por quatro pilares essenciais, cada um contribuindo significativamente para uma abordagem mais eficiente e sustentável da produção agrícola:

- **Aumento de produtividade:** Desde os primórdios da agricultura, o aumento da produtividade tem sido um dos principais objetivos. Hoje, as tecnologias disponíveis permitem não apenas alimentar uma população crescente, mas também

oferecer aos agricultores um controle detalhado sobre todas as etapas do processo de cultivo. Isso inclui o uso de sensores conectados via Internet das Coisas (IoT), que coletam e analisam dados em tempo real para apoiar decisões mais eficazes.

- **Segurança alimentar:** A Agricultura 5.0 incorpora uma visão ampla, levando em consideração aspectos técnicos, sociais e políticos para garantir a segurança alimentar. Tecnologias como blockchain podem ser utilizadas para rastrear a cadeia produtiva, aumentando a transparência e reduzindo incertezas sobre a disponibilidade de alimentos.
- **Redução de desperdício:** Aproximadamente 30% de toda a produção agrícola é desperdiçada, destacando a necessidade de melhorias em conservação, armazenamento e transporte. A implementação de sistemas de IA e robótica em processos de colheita e manuseio pode minimizar perdas e maximizar a eficiência operacional.
- **Alimentação saudável e sustentabilidade ambiental:** A promoção de uma alimentação saudável e a redução do impacto ambiental são metas centrais da Agricultura 5.0. Essa abordagem integra o uso de tecnologias para otimizar o uso de insumos, como fertilizantes e pesticidas, enquanto adota práticas sustentáveis que controlam os efeitos negativos da atividade agrícola sobre o meio ambiente.

Com base nos avanços tecnológicos herdados da Indústria 4.0, como IA, IoT e *Big Data*, a Agricultura 5.0 não apenas promove uma revolução no campo, mas também redefine o papel das tecnologias digitais na produção de alimentos. Essa evolução reforça a necessidade de um compromisso global com a adoção de soluções tecnológicas acessíveis e sustentáveis.

2.2. Interesse do Consumidor Urbano no Cultivo de Orgânicos

Com a crescente conscientização sobre a importância da saúde e da sustentabilidade, muitos consumidores urbanos passaram a priorizar alimentos orgânicos em suas dietas. Segundo a pesquisa Organix, o consumo de produtos orgânicos no Brasil teve um aumento expressivo, chegando a 31% da população, impulsionado principalmente por preocupações com a saúde, especialmente durante e após a pandemia de COVID-19 (Organix, 2023). Alimentos orgânicos são amplamente reconhecidos por seu valor nutricional superior e por serem cultivados sem o uso de agrotóxicos e outros produtos químicos, atributos que se alinham com a demanda contemporânea por uma alimentação mais saudável e sustentável.

No entanto, o custo elevado dos alimentos orgânicos ainda é uma barreira significativa para muitos consumidores. De acordo com a mesma pesquisa, 67% dos brasileiros consideram os orgânicos caros, e esse fator limita o acesso a esses produtos, especialmente para consumidores em áreas urbanas onde o custo de produção e distribuição pode elevar ainda mais os preços.

Nesse cenário, as microestufas residenciais surgem como uma solução acessível e prática para o cultivo de orgânicos em casa. Ao permitir que os consumidores cultivem hortaliças e ervas frescas em um ambiente controlado, essas estufas garantem que os alimentos cresçam livres de agrotóxicos e com qualidade nutritiva. A proposta de microestufas automatizadas, como a apresentada neste projeto, atende especialmente às necessidades de quem vive em espaços urbanos e possui pouco tempo ou experiência para

manter uma horta. Com sensores e sistemas de automação que regulam fatores como temperatura, umidade e irrigação, esses dispositivos tornam o cultivo autônomo e de baixo esforço.

Além dos benefícios de custo e conveniência, o cultivo doméstico fortalece a conexão do consumidor com o próprio alimento, promovendo um consumo mais responsável e consciente. O ato de plantar e colher diretamente em casa pode reforçar a valorização do processo de produção, permitindo que o usuário acompanhe e entenda cada etapa de desenvolvimento dos alimentos que consome. Esse engajamento com o cultivo próprio também inspira práticas mais sustentáveis, reduzindo a dependência do transporte e do consumo de embalagens plásticas, e incentivando uma atitude mais conservacionista e voltada para a preservação do meio ambiente.

Portanto, as microestufas residenciais automatizadas oferecem uma resposta eficiente e inovadora para o crescente interesse dos consumidores urbanos em cultivar alimentos orgânicos de forma prática, sustentável e econômica. Ao garantir uma fonte contínua de alimentos frescos, essa solução promove não só uma alimentação saudável, mas também um estilo de vida que contribui para o bem-estar pessoal e ambiental.

2.3. Estufas Agrícolas

Nos últimos 5 anos, o mercado de produtos cultivados em estufas cresceu a uma média de 5,14% ao ano. Esse crescimento é impulsionado pela qualidade superior dos produtos e pelo aumento do controle de qualidade das frutas e verduras ainda durante o cultivo (Murguero Junior, 2016).

O cultivo protegido se caracteriza pela construção de uma estrutura para a proteção das plantas contra os agentes meteorológicos, que permita a passagem da luz, já que essa é essencial para a realização da fotossíntese. Trata-se de um sistema de produção agrícola especializado que possibilita o controle de condições edafoclimáticas, como temperatura, umidade do ar, radiação, solo, vento, pragas e composição atmosférica (Dare, 2022).

Essa prática tem permitido aos agricultores aumentar seus lucros, reduzir custos de produção e garantir o abastecimento do mercado com alimentos frescos e saudáveis durante todo o ano. Os sistemas de produção de culturas mais intensivos são aqueles em estufas ou outras estruturas de proteção predominantemente de plástico. O resultado final é uma produtividade estável e prolongada em níveis elevados.

Principais vantagens de estufas agrícolas:

- **Proteção contra condições climáticas extremas:** As estufas protegem as plantas contra condições climáticas adversas, como geadas, granizo, ventos fortes e excesso de chuva, proporcionando um ambiente controlado para o cultivo.
- **Aumento da produtividade:** Ao criar um ambiente controlado, as estufas podem aumentar a produtividade das culturas, permitindo colheitas mais frequentes e consistentes ao longo do ano.
- **Conservação de recursos:** As estufas ajudam a conservar recursos como água e nutrientes, pois permitem um uso mais eficiente desses insumos no cultivo das plantas.
- **Redução de uso de pesticidas:** Em alguns casos, as estufas podem reduzir a necessidade de pesticidas, uma vez que proporcionam um ambiente mais protegido contra pragas e doenças.

- Cultivo de plantas exóticas: As estufas possibilitam o cultivo de plantas exóticas que não seriam viáveis em determinadas regiões devido às condições climáticas locais.
- Pesquisa e desenvolvimento: As estufas são fundamentais para a pesquisa e desenvolvimento de novas variedades de plantas, técnicas de cultivo inovadoras e práticas sustentáveis na agricultura.

2.4. Automação de Estufas Agrícolas

Os sistemas automáticos visam a diminuição da necessidade de mão de obra especializada, diminuindo assim os custos fixos da produção, oferecendo um produto com maior qualidade e menor consumo de recursos (Fonseca et al., 2017).

Com o aumento da demanda no mercado, os produtores têm buscado soluções eletrônicas para gerenciar e controlar os recursos necessários para a produção em estufas. Esse setor tem experimentado um crescimento significativo globalmente: o faturamento das empresas de automação voltadas para estufas aumentou em 78% desde 2010 (Silva, 2016). Além disso, as microestufas residenciais têm se tornado cada vez mais populares entre os moradores urbanos, proporcionando uma oportunidade para o cultivo de alimentos frescos e plantas ornamentais em espaços limitados.

A proposta de automatização do sistema de estufas agrícolas visa tornar o processo de cultivo mais eficiente e acessível tanto para agricultores de pequena escala e entusiastas da jardinagem doméstica até grandes produtores. Ao introduzir tecnologias de automação e monitoramento, como sensores de temperatura, umidade e luz, combinados com sistemas de controle automatizado, busca-se criar uma estufa versátil de baixo custo, capaz de adaptar-se às necessidades específicas das plantas cultivadas e do ambiente circundante.

A fim de demonstrar os benefícios da automação no manejo de estufas agrícolas, a seguir na Tabela 1 são apresentados dados comparativos de economia de recurso hídrico entre sistemas automáticos e o manejo manual.

Tabela 1. Economia de recursos hídricos comparado ao sistema de manejo manual (Fonseca et al., 2017).

Cultura	Redução no consumo de água	Redução no consumo de energia (bombeamento)
Alface Lisa	35,4%	11,0%
Tomate Italiano	54,1%	16,8%
Brócolis	29,5%	8,7%

Esta análise foi realizada como parte das conclusões do estudo desenvolvido por Fonseca et al. (2017). Como pode ser observado, constatou-se melhorias significativas na redução do consumo de água e de energia na operação automatizada. Além disso, uma análise comparativa do ganho de peso dos produtos cultivados em diferentes sistemas de plantio foi conduzida, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Relação do ganho de peso dos produtos, comparado ao sistema de plantio normal (Fonseca et al., 2017).

Cultura	Peso em relação ao plantio normal
Alface Lisa	113,2%
Tomate Italiano	104,6%
Brócolis	108,5%

Desta forma, como as principais vantagens da automatização do sistema, podem-se citar:

- **Baixo custo de implementação e manutenção:** Ao utilizar tecnologias acessíveis e de fácil instalação, como sensores e atuadores de baixo custo, a automatização do sistema de estufas agrícolas pode ser viabilizada mesmo para pequenos produtores e entusiastas da jardinagem residencial.
- **Versatilidade e adaptabilidade:** A capacidade de monitorar e controlar diferentes variáveis ambientais, como temperatura, umidade e luminosidade, permite ajustar as condições da estufa de acordo com as necessidades específicas das plantas cultivadas, promovendo um crescimento saudável e produtivo.
- **Redução do trabalho manual:** A automação do sistema de estufas reduz a necessidade de intervenção manual, permitindo que os agricultores e jardineiros dediquem mais tempo a outras atividades importantes, como o planejamento de cultivo e a colheita.

Cabe destacar que existem diversos modelos de estufas agrícolas e sistemas de automação disponíveis no mercado, que servem como referência para o desenvolvimento do sistema proposto neste trabalho. Além disso, há pesquisas e projetos relacionados à aplicação de IA na análise de dados agrícolas, visando melhorar a eficiência e a produtividade na agricultura. Esses modelos e trabalhos podem fornecer *insights* valiosos para o desenvolvimento e aprimoramento do sistema de estufas automatizadas.

2.5. Internet of Things (IoT)

O termo IoT, ou Internet das Coisas, está cada vez mais presente tanto na Indústria 4.0, quanto na Agricultura 5.0. Este termo refere-se à rede coletiva de dispositivos conectados e à tecnologia que facilita a comunicação entre os dispositivos e a nuvem, bem como entre os próprios dispositivos. Graças ao advento de *chips* de computador baratos e telecomunicações de alta largura de banda, agora temos bilhões de dispositivos conectados à Internet. Isso significa que dispositivos do dia a dia, como escovas de dentes, aspiradores, carros e máquinas, podem usar sensores para coletar dados e responder de forma inteligente aos usuários.

A Internet das Coisas integra “coisas” cotidianas à Internet. Engenheiros de computação vêm adicionando sensores e processadores a objetos do cotidiano desde a década de 1990. No entanto, o progresso foi inicialmente lento porque os *chips* eram

grandes e volumosos. *Chips* de computador de baixa potência chamados etiquetas RFID foram usados pela primeira vez para rastrear equipamentos caros. À medida que os dispositivos de computação diminuíram de tamanho, esses *chips* também se tornaram menores, mais rápidos e mais inteligentes ao longo do tempo (Amazon Web Services, 2024).

A Internet das Coisas (IoT) gradualmente trouxe diversas mudanças tecnológicas, transformando a maneira como interagimos com o mundo, tornando-a mais simples e confortável por meio de várias tecnologias e aplicações. Os benefícios da IoT são infinitos e se estendem a todos os campos, tendo o importante potencial de fornecer benefícios sociais e econômicos para economias emergentes e em desenvolvimento. Isso inclui áreas como agricultura sustentável, qualidade e uso da água, saúde, manufatura e gestão ambiental, entre outras. Dessa forma, a IoT se apresenta como uma ferramenta promissora para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (Ait Mouha, 2021) como é apresentado na Figura 2.



Figura 2. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas.

As aplicações em IoT estão alinhadas com:

- ODS 2 - Fome Zero e Agricultura Sustentável: A IoT otimiza a agricultura, monitorando condições do solo, clima e pragas, permitindo uma produção mais eficiente e reduzindo o desperdício de alimentos.
- ODS 3 - Saúde e Bem-estar: Dispositivos vestíveis e sensores monitoram a saúde de indivíduos, permitindo diagnósticos precoces e tratamentos personalizados. A telemedicina, por sua vez, amplia o acesso a cuidados de saúde em áreas remotas.
- ODS 6 - Água Potável e Saneamento: Sensores monitoram a qualidade da água em rios e reservatórios, e sistemas inteligentes otimizam a distribuição de água, reduzindo perdas e garantindo o acesso a água potável para todos.
- ODS 7 - Energia Acessível e Limpa: A IoT permite a gestão eficiente de energia em edifícios e indústrias, otimizando o consumo e integrando fontes renováveis.
- ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura: A IoT impulsiona a indústria 4.0, com fábricas inteligentes e processos automatizados, aumentando a produtividade e a eficiência.

- ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis: Sensores monitoram o tráfego, a qualidade do ar e a gestão de resíduos, tornando as cidades mais inteligentes e habitáveis.
- ODS 13 - Ação Climática: Sensores monitoram as emissões de gases do efeito estufa, permitindo a implementação de medidas para mitigar as mudanças climáticas.
- ODS 14 - Vida na Água: A IoT monitora a saúde dos oceanos, rastreia a pesca ilegal e protege a biodiversidade marinha.
- ODS 15 - Vida Terrestre: Sensores monitoram a desmatamento, a qualidade do solo e a biodiversidade terrestre, auxiliando na conservação de ecossistemas.

Em resumo, a IoT oferece um enorme potencial para enfrentar os desafios globais e construir um futuro mais sustentável. Ao conectar objetos e coletar dados em tempo real, essa tecnologia permite otimizar processos, tomar decisões mais informadas e promover o desenvolvimento sustentável em diversas áreas.

2.6. Influência do Espectro de Cores no Desenvolvimento das Plantas

As plantas utilizam diferentes comprimentos de onda de luz para realizarem a fotossíntese, o processo fundamental para a produção de energia e crescimento. Cada cor no espectro luminoso corresponde a um comprimento de onda específico, e a absorção dessas ondas varia de acordo com os tipos de pigmentos presentes nas plantas. Essa variação de espectros de luz influencia diretamente o desenvolvimento vegetal, desde a germinação até a frutificação.

Segundo Paulilo et al. (2020), as plantas fotossintetizantes utilizam apenas uma pequena faixa de toda a radiação emitida pelo sol, denominada radiação visível ou luz, que é transmitida por ondas de energia conhecidas como fótons. A energia de cada fóton varia de acordo com seu comprimento de onda; por isso, a luz azul (450 nm) possui mais energia do que a luz vermelha (650 nm), o que impacta o processo fotossintético de maneira diversa em diferentes tipos de pigmentos. A Figura 3 mostra o espectro de luz visível (380 nm - 770 nm).

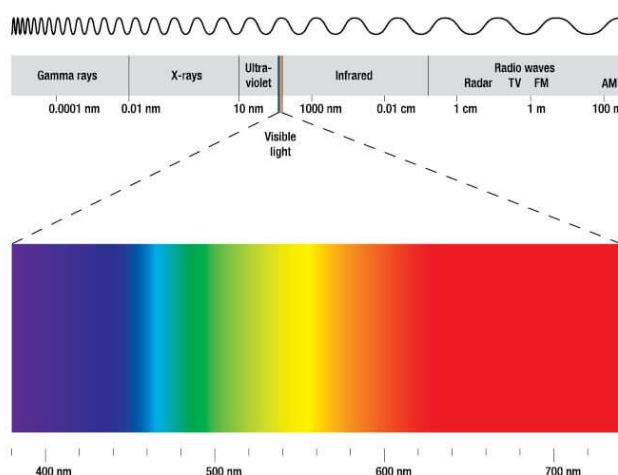


Figura 3. Espectro da luz visível entre 380 nm e 770 nm, aproximadamente (GroHo Hidroponia, 2024).

Dentro desse espectro, cada cor possui um comprimento de onda específico: o azul e o violeta estão nas faixas mais curtas (com maior energia), enquanto o vermelho possui as ondas mais longas (com menos energia). As plantas utilizam partes desse espectro, principalmente as regiões azul e vermelha, para realizar a fotossíntese de maneira eficiente, pois é nelas que os pigmentos, como as clorofilas, absorvem mais luz.

Existem diferentes tipos de clorofila, cada uma com características de absorção específicas que permitem a captação de luz em faixas variadas do espectro visível. A clorofila-a, presente em quase todos os organismos fotossintetizantes, é o principal pigmento responsável pela absorção de luz para a fotossíntese.

Além da clorofila-a, principal pigmento fotossintético, as plantas possuem a clorofila-b. Essa molécula atua como um complemento, expandindo a capacidade das plantas de absorver luz. A clorofila-b é capaz de captar comprimentos de onda luminosos que a clorofila-a não consegue, permitindo que as plantas utilizem uma gama mais ampla de luz solar, mesmo em condições de menor intensidade, como em ambientes sombreados. Há também outros tipos de clorofila, como a clorofila-c, comum em muitas algas, que se adapta bem a condições aquáticas e se especializa na captação de diferentes comprimentos de onda para complementar a absorção da luz. Essa diversidade de tipos de clorofila garante que as plantas e outros organismos fotossintetizantes possam se adaptar a uma variedade de ambientes e condições de luz, otimizando a eficiência do processo fotossintético (SoBiologia, 2008).

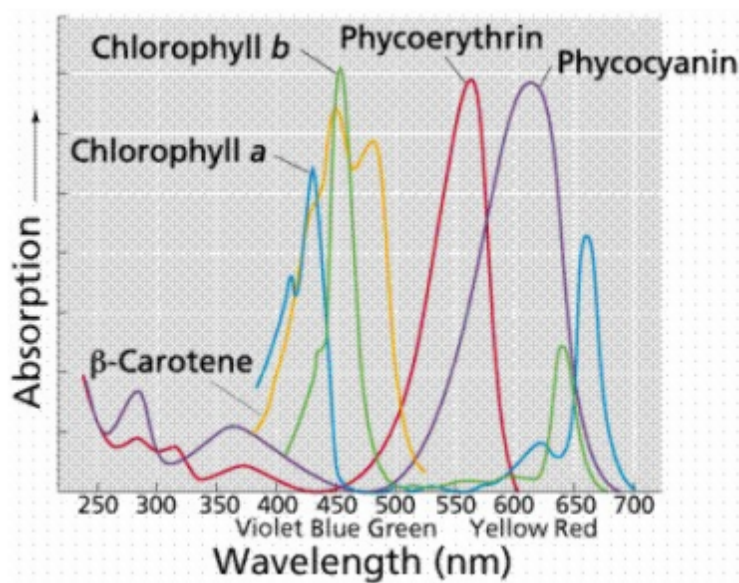


Figura 4. Influência de espectro de cores em tipos de clorofila (Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2020).

O gráfico da Figura 4 ilustra como diferentes espectros de luz afetam a fotossíntese nos tipos de clorofila. Conforme pode ser observado, a clorofila-a, a mais comum, absorve principalmente luz azul e vermelha, sendo mais eficiente em condições de luz intensa. Já a clorofila-b, menos comum, absorve luz azul e amarela, favorecendo a fotossíntese em ambientes com menor luminosidade, onde predomina a luz amarela. O betacaroteno absorve luz azul e verde, auxiliando as plantas em condições de baixa luminosidade.

Assim, a escolha do espectro de luz adequado ao tipo de cultivo pode oferecer vantagens consideráveis. Em ambientes de cultivo artificial, como estufas, é possível manipular as condições de iluminação para atender às necessidades fotossintéticas específicas das plantas. Isso não só aumenta a produtividade e a qualidade das plantas, mas também permite uma melhor eficiência energética, evitando o uso de luzes fora das faixas mais aproveitáveis. Em última análise, compreender as diferenças na absorção de luz pelos pigmentos fotossintéticos permite criar estratégias mais eficientes e sustentáveis no manejo da iluminação para cada tipo de cultura.

A Figura 5 apresenta um comparativo dos efeitos de diferentes combinações de LEDs no crescimento da alface romana vermelha ‘Outredgeous’. As plantas cultivadas sob LEDs RGB + FR (vermelho, verde, azul e infravermelho) exibiram maior expansão foliar e acúmulo de biomassa. Em contrapartida, a exposição a LEDs vermelhos e azuis resultou em níveis elevados de pigmentação e compostos secundários, indicando um potencial aumento no valor nutricional. Esses resultados ressaltam a importância de ajustar as receitas de luz para otimizar simultaneamente o crescimento, a produtividade e a qualidade nutricional das culturas em ambientes controlados (Mickens et al., 2018).



Figura 5. Resultado comparativo no crescimento de alfaces, com diferentes tipos de espectros.

O cultivo de alfaces com maior área foliar, revelaram a alta eficiência do espectro LED, destacando a importância de uma escolha adequada de luz para o desenvolvimento das plantas. A luz LED, além de aumentar a produtividade, é uma solução eficaz em ambientes controlados, como estufas, sendo valiosa em regiões de clima extremo. Os resultados indicam que a luz LED pode ser uma tecnologia promissora para o futuro da agricultura.

De acordo com (Zhang, 2024), diferentes espectros de luz influenciam os processos de crescimento das plantas de maneiras específicas e variam conforme a espécie e o estágio de desenvolvimento. Em geral, a luz azul e a luz vermelha são essenciais, sendo a luz azul (400 - 500 nm) particularmente importante para a produção de clorofila e o desenvolvimento radicular, o que promove o crescimento inicial e fortalece as mudas. Em plantas maduras no estágio vegetativo, uma combinação equilibrada de luz azul e vermelha estimula o desenvolvimento das folhas e caules, mantendo a planta compacta e promovendo a fotossíntese de forma eficaz. Para a fase de floração e frutificação, o espectro vermelho se torna predominante, favorecendo a produção de botões e aumentando o tamanho e a duração das flores. Espécies como suculentas, por exemplo, necessitam de maior quantidade de luz vermelha para uma floração ideal, enquanto plantas com folhas verdes e ervas se beneficiam mais de uma proporção equilibrada de luz azul e vermelha.

Em suma, ajustar a proporção de luz conforme o estágio de desenvolvimento e o tipo de planta permite não apenas otimizar o crescimento, mas também aumentar a qualidade da produção em cada fase de cultivo, oferecendo uma abordagem mais eficiente para o manejo da iluminação em ambientes controlados.

2.7. Trabalhos Relacionados

Para contribuir com a pesquisa, realizou-se um levantamento de Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC) sobre o uso de automação em estufas agrícolas. Um exemplo relevante nesse contexto é o trabalho de (Bastos et al., 2020), que desenvolveu o DIANA – Dispositivo de Análise e Controle de Estufas Agrícolas. O DIANA foi focado em proporcionar condições climáticas ideais para a produção em estufas de hortifrutigranjeiros, incluindo a interação do usuário por meio de um aplicativo e a implementação de inteligência artificial para otimização do crescimento das culturas. A conclusão principal é que o projeto DIANA oferece uma solução eficiente para o cultivo agrícola em estufas, melhorando a qualidade dos produtos e superando desafios climáticos, ao mesmo tempo em que apresenta potencial para avanços tecnológicos que aumentam a praticidade e reduzem custos.

O desenvolvimento de estufas inteligentes e automatizadas tem sido uma área de pesquisa em constante evolução. Fernandes (2017) demonstrou a viabilidade de utilizar sensores conectados à plataforma Arduino para monitorar e regular variáveis importantes, como temperatura, luminosidade, umidade do ar e do solo, visando garantir resultados satisfatórios na produção e qualidade dos produtos cultivados. O protótipo criado permitiu a integração de sensores e atuadores com um aplicativo *mobile*, demonstrando eficiência na automação do cultivo de hortaliças. Além disso, o sistema mostrou potencial para ser adaptado a outros segmentos, como a automatização de aviários, indicando que os objetivos estabelecidos foram alcançados com sucesso.

O trabalho de Longo e Abreu (2021) propôs um projeto abrangente de estufa automatizada, incorporando um sistema central baseado na placa FriendlyArmTiny 6410, capaz de controlar não apenas a irrigação e a temperatura, mas também a ventilação e a recuperação de diferentes configurações. Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que o controle de temperatura foi mantido estável, com o sistema ativando o aquecedor em momentos específicos, e a umidade do solo se manteve próxima do valor máximo, evidenciando a eficiência do sistema de automação em gerenciar a irrigação. Além disso, a bomba d'água foi ativada apenas uma vez para manter a umidade do solo dentro dos parâmetros estabelecidos, o que confirma a viabilidade do projeto. Em relação aos custos dos recursos, o projeto foi desenvolvido com foco na acessibilidade e na redução de despesas operacionais. A utilização de componentes como a placa FriendlyArmTiny 6410 e sensores de temperatura e umidade de baixo custo permitiu a criação de um sistema eficiente sem comprometer a qualidade. Além disso, a automação contribui para a economia de água e energia, uma vez que os sistemas são acionados apenas quando necessário, evitando desperdícios. Essa abordagem não só torna o cultivo mais sustentável, mas também viabiliza a implementação de estufas automatizadas em diferentes escalas, desde residenciais até comerciais, tornando a tecnologia acessível a um maior número de agricultores.

A proposta de Almeida (2022) expande ainda mais esse conceito, explorando a viabilidade do cultivo de cogumelos em ambiente residencial por meio de uma estufa automatizada, integrada a um servidor de IoT e acompanhada por um aplicativo móvel para

monitoramento e controle do sistema. Os resultados obtidos mostraram um aumento significativo na produção de cogumelos, com uma colheita total de 13,459 kg, representando um aumento de aproximadamente 57% em relação à fase anterior do projeto, onde foram colhidos 7,656 kg. Essa melhoria na produção destaca a eficácia da automação no cultivo de fungos, permitindo um controle mais preciso das variáveis ambientais, o que não só melhora a constância dos resultados, mas também pode gerar economia de recursos, como água.

O projeto de Longo e Abreu (2021) se concentra em uma variedade de cultivos, enquanto que o trabalho de Almeida (2022) é especificamente voltado para o cultivo de cogumelos, o que apresenta desafios e requisitos únicos, como a necessidade de umidade elevada e controle rigoroso da temperatura. Essa especialização pode oferecer *insights* valiosos para a produção de alimentos em pequena escala, contribuindo para a promoção de uma alimentação saudável e acessível. A automação em estufas pode ser configurada para atender a diferentes tipos de cultivo, adaptando-se às necessidades específicas de cada planta. Por exemplo, cultivos de hortaliças podem exigir um controle mais rigoroso da umidade do solo e da temperatura, enquanto plantas que preferem ambientes mais secos podem necessitar de sistemas de ventilação mais eficientes. Sensores de umidade do solo, temperatura, luminosidade e CO₂ podem ser integrados para monitorar e ajustar as condições em tempo real, garantindo que cada tipo de planta receba o ambiente ideal para seu crescimento.

Neste contexto, a automação pode ainda incluir sistemas de irrigação por gotejamento, que são particularmente eficazes para cultivos que requerem um fornecimento constante de água, minimizando o desperdício. A flexibilidade dos sistemas automatizados permite que os agricultores programem ciclos de irrigação e fertilização, ajustando-os conforme as condições climáticas e as fases de crescimento das plantas. Isso não só melhora a eficiência do uso de recursos, mas também pode aumentar a produtividade e a qualidade dos cultivos. A automação não apenas simplifica o processo de cultivo, mas também se mostra uma ferramenta eficaz para uma variedade de plantas, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes.

A tabela 3 apresenta uma análise detalhada das funcionalidades e características de diferentes soluções de automação para estufas, comparando-as com a proposta do presente projeto. As funcionalidades selecionadas neste quadro foram escolhidas com base em características presentes nos trabalhos analisados. Entre elas, o controle de luminosidade, que ajusta a intensidade da luz para promover um crescimento saudável das plantas, e o controle de temperatura, que utiliza sensores para regular a temperatura interna, garantindo condições ideais de cultivo. O controle de umidade do solo, por sua vez, ativa a irrigação automaticamente, mantendo o solo adequadamente úmido. A implementação de um *timer* automático facilita o manejo da estufa, permitindo a programação de horários para os sistemas de irrigação, ventilação e iluminação. O desenvolvimento de um mecanismo que possibilita a comunicação remota entre a estufa e dispositivos externos, e a criação de uma base de dados armazena informações importantes, como o histórico de condições ambientais e dados de cultivo. A listagem de itens cadastrados e o monitoramento do *status* do sistema em tempo real proporcionam uma visão completa e atualizada das condições da estufa. O aplicativo móvel desenvolvido oferece controle e monitoramento remoto, permitindo ao usuário acessar a estufa de qualquer lugar e re-

ceber notificações em tempo real sobre mudanças nas condições internas. Por fim, o suporte para diferentes culturas, bem como o tamanho compacto da estufa, facilita sua mobilidade, tornando-a adaptável a diversas necessidades e espaços, o que destaca a versatilidade e a eficiência do trabalho proposto. Essa análise foi feita com o objetivo de destacar os principais pontos da solução proposta neste trabalho, quando comparada com outras já existentes, evidenciando como a mesma se diferencia e oferece mais valor ao usuário final.

Características	Trabalho de Bastos et al. (2020)	Trabalho de Fernandes (2017)	Trabalho de Longo e Abreu (2021)	Trabalho de Almeida (2022)	Solução Desenvolvida
Controle de Luminosidade da Estufa	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Controle de Temperatura de Estufa	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Controle de Umidade do Solo da Estufa	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Implementação de um Timer Automático	Não	Sim	Não	Sim	Sim
Implementação de uma Base de Dados	Não	Sim	Não	Sim	Sim
Status do Sistema	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Implementação de um Aplicativo Móvel para Controle	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Monitoramento e Controle Remoto	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Suporte para Diferentes Culturas	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Tamanho Compacto	Não	Não	Não	Não	Sim

Tabela 3. Comparativo entre soluções de automação para estufas

O diferencial deste trabalho reside na integração abrangente de múltiplas funcionalidades em uma solução única e acessível para a automação de estufas. Diferentemente de outras propostas, o sistema desenvolvido oferece controle detalhado de luminosidade, temperatura e umidade do solo, além de um *timer* automático e um aplicativo móvel para monitoramento e controle remoto.

Além disso, o sistema permite a configuração de diferentes parâmetros ambientais, tornando-se adaptável a diversas culturas e necessidades de cultivo. Enquanto outras

soluções analisadas possuem estruturas fixas ou de grande porte, como uma estufa baseada em um refrigerador, a proposta deste trabalho se destaca pela portabilidade. Sua estrutura compacta permite que a estufa seja facilmente transportada e utilizada em diferentes espaços, oferecendo maior flexibilidade ao usuário.

2.8. Soluções de Mercado para Agricultura Automatizada

Empresas de tecnologia agrícola têm desenvolvido soluções para facilitar o cultivo de pequenas plantações, trazendo mais controle tanto para produtores quanto para jardineiros. Três exemplos de empresas com objetivos similares ao deste projeto são:

- Elysios: Voltada para a agricultura de precisão, a Elysios utiliza sensores e dados integrados para monitorar solo, umidade e temperatura, permitindo que produtores acompanhem suas plantações em tempo real e tomem decisões mais informadas (www.elysios.com.br).
- Click and Grow: Com foco no consumidor final, a Click and Grow oferece sistemas de jardinagem automatizada para ambientes internos. Seus kits contêm cápsulas de solo com nutrientes, automatizando irrigação e nutrientes, ideal para ambientes urbanos e pequenos (www.clickandgrow.com).
- Brota Company: Empresa brasileira, com proposta semelhante à Click and Grow, adapta seus kits de cultivo ao mercado local. Utiliza materiais sustentáveis, iluminação LED específica e promove produtos acessíveis e ecológicos, focados em jardinagem urbana e condições climáticas do Brasil (www.brotacompany.com.br).

Cada uma dessas empresas oferece soluções que demonstram como o uso de automação e monitoramento pode simplificar o cultivo em diferentes contextos. Enquanto Elysios aposta em uma abordagem de monitoramento detalhado para o mercado agrícola, Click and Grow e Brota Company focam em soluções para ambientes domésticos e usuários casuais, com ênfase na conveniência e sustentabilidade. Esses modelos ilustram o potencial de mercado para tecnologias de cultivo controlado e servem como referências para a implementação de funcionalidades no projeto de estufas automatizadas, como monitoramento remoto, controle ambiental e o uso de componentes *eco-friendly*.

3. Desenvolvimento

Nesta seção, é detalhado o processo de desenvolvimento do projeto de automação e monitoramento da estufa. São abordados os materiais e componentes eletrônicos utilizados, bem como é desenvolvida a integração dos sensores e atuadores ao sistema. O objetivo é demonstrar como cada elemento foi selecionado e configurado para criar uma solução eficiente, capaz de controlar e otimizar as condições ambientais da estufa de forma automatizada.

3.1. Microcontroladores

Os microcontroladores são circuitos integrados que contêm todos os componentes necessários para seu funcionamento, conforme exemplificado na Figura 6, dependendo apenas da fonte de alimentação externa. Podemos considerá-los como computadores de um único *chip*. Um sistema microprocessado consiste em uma unidade CPU (*Central Processing Unit*) e um conjunto de periféricos essenciais para seu funcionamento, incluindo memória de dados, memória de programa e um circuito de *clock*, responsável pela

sincronização das operações. Os microcontroladores se distinguem dos sistemas tradicionais por já integrarem seus periféricos dentro do próprio componente. Essa integração é uma das principais vantagens dos microcontroladores, pois facilita sua utilização e reduz custos. Os sistemas microcontrolados exigem menos componentes, simplificando a construção das placas de circuito e diminuindo os custos de produção (Kerschbaumer, 2018).

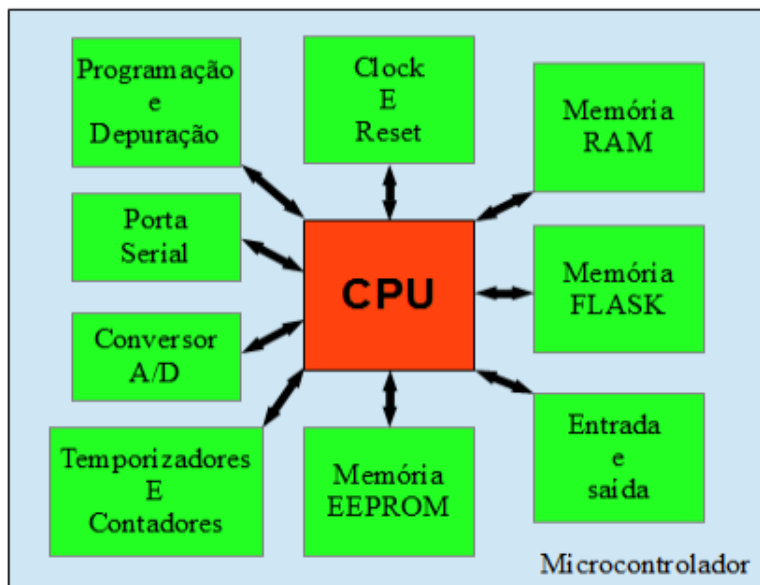


Figura 6. Componentes básicos de um microcontrolador (Kerschbaumer, 2018).

Para este projeto, utilizou-se a placa de desenvolvimento ESP32-2432S028R e a placa ESP32-PICO-D4 produzida pela empresa Espressif Systems, apresentadas nas Figuras 7 e 8, respectivamente. Este microcontrolador foi escolhido devido as suas características técnicas e funcionalidades que o tornam ideal para aplicações que requerem conectividade, processamento eficiente e baixo consumo de energia.



Figura 7. Placa de desenvolvimento ESP32-2432S028R (Tech, 2024).

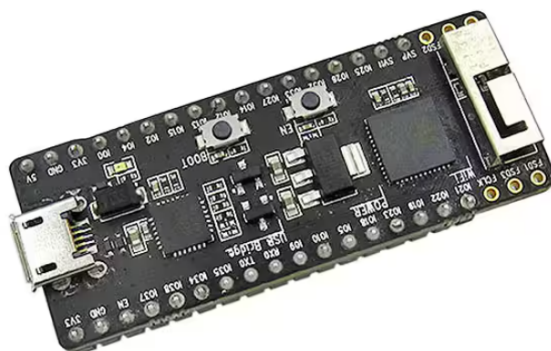


Figura 8. Placa de desenvolvimento ESP32-PICO-D4 (Digikey, 2024).

Característica	ESP32	ATmega328P	STM32F103	RP2040
Conectividade Wi-Fi	Sim (Wi-Fi integrado)	Não	Não	Não
Conectividade Bluetooth	Sim (Bluetooth Classic e BLE)	Não	Não	Não
Número de Núcleos	2 núcleos (dual-core)	1 núcleo (single-core)	1 núcleo (single-core)	2 núcleos (dual-core)
Velocidade de Clock	Até 240 MHz	Até 16 MHz	Até 72 MHz	133 MHz
Memória RAM	Até 520 KB	2 KB RAM	20 KB	264 KB
Memória Flash	Até 16 MB	Até 32 KB	Até 128 KB	-
GPIOs (Pinos Digitais)	34 pinos digitais	14 pinos digitais	37 pinos digitais	26 pinos digitais
Conversor Analógico-Digital	12 bits, 18 canais	10 bits, 6 canais	12 bits, 16 canais	12 bits, 5 canais
Comunicação Serial (UART)	3 interfaces UART	1 interface UART	2 interfaces UART	2 interfaces UART
Comunicação SPI/I2C	Sim, múltiplas interfaces	Sim, 1 interface SPI/I2C	Sim, múltiplas interfaces	Sim, múltiplas interfaces
Suporte a Desenvolvimento	Espressif IDF, Arduino, PlatformIO	Arduino IDE	STM32CubeIDE, Arduino IDE	MicroPython, C/C++
Facilidade de Uso	Alta, com diversas bibliotecas	Alta, com grande comunidade	Média, mais complexa	Alta, com suporte Python/C/C++

Tabela 4. Comparativo entre microcontroladores.

A Tabela 4 apresenta um comparativo direto do ESP32 com outros microcontroladores também usados em projetos de IoT. Observa-se que umas das vantagens é a conectividade Wi-fi e bluetooth nativamente integrada ao ESP32, possibilitando a transmissão de dados em tempo real para a nuvem ou diretamente para dispositivos móveis. Isso permite ao usuário monitorar variáveis da estufa, como temperatura, umidade e luminosidade, e permite o controle e configuração dos parâmetros de qualquer lugar com acesso à internet.

O ESP32 oferece ainda um excelente desempenho em termos de processamento. Com um *clock* de até 240 MHz e um processador dual-core, o microcontrolador é capaz de executar tarefas complexas, como o processamento de sinais dos sensores e a tomada de decisões em tempo real, sem comprometer a eficiência energética.

A arquitetura do ESP32 inclui periféricos integrados, como ADCs (Conversores

Analógico-Digitais) e interfaces para comunicação serial, que facilitam a integração com diversos sensores e atuadores necessários para o controle automático do ambiente da estufa. Além disso, a placa de desenvolvimento utilizada já conta com um display LCD integrado, conforme apresentado na Figura 9, onde se exemplifica a exibição de dados de temperatura, umidade do ar e do solo.

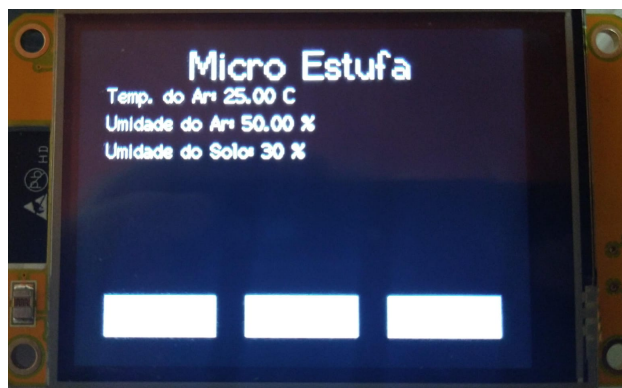


Figura 9. Display da tela da estufa.

Cabe destacar ainda que o ESP32 conta com suporte a diversas plataformas de desenvolvimento, como o Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) que oferece recursos para programar microcontroladores e tem suporte para o ESP32, e a disponibilidade de bibliotecas prontas para a integração de sensores e módulos adicionais, como o DHT11 para medição de temperatura e umidade, o que torna o processo de desenvolvimento mais ágil e eficiente.

3.2. Sensores e Atuadores

Sensores são dispositivos que convertem grandezas físicas em sinais elétricos correspondentes. Os sensores podem ser utilizados para monitorar a velocidade com que se movem, a posição em que se encontram, a localização de uma peça a ser manipulada, as dimensões da peça, a aproximação de um ser humano e o impacto com um obstáculo, entre outras aplicações (Moraes, 2003).

Enquanto os sensores coletam informações do ambiente, os atuadores são responsáveis por transformar esses sinais em ações físicas. Os atuadores podem ser motores elétricos, hidráulicos ou pneumáticos, e sua função é executar movimentos ou aplicar força em resposta aos comandos recebidos dos sistemas de controle. Eles são utilizados em diversos processos industriais, como abrir ou fechar válvulas, mover componentes mecânicos, acionar sistemas de frenagem, entre outras aplicações. Os atuadores são fundamentais para garantir a precisão e a eficiência das operações automatizadas, permitindo que os sistemas controlem e ajustem os processos de acordo com as necessidades específicas (Roisenberg, 2024).

Sensores e atuadores estão entre os blocos de construção da IoT (Internet das Coisas). Em muitas aplicações de IoT, há necessidade de um ou mais sensores para coletar dados e informações sobre o sistema. Os dados são processados, e comandos podem ser enviados aos atuadores que, por sua vez, afetam o sistema. Em um ciclo contínuo, os

sensores coletam dados que serão transmitidos pela rede e os atuadores exercem ações sobre o sistema. Para o projeto proposto, utilizam-se os seguinte dispositivos:

- Sensor do Sistema de Controle Térmico: A Figura 10 apresenta o sensor DHT11, capaz de medir a umidade e temperatura do ambiente. Esses dados serão utilizados para controlar o sistema de irrigação e de temperatura da estufa;



Figura 10. Sensor de temperatura e umidade DHT11 (Stempedia, 2024).

- Sensor do Sistema de Controle Térmico: A Figura 11 apresenta o sensor de umidade de solo, capaz de medir a quantidade de umidade diretamente na raiz do cultivo, gerando informações para o sistema de irrigação;

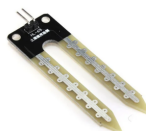


Figura 11. Sensor de umidade de solo (MakerHero, 2024).

- Atuador do Sistema de Controle Térmico: A Figura 12 apresenta um cooler utilizado para realizar a circulação e troca de ar, mantendo a temperatura interna dentro dos parâmetros desejados.



Figura 12. Cooler ventoinha (BitMaker, 2024).

- Atuador do Sistema de Irrigação: A Figura 13 apresenta a bomba de água utilizada no sistema. Este elemento irá atuar para irrigação da estufa, bombeando água de um reservatório próprio nos momentos de baixa umidade;



Figura 13. Bomba de água de baixa potência (RoboCore, 2024).

- Atuador do Sistema de Iluminação: A Figura 14 apresenta um LED do tipo RGB. Este dispositivo será utilizado para emitir diferentes comprimentos de onda, em diferentes intensidades, dentro do espectro visível de cores;



Figura 14. Led RGB de alto brilho (Eletrogate, 2024).

Sensores e atuadores possibilitam soluções de IoT em todos os campos verticais da IoT, desde cidades inteligentes e agricultura inteligente, até saúde pessoal e transporte inteligente (Ait Mouha, 2021).

3.3. Arquitetura

A arquitetura desenvolvida para a estufa automatizada baseia-se em um modelo de IoT que integra *hardware*, *software* e serviços em nuvem para permitir o monitoramento e controle remoto do ambiente interno da estufa, conforme representado na Figura 15.

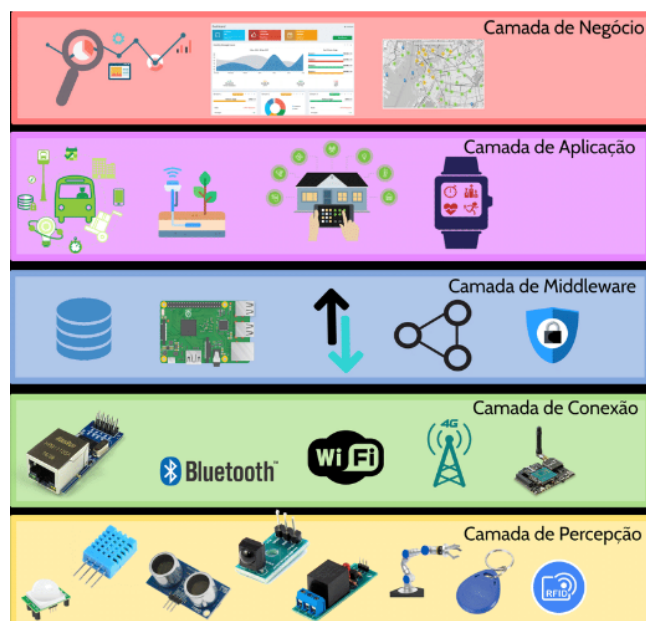


Figura 15. Representação de camadas da arquitetura IoT (Santana et al., 2019).

3.3.1. Camada de Percepção

A camada de percepção é composta pelos sensores e atuadores instalados na microestufa, além do microcontrolador ESP32, que atua como gerenciador local do sistema. Nesta camada, os sensores são responsáveis por coletar dados essenciais, como temperatura, umidade do solo e do ar. Os atuadores, como bomba d'água, ventiladores, exaustores

e LEDs RGB, são controlados para manter o ambiente da estufa dentro dos parâmetros configurados pelo usuário.

A estrutura utiliza dois microcontroladores ESP32 conectados entre si para otimizar a utilização de pinos e facilitar o gerenciamento dos dispositivos. O ESP32 principal (mestre) se comunica com o ESP32 secundário (escravo) via protocolo UART. O ESP32 escravo é responsável por coletar dados dos sensores e repassar informações ao mestre, além de receber comandos para ativar os atuadores. O mestre gerencia a comunicação com o broker MQTT e realiza o envio de dados para o aplicativo móvel.

3.3.2. Camada de Conexão

A conectividade entre a camada de dispositivos e a nuvem é garantida pela rede Wi-Fi da estufa, à qual o ESP32 mestre se conecta para transmitir e receber informações. O protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é utilizado para a comunicação de dados, como ilustrado na Figura 16. Este protocolo é amplamente adotado em aplicações de IoT devido à sua leveza, eficiência e suporte para comunicação assíncrona, essencial em sistemas que demandam baixa latência e alta confiabilidade.

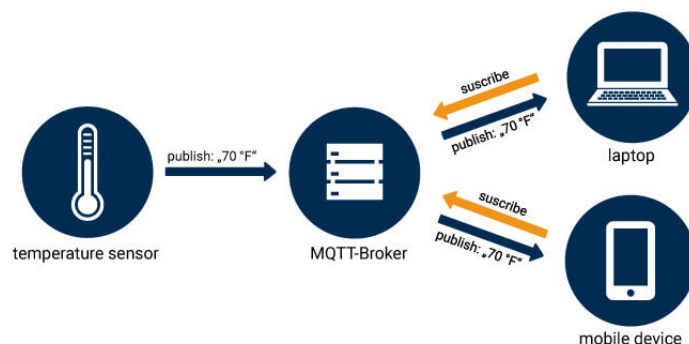


Figura 16. Funcionamento MQTT Broker (Bivocom, 2024).

No presente projeto, os dispositivos utilizam um broker MQTT hospedado na nuvem através do serviço HiveMQ Cloud. Dados captados pelos sensores são publicados em tópicos específicos no broker, permitindo que o aplicativo *mobile*, inscrito nesses tópicos, receba informações em tempo real e as exiba ao usuário. Por outro lado, configurações realizadas pelo usuário no aplicativo são publicadas no broker, possibilitando que os dispositivos, ao assinarem os respectivos tópicos, ajustem seu comportamento conforme as novas instruções.

3.3.3. Camada de Middleware

No contexto da arquitetura desenvolvida para o sistema de automação da microestufa, optou-se por não incluir uma camada de middleware. O uso de um broker MQTT para intermediar a comunicação entre os dispositivos e o aplicativo já atende satisfatoriamente às necessidades principais do sistema. A implementação de uma camada middleware adi-

cional poderia adicionar complexidade ao desenvolvimento e à manutenção, sem oferecer um benefício significativo no escopo atual.

Entretanto, diversas formas de comunicação poderiam ser utilizadas para este tipo de sistema. O protocolo HTTP, por exemplo, poderia facilitar a troca de informações entre o ESP32 e o aplicativo, utilizando requisições REST ou WebSockets para uma interação mais dinâmica. No entanto, isso poderia resultar em maior consumo de energia e latência, além de exigir um servidor intermediário para gerenciar as conexões.

Uma alternativa interessante seria o uso do CoAP (Constrained Application Protocol), projetado especificamente para dispositivos IoT com recursos limitados. O CoAP é uma opção mais leve que o HTTP e suporta comunicação assíncrona de forma semelhante ao MQTT. Além disso, é baseado no modelo da World Wide Web, utilizando URIs e um funcionamento similar ao HTTP. No entanto, sua adoção ainda é menos comum, enquanto o MQTT já possui um ecossistema consolidado, com amplo suporte e integração.

Outra abordagem viável é a comunicação via Bluetooth Low Energy (BLE), que elimina a necessidade de um servidor intermediário. No entanto, essa modalidade requer proximidade física entre o aplicativo e a estufa, limitando a flexibilidade do sistema.

Além dessas opções, existem várias outras tecnologias para comunicação em IoT, como LoRa (Long Range), que permite a transmissão de dados a grandes distâncias com baixo consumo energético; Zigbee e Z-Wave, que utilizam redes mesh voltadas para automação residencial; e NB-IoT (Narrowband IoT), adequada para conexões de baixa potência e longo alcance em redes celulares.

Embora o MQTT tenha sido a escolha ideal para este projeto devido à sua leveza, eficiência energética e suporte à comunicação assíncrona, a exploração de outras formas de comunicação no futuro permanece como uma possibilidade, especialmente em cenários que exijam maior flexibilidade, escalabilidade ou requisitos específicos de conectividade.

3.3.4. Camada de Aplicação

A camada de aplicação é onde o usuário interage diretamente com o sistema. Um aplicativo móvel, desenvolvido em Flutter, permite o monitoramento remoto de todas as condições da estufa, como temperatura, umidade e níveis de luz. A interface do aplicativo foi projetada para ser intuitiva, permitindo ao usuário ajustar parâmetros, salvar configurações em um banco de dados Firebase, e enviar essas configurações para o broker MQTT para aplicação imediata na estufa.

Além disso, o aplicativo armazena perfis predefinidos de cultivo no Firebase, possibilitando que o usuário carregue configurações previamente salvas, otimizando assim o processo de ajuste do ambiente da estufa.

3.3.5. Camada de Negócios

A camada de negócios é parte do sistema onde as regras de negócio e a lógica de processamento são implementadas para o controle e monitoramento da estufa. Ela define como

os dados são processados, quais ações são tomadas em resposta a certos eventos, e como as funcionalidades do sistema são integradas para atender às necessidades dos usuários.

No projeto da estufa, essa camada inclui a lógica que decide, por exemplo, quando ativar automaticamente a irrigação com base nos níveis de umidade do solo, ou como os dados são processados e enviados ao aplicativo. A integração com o Firebase também permite que as configurações do usuário sejam armazenadas e reutilizadas, enquanto o uso do MQTT garante a comunicação eficiente entre os dispositivos e o aplicativo.

3.4. Estrutura do Projeto e Configuração de Comunicação

O objetivo do mestre é permitir que o usuário tenha acesso das informações dos sensores que vem via comunicação UART do escravo, e acesso físico aos comando dos atuadores da estufa por meio do display.

```
1  #include <SPI.h>
2  #include <XPT2046_Touchscreen.h>
3  #include <TFT_eSPI.h>
4
5  #include <WiFi.h>
6  #include <PubSubClient.h>
7  #include <ArduinoJson.h>
8
9  // Definindo os pinos do touchscreen
10 #define XPT2046_IRQ 36
11 #define XPT2046_MOSI 32
12 #define XPT2046_MISO 39
13 #define XPT2046_CLK 25
14 #define XPT2046_CS 33
15
16 #define TXD2 1 // Pino TX do Serial2
17 #define RXD2 3 // Pino RX do Serial2
```

Figura 17. Código de inicialização do display.

A Figura 17 mostra a configuração inicial do código do mestre, no qual definem-se os pinos utilizados para sensores e atuadores, as bibliotecas necessárias (“TFT eSPI” para controle da tela, “WiFi” e “PubSubClient” para conexão MQTT) e as constantes principais.

```

112 void setup() {
113     Serial.begin(115200);           // Comunicação com o monitor serial
114     Serial2.begin(9600, SERIAL_8N1, TXD2, RXD2); // Comunicação Serial2
115
116     // Inicializa o SPI e a tela de toque
117     mySpi.begin(XPT2046_CLK, XPT2046_MISO, XPT2046_MOSI, XPT2046_CS);
118     ts.begin(mySpi);
119     ts.setRotation(1);
120
121     // Inicializa a tela TFT
122     tft.init();
123     tft.setRotation(1);
124     tft.fillScreen(TFT_BLACK);
125
126     WiFi.mode(WIFI_STA);
127 > WiFi.begin(ssid, password); ...
130 // Aguarda a conexão ou até atingir o tempo limite
131 > while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && millis() - startTime < timeout) { ...
134 }
135 > //Configura o NTP ...
158 // Exibe layout inicial
159 drawLayout();
160 }

```

Figura 18. Código do setup do display.

A Figura 18 mostra o trecho de código responsável pela inicialização do sistema. Nesse segmento, a comunicação serial é estabelecida tanto com o monitor serial, com a taxa de 115200 bauds, quanto com o dispositivo Serial2, configurado para 9600 bauds. A seguir, o SPI (Protocolo Serial de Periféricos) é inicializado, permitindo a comunicação com a tela de toque, que é configurada para uma rotação específica.

O display TFT é iniciado, com a rotação ajustada para 1 e o fundo da tela preenchido com a cor preta. Em seguida, a conexão Wi-Fi é configurada no modo STA (Station), utilizando o SSID e a senha fornecidos. O código aguarda a conexão com a rede Wi-Fi, e caso a conexão não seja estabelecida dentro do tempo limite definido, o status da conexão é atualizado para "Conectado!".

A configuração do NTP (Protocolo de Tempo de Rede) também é realizada, permitindo que o sistema sincronize o horário com um servidor de tempo definido. O horário obtido é então exibido no monitor serial. Se a sincronização for bem-sucedida, a hora atual é exibida; caso contrário, uma mensagem de erro é apresentada.

O código também define o tamanho do buffer e a função de callback para tratar mensagens recebidas. Finalmente, o layout inicial da interface gráfica é exibido na tela, completando a inicialização do sistema.

A Figura 19 apresenta o código responsável pela atualização e exibição das informações no display da microestufa. A função drawLayout() limpa a tela e exibe os valores de temperatura e umidade do ambiente e do solo, além do status da conexão Wi-Fi e do modo de operação (manual ou automático). Para garantir que os dados estejam atualizados, a função updateSensorData() é chamada antes da renderização da interface. Por fim, a função drawButtons() é utilizada para desenhar os botões interativos na tela, permitindo o controle do sistema.

```

162 void drawLayout() {
163     updateSensorData();
164     tft.fillScreen(TFT_BLACK);
165
166     // Exibe os valores iniciais de temperatura e umidade
167     tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);
168     tft.setTextSize(2);
169
170     tft.drawCentreString("Micro Estufa", 160, 10, 2);
171
172     tft.setTextSize(1);
173
174     tft.drawString("Temp. do Ar: " + String(temperature) + " °C", 20, 50, 2);
175     tft.drawString("Umidade do Ar: " + String(humidity) + "%", 20, 70, 2);
176     tft.drawString("Umidade do Solo: " + String(soilHumidity) + "%", 20, 90, 2);
177     tft.drawString("Status do Wi-Fi: " + String(wifiStatusText), 20, 110, 2);
178     tft.drawString("Estado:" + String(manualOrAutoStatusText), 20, 130, 2);
179
180     // Exibe os botões
181     drawButtons();
182 }

```

Figura 19. Método de atualização e exibição das informações no display da microestufa.

```

226 void connectMQTT() {
227     while (!mqttClient.connected()) {
228         Serial.println("Conectando ao servidor MQTT...");
229         if (mqttClient.connect("ESP32Client", mqttUser, mqttPassword)) {
230             Serial.println("Conectado ao servidor MQTT");
231             mqttClient.subscribe(topicConfig);
232             mqttClient.subscribe(topicIrrigation);
233             mqttClient.subscribe(topicFan);
234             mqttClient.subscribe(topicLight);
235             mqttClient.subscribe(topicVentilator);
236             mqttClient.subscribe(topicManual);
237
238         } else {
239             Serial.print("Falha na conexão. Estado: ");
240             Serial.println(mqttClient.state());
241             delay(2000);
242         }
243     }
244 }

```

Figura 20. Método responsável por manter conectado o ESP32 a um servidor MQTT.

A Figura 20 apresenta a função responsável por conectar o ESP32 a um servidor MQTT. Caso a conexão ainda não esteja estabelecida, o código tenta conectar utilizando credenciais (mqttUser e mqttPassword). Se a conexão for bem-sucedida, o ESP32 se inscreve nos tópicos MQTT relevantes, permitindo a recepção de comandos e dados. Caso a conexão falhe, o sistema aguarda 2 segundos antes de tentar novamente. Esse processo garante que o dispositivo permaneça conectado ao servidor MQTT para comunicação contínua com o aplicativo.

```

246 void mqttCallback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
247     // Função chamada quando uma mensagem MQTT é recebida
248     Serial.print("Mensagem recebida no tópico: ");
249     Serial.println(topic);
250     // Convertendo o payload recebido para uma string
251     char message[length + 1];
252     strncpy(message, (char*)payload, length);
253     message[length] = '\0'; // Adiciona o caractere nulo ao final da string
254     Serial.println("Payload: " + String(message));
255     // Verifica se a mensagem foi recebida no tópico de modo manual ou automático
256     if (strcmp(topic, topicManual) == 0) {
257         manualOnAutoStatusText = temperature; // Parece ser um erro (deveria ser um status)
258         // Se a mensagem for "manual", ativa o modo manual e desliga os atuadores
259         if (String(message) == "manual") {
260             manualOnAutoMode = true;
261             manualOnAutoStatusText = "MANUAL";
262             Serial2.println("COOLER1_OFF");
263             Serial2.println("COOLER2_OFF");
264             Serial2.println("PUMP_OFF");
265             Serial2.println("LED_OFF");
266 >         } else { ...
270     }
271 }
272 // Função lambda para gerenciar os atuadores com base no tópico recebido
273 auto handleActuator = [topic, &message](const char* topicName, const char* actuatorName, bool& status) {
274     if (strcmp(topic, topicName) == 0) {
275         // Define o status do atuador com base na mensagem recebida
276         status = String(message) == "ligar";
277         // Envia o comando correspondente ao Serial2, que controla os atuadores
278 >         if (strcmp(topic, topicIrrigation) == 0) { ...
280 >         } else if (strcmp(topic, topicFan) == 0) { ...
282 >         } else if (strcmp(topic, topicVentilator) == 0) { ...
284 >         } else if (strcmp(topic, topicLight) == 0) { ...
290     }
291     return true; // Retorna true se o tópico corresponder a algum atuador
292 }
293     return false; // Retorna false caso o tópico não corresponda a nenhum atuador
294 };
295 // Se estiver no modo manual, verifica qual atuador deve ser acionado
296 > if (manualOnAutoMode) { ...
301 }
302 // Verifica se a mensagem recebida é do tópico de configuração
303 > if (strcmp(topic, topicConfig) == 0) { ...
324 }

```

Figura 21. Função de callback do MQTT no ESP32, responsável por processar mensagens recebidas e controlar os dispositivos da microestufa.

A Figura 21 ilustra a função de callback do MQTT, que é acionada sempre que uma mensagem chega a um dos tópicos inscritos. O código primeiro imprime a mensagem recebida e converte o *payload* em uma *string* para processamento.

Caso a mensagem pertença ao tópico de modo de operação, o sistema alterna entre os modos manual e automático, desativando os atuadores quando necessário.

Em seguida, uma função lambda (*handleActuator*) é utilizada para processar comandos de controle de atuadores, como bomba de irrigação, ventiladores e iluminação. Dependendo do tópico e do conteúdo da mensagem, comandos são enviados via *Serial2* para ativar ou desativar os dispositivos.

Se o tópico for o de configuração, a mensagem recebida é tratada como um JSON, e os parâmetros como temperatura ideal, umidade ideal e horários de iluminação são extraídos e atualizados. Se a estrutura JSON estiver incorreta, uma mensagem de erro é exibida no monitor serial.

Esse método garante que o ESP32 interprete corretamente os comandos recebidos via MQTT, permitindo o controle remoto da microestufa pelo aplicativo.

```
405 void updateSensorData() {
406     // Envia comando ao escravo para solicitar dados do sensor
407     Serial2.println("GET_DATA");
408
409     // Aguarda a resposta do escravo
410     unsigned long startTime = millis();
411     while (Serial2.available() == 0 && millis() - startTime < 2000) {
412         delay(10); // Aguarda até 2 segundos
413     }
414
415     // Lê a resposta do escravo, se disponível
416     if (Serial2.available()) {
417         String response = Serial2.readStringUntil('\n');
418         response.trim();
419
420         // Formato esperado: TEMP:XX.XX;HUMID:XX.XX
421         int tempIndex = response.indexOf("TEMP:");
422         int humidIndex = response.indexOf("HUMID:");
423         int soilHumidIndex = response.indexOf("SOIL:");
424
425
426         if (tempIndex != -1 && humidIndex != -1) {
427             temperature = response.substring(tempIndex + 5, humidIndex - 1);
428             humidity = response.substring(humidIndex + 6, soilHumidIndex - 1);
429             soilHumidity = response.substring(soilHumidIndex + 6);
430         }
431     } else {
432         Serial.println("Sem resposta do escravo.");
433         temperature = "ERRO";
434         humidity = "ERRO";
435         soilHumidity = "ERRO";
436     }
437 }
```

Figura 22. Método responsável para obter dados dos sensores.

A Figura 22 ilustra a função `updateSensorData()`, responsável por obter os dados dos sensores de temperatura, umidade e umidade do solo de um dispositivo escravo. O processo inicia com o envio de um comando ao escravo por meio da interface `Serial2`, seguido de uma espera de até 2 segundos pela resposta, verificando periodicamente a disponibilidade de dados.

Caso o escravo responda dentro do tempo limite, a função lê os dados recebidos até encontrar uma quebra de linha e então utiliza métodos para localizar e extrair os valores correspondentes. Se os dados forem válidos, são armazenados em variáveis específicas; caso contrário, a função retorna um erro e exibe uma mensagem no monitor serial. Esse processo assegura a atualização contínua das condições ambientais da microestufa.

A Figura 23 ilustra a função `loop()`, que mantém o ambiente da microestufa dentro dos parâmetros ideais e garante a conectividade do ESP32. A cada intervalo de tempo, o sistema atualiza os dados dos sensores, publica as informações via MQTT e ajusta

```

405 void updateSensorData() {
406     // Envia comando ao escravo para solicitar dados do sensor
407     Serial2.println("GET_DATA");
408
409     // Aguarda a resposta do escravo
410     unsigned long startTime = millis();
411     while (Serial2.available() == 0 && millis() - startTime < 2000) {
412         delay(10); // Aguarda até 2 segundos
413     }
414
415     // Lê a resposta do escravo, se disponível
416     if (Serial2.available()) {
417         String response = Serial2.readStringUntil('\n');
418         response.trim();
419
420         // Formato esperado: TEMP:XX.XX;HUMID:XX.XX
421         int tempIndex = response.indexOf("TEMP:");
422         int humidIndex = response.indexOf("HUMID:");
423         int soilHumidIndex = response.indexOf("SOIL:");
424
425
426         if (tempIndex != -1 && humidIndex != -1) {
427             temperature = response.substring(tempIndex + 5, humidIndex - 1);
428             humidity = response.substring(humidIndex + 6, soilHumidIndex - 1);
429             soilHumidity = response.substring(soilHumidIndex + 6);
430         }
431     } else {
432         Serial.println("Sem resposta do escravo.");
433         temperature = "ERRO";
434         humidity = "ERRO";
435         soilHumidity = "ERRO";
436     }
437 }

```

Figura 23. Método responsável para manter a microestufa funcionando dentro do ambiente ideal.

automaticamente os atuadores, como ventiladores e a bomba de irrigação, para manter a temperatura, umidade do ar e umidade do solo dentro dos limites desejados. A iluminação também é controlada conforme os horários pré-estabelecidos. Além disso, o código verifica continuamente a conexão Wi-Fi e MQTT, reconectando o dispositivo quando necessário, para garantir que a comunicação com a rede e o servidor MQTT permaneçam estáveis. No modo manual, o usuário pode interagir com a interface *touchscreen* para controlar diretamente os atuadores, oferecendo maior flexibilidade no gerenciamento da estufa.

A Figura 24 apresenta a configuração inicial dos sensores e atuadores no ESP32 (modelo Pico), que atua como *slave* no sistema embarcado. Esse código define os pinos GPIO utilizados para a leitura dos sensores e controle dos atuadores, garantindo a comunicação eficiente com o ESP mestre. O sensor DHT11 é inicializado para fornecer leituras de temperatura e umidade do ar, enquanto dois sensores analógicos medem a umidade do solo, utilizando valores de referência, como DRY_VALUE e WET_VALUE, para determinar condições de solo seco ou úmido, com a possibilidade de calibração conforme

```

1  #include "DHT.h"
2
3  #define DHTPIN 13      // Pino onde o DHT11 está conectado
4  #define DHTTYPE DHT11 // Define o tipo do sensor DHT
5  #define LED_PIN 2     // GPIO onde o LED está conectado
6  // Define o pino analógico conectado ao sensor
7  #define SOIL_MOISTURE_SENSOR_PIN1 34 // Use um pino ADC do ESP32
8  #define SOIL_MOISTURE_SENSOR_PIN2 15
9
10 #define COOLER1_PIN 25 // GPIO para o primeiro cooler (ventilação)
11 #define COOLER2_PIN 26 // GPIO para o segundo cooler (exaustor)
12 #define PUMP_PIN 27    // GPIO para a bomba de água
13
14 // GPIO dos pinos para as cores do LED RGB
15 const int redPin = 32; // GPIO para o vermelho
16 const int greenPin = 33; // GPIO para o verde
17 const int bluePin = 14; // GPIO para o azul
18
19 // Configuração do PWM
20 const int freq = 5000; // Frequência do PWM em Hz
21 const int resolution = 8; // Resolução do PWM (8 bits: 0-255)
22
23 // Valor mínimo e máximo do sensor (ajuste conforme necessário)
24 #define DRY_VALUE 3000 // Valor para solo seco (mude com base no sensor)
25 #define WET_VALUE 1500 // Valor para solo molhado (mude com base no sensor)
26
27
28 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

```

Figura 24. Código do slave

as características do sensor utilizado.

Além disso, são configurados os pinos responsáveis pelo controle da bomba de irrigação, dos ventiladores e do exaustor, permitindo a ativação desses dispositivos conforme as condições ambientais. O controle da intensidade e cor do LED RGB é realizado por meio de sinais PWM configurados com frequência de 5000 Hz e resolução de 8 bits, o que possibilita ajustes dinâmicos e precisos na iluminação da microestufa, melhorando a eficiência na fotossíntese das plantas.

Esse código estabelece a base para que o ESP32 *slave* responda aos comandos do mestre, realizando medições periódicas e acionando os dispositivos conforme necessário, proporcionando um ambiente automatizado e adaptado às condições de cultivo. A leitura do sensor DHT11 e dos sensores de umidade do solo serve para monitorar e ajustar a temperatura, umidade e irrigação de maneira eficiente, contribuindo para a manutenção das condições ideais para o crescimento das plantas.

A Figura 25 ilustra o funcionamento do código responsável por interpretar e executar comandos enviados pelo mestre via comunicação serial (Serial2). Esse código é executado continuamente no loop principal do ESP32 escravo, garantindo respostas imediatas a comandos de controle e consulta de sensores.

O processo começa verificando se há dados disponíveis na Serial2. Quando um comando é recebido, ele é analisado e tratado conforme sua função. Comandos relacio-

```

52 void loop() {
53   // Verifica se há comandos recebidos do mestre via Serial2
54   if (Serial2.available()) {
55     String command = Serial2.readStringUntil('\n'); // Lê o comando recebido
56     command.trim(); // Remove espaços extras
57
58     // Controle do LED RGB
59     if (command.startsWith("LED_ON:")) {
60       // Extrai os valores de RGB e intensidade da string recebida
61       String rgbValues = command.substring(8);
62       int values[4]; // Array para armazenar R, G, B e intensidade
63       parseRGBValues(rgbValues, values);
64
65       // Define as cores e intensidade do LED RGB
66       ledRed = values[0];
67       ledGreen = values[1];
68       ledBlue = values[2];
69       ledIntensity = values[3];
70
71       setRGBColor(
72         ledRed * ledIntensity / 255,
73         ledGreen * ledIntensity / 255,
74         ledBlue * ledIntensity / 255
75       );
76
77       Serial.println("Configuração de LED atualizada.");
78       Serial.println("R: " + String(ledRed) + " G: " + String(ledGreen) + " B: " + String(ledBlue) + " Intensidade: " + String(ledIntensity));
79       Serial2.println("LED configurado com sucesso.");
80     }
81     else if (command == "LED_OFF") {
82       setRGBColor(0, 0, 0); // Desliga o LED RGB
83       Serial.println("LED desligado!");
84       Serial2.println("LED está desligado.");
85     }
86
87     // Controle da bomba de irrigação
88     else if (command == "PUMP_ON") {
89       digitalWrite(PUMP_PIN, HIGH);
90       Serial.println("Bomba ligada!");
91       Serial2.println("Bomba está ligada.");
92     }
93     else if (command == "PUMP_OFF") {
94       digitalWrite(PUMP_PIN, LOW);
95       Serial.println("Bomba desligada!");
96       Serial2.println("Bomba está desligada.");
97     }
98   }
99 }

```

Figura 25. Segmento de código com comando enviados do display.

nados ao LED RGB ajustam a cor e intensidade conforme os valores recebidos, enquanto comandos para os atuadores controlam a bomba de irrigação e os ventiladores, permitindo a regulação do ambiente da microestufa.

Além disso, o comando de requisição de dados faz com que o ESP32 escravo colete leituras dos sensores de temperatura, umidade do ar e umidade do solo, enviando essas informações ao mestre para tomada de decisão. Caso ocorra falha na leitura dos sensores, o sistema retorna uma mensagem de erro. Esse mecanismo permite que o ESP32 escravo gerencie os atuadores e monitore as condições ambientais, assegurando a manutenção ideal do ambiente na microestufa.

3.5. Aplicativo de Controle e Monitoramento: Design e Funcionalidades

O aplicativo foi desenvolvido utilizando o framework Flutter, por meio do Android Studio, com foco na criação de uma solução multiplataforma eficiente e intuitiva. Seu principal objetivo é permitir que o usuário controle e monitore a estufa de forma integrada, oferecendo uma experiência de uso otimizada para dispositivos Android.

Flutter é um framework de código aberto desenvolvido pelo Google, utilizado para a criação de aplicativos nativos para iOS, Android, web e desktop a partir de uma única base de código. Ele oferece uma abordagem moderna e eficiente para o desenvolvimento de interfaces de usuário, permitindo a criação de aplicativos visuais ricos e responsivos.

Um dos motivos da escolha deste framework é sua documentação oficial completa

e bem organizada, que facilita o processo de aprendizado e desenvolvimento. Além disso, o Flutter permite o uso multiplataforma, o que proporciona flexibilidade na criação de aplicativos para diferentes sistemas operacionais (Alura, 2023).



Figura 26. Tela de controle inicial.

A Figura 26 exemplifica a tela inicial do aplicativo, onde o usuário encontra uma visão geral das condições da estufa e ferramentas para controle dos dispositivos. Nesta tela, são exibidas informações cruciais como temperatura, umidade do solo e umidade do ar em tempo real, atualizadas constantemente para garantir uma visão clara das condições atuais do ambiente.

Além disso, a tela inicial também apresenta os parâmetros ideais de funcionamento configurados para a estufa, como temperatura e níveis de umidade e espectro de luz utilizado. Essas informações ajudam o usuário a verificar se a estufa está operando dentro dos padrões desejados.

O usuário também pode controlar os atuadores diretamente nesta tela. No modo manual, é possível ativar ou desativar dispositivos como irrigação, ventilação e iluminação de forma independente. Já no modo automático, o sistema ajusta automaticamente os dispositivos com base nos parâmetros definidos, garantindo que o ambiente esteja sempre adequado para o cultivo.

A Figura 27 mostra a funcionalidade de pareamento via Bluetooth acessada por

um ícone na tela inicial. Esse recurso permite que o usuário conecte o dispositivo ao aplicativo para configurar a rede Wi-Fi. Após o pareamento, o dispositivo pode se conectar à internet, garantindo comunicação contínua com o sistema.

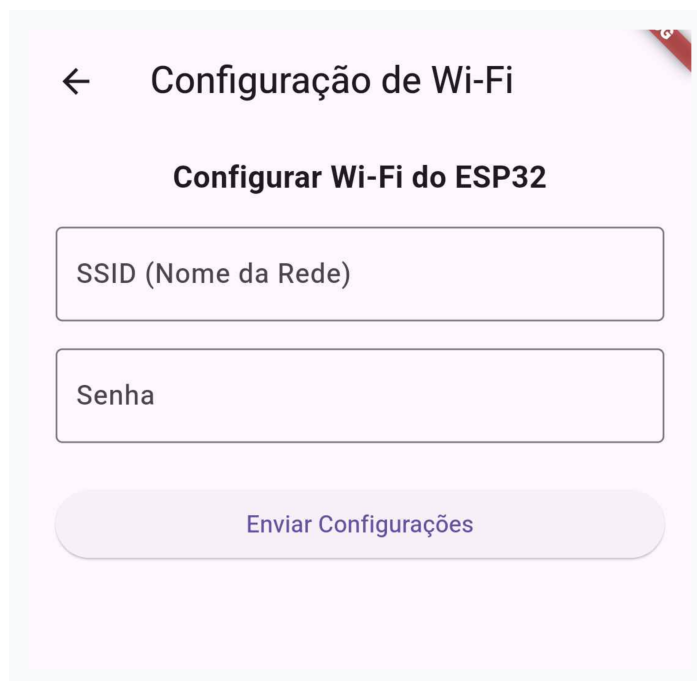
A imagem mostra a interface de usuário para configurar o Wi-Fi de um ESP32. No topo, há um ícone de seta para trás e o título "Configuração de Wi-Fi". Abaixo disso, o subtítulo "Configurar Wi-Fi do ESP32" está centralizado. Há dois campos de entrada de texto: o primeiro rotulado "SSID (Nome da Rede)" e o segundo rotulado "Senha". Abaixo dos campos, há um botão arredondado com o texto "Enviar Configurações".

Figura 27. Tela de configuração de wifi.

Outra funcionalidade importante disponível no aplicativo é a configuração do ambiente ideal, acessível a partir da tela inicial. Esta opção permite que o usuário ajuste os parâmetros da estufa de acordo com as necessidades específicas do cultivo. Há duas formas principais de configurar o ambiente ideal:

- **Configurações predefinidas:** O aplicativo oferece uma seleção de perfis prontos, disponíveis no banco de dados, projetados para atender às necessidades de diferentes tipos de cultivo. Esses perfis incluem combinações otimizadas de temperatura, umidade, iluminação e crescimento saudável das plantas. O usuário pode simplesmente selecionar o perfil desejado e aplicá-lo à estufa de forma rápida e prática.
- **Configurações personalizadas:** Caso o usuário queira um controle mais específico, ele pode criar suas próprias configurações. Essa funcionalidade permite que ele defina manualmente os parâmetros ideais para o cultivo, ajustando detalhes como temperatura mínima e máxima, níveis de umidade e intensidade luminosa. Após configurar, o usuário pode salvar essas definições personalizadas para utilizá-las futuramente.

Essa combinação de opções predefinidas e personalização total oferece flexibilidade para atender tanto a usuários iniciantes, que podem confiar nas configurações já otimizadas, quanto a usuários experientes, que desejam adaptar o ambiente às necessidades específicas de plantas ou condições únicas.

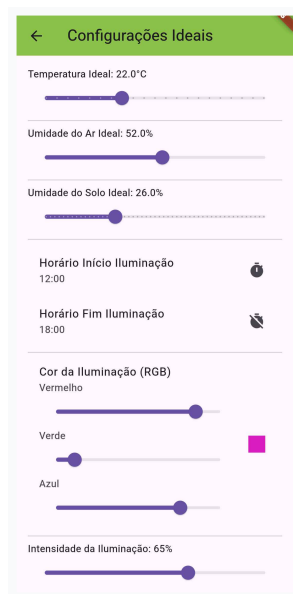


Figura 28. Configuração para atuadores.

A Figura 28 exemplifica que a configuração também pode ser direta através dos *widgets*, junto com os botões de controle manual, torna o aplicativo informativo e interativo, permitindo que o usuário mantenha o controle completo sobre o ambiente da estufa com facilidade e precisão.

4. Resultados Obtidos

Esta seção tem o objetivo de apresentar os principais resultados experimentais do projeto desenvolvido, analisando sua viabilidade, funcionalidade e aplicabilidade.

O projeto resultou na construção de um protótipo de microestufa funcional com características voltadas para o cultivo em ambientes residenciais.

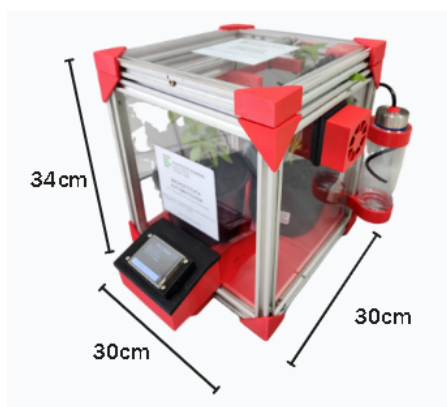


Figura 29. Micro estufa desenvolvida e suas dimensões.

Como demonstrada na Figura 29, a estrutura da estufa foi confeccionada utilizando alumínio e placas de acrílico, com dimensões compactas de 30 cm de largura, 30

cm de comprimento e 34 cm de altura. Essa configuração foi projetada para otimizar o espaço, permitindo o cultivo em áreas limitadas, como apartamentos e casas urbanas.

O *hardware* foi complementado com uma placa de conexão que simplifica a montagem e abstrai a complexidade das interligações entre sensores e atuadores, como os LEDs RGB utilizados para simular condições de luz favoráveis à fotossíntese.

Do ponto de vista de *software*, a comunicação entre a estufa e o aplicativo Android desenvolvido em Flutter foi implementada utilizando um broker MQTT, que possibilita troca de mensagens em tempo real. O aplicativo oferece ao usuário uma interface intuitiva para configurar e monitorar variáveis como temperatura, umidade do ar e do solo. As configurações personalizadas são armazenadas em um banco de dados na nuvem, utilizando o Firebase.

Este conjunto de resultados demonstra a viabilidade técnica do projeto e proporciona uma base sólida para a aplicação prática da estufa em ambientes domésticos. Embora o estudo ainda não tenha apresentado medições ou dados de crescimento de plantas para validação quantitativa, os sistemas desenvolvidos mostram potencial para atender às necessidades de entusiastas que desejam cultivar alimentos orgânicos de forma prática e sustentável.



Figura 30. Estufa aberta.

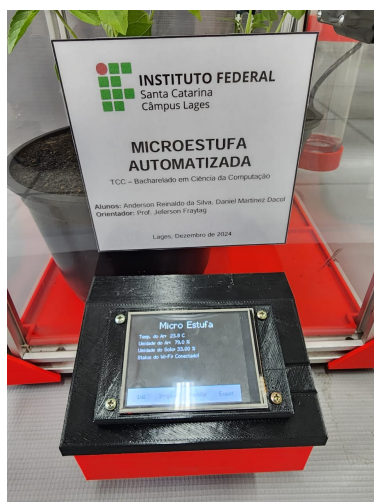


Figura 31. Display da estufa.



Figura 32. Interior da estufa.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

O desenvolvimento deste projeto demonstrou a viabilidade de integrar tecnologias de Internet das Coisas (IoT) a sistemas de cultivo em estufas residenciais, com foco em promover práticas agrícolas sustentáveis e acessíveis. A microestufa desenvolvida foi capaz de atender aos objetivos iniciais de oferecer um ambiente controlado para o cultivo de plantas em ambientes urbanos.

Além de apresentar características técnicas inovadoras, a estimativa de custos para a implementação do sistema inclui os seguintes componentes:

- Placa ESP32 com display: R\$100

- Placa ESP32 Pico (slave): R\$40
- Sensor DHT: R\$8
- Dois sensores de umidade do solo: R\$14
- Dois coolers: R\$20
- Bomba d'água: R\$10
- Quatro LEDs RGB: R\$4

Total estimado em dispositivos: R\$196.

Este valor reflete apenas os componentes eletrônicos utilizados e não contempla os custos de confecção da estufa, que envolvem o uso de filamento com impressora 3D. A estrutura da estufa foi confeccionada com materiais leves e duráveis como alumínio e acrílico, o que pode representar um custo adicional.

Embora o estudo ainda não tenha apresentado medições de crescimento de plantas para validação quantitativa, os sistemas desenvolvidos mostram potencial para atender às necessidades de entusiastas que desejam cultivar alimentos orgânicos de forma prática e sustentável.

A comunicação via broker MQTT, integrada ao aplicativo Flutter e ao banco de dados Firebase, proporcionou uma interface amigável e acessível para os usuários, permitindo o monitoramento e a configuração remota de parâmetros essenciais ao cultivo. Essa abordagem reforça o potencial da tecnologia IoT para otimizar o manejo agrícola, reduzindo a necessidade de intervenções manuais e ampliando a acessibilidade ao cultivo orgânico em espaços residenciais.

Apesar dos avanços alcançados, o projeto enfrentou desafios técnicos, como a integração de dispositivos variados e a implementação de comunicação assíncrona eficiente entre a microestufa e o aplicativo. Esses desafios trouxeram aprendizado significativo e direcionam possíveis melhorias futuras, como o aprimoramento do sistema de comunicação e a adição de novos recursos que aumentem ainda mais a autonomia e eficiência da estufa.

Entre os desafios enfrentados, destaca-se a dificuldade em encontrar dispositivos adequados para a integração com o ESP32, como o display, cuja configuração apresentou obstáculos significativos. Além disso, a limitação de pinos no ESP32 principal demandou uma abordagem alternativa, resultando na implementação de uma comunicação mestre-escravo com outro ESP32 para gerenciar os sensores e atuadores. Esses desafios trouxeram um aprendizado considerável, evidenciando pontos de melhoria para versões futuras do sistema.

Embora o projeto tenha atingido seus objetivos principais, diversas possibilidades de melhorias foram identificadas durante seu desenvolvimento, como:

- Sistema de notificações avançado: Implementar notificações via aplicativo para alertar o usuário sobre níveis críticos do reservatório de água, garantindo uma manutenção mais eficiente.
- Aprimoramento do fluxo de ventilação e exaustão: Desenvolver saídas de ar independentes para ventiladores e exaustores, permitindo operação simultânea para melhor controle de temperatura e umidade.

- Ampliação do suporte a novos sensores e atuadores: Incorporar sensores adicionais, como medidores de CO² e luminosidade, além de atuadores para fertilização automática, expandindo a funcionalidade da estufa.
- Análise de viabilidade econômica: Avaliar o custo inicial de instalação da micro estufa, incluindo sensores, atuadores, estrutura e tecnologia embarcada, comparando-o com os benefícios econômicos a médio e longo prazo. Isso inclui economia de recursos como água e energia devido à automação, aumento da produtividade agrícola pela melhoria nas condições de cultivo, e redução de desperdícios ao otimizar o uso de insumos, como fertilizantes e pesticidas.

Por fim, o projeto se mostrou promissor como uma solução tecnológica prática e sustentável para pequenos cultivos domésticos, contribuindo para uma alimentação mais saudável e alinhada às demandas por práticas agrícolas responsáveis. O próximo passo envolve a validação prática do sistema, com testes de crescimento de plantas em ambiente controlado, visando coletar dados quantitativos que comprovem a eficácia da solução proposta.

Referências

- Ait Mouha, R. (2021). What is the internet of things (iot)? *Journal of Digital Applications Information Processing (JDAIP)*, 10(2):1–4.
- Alasse, O. (2023). Como a agricultura 5.0 vai impulsionar seu trabalho na lavoura. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/agricultura-5-0/>. Acesso em: 14 de maio de 2024.
- Almeida, G. V. d. (2022). Estufa automatizada para cultivo de fungos comestíveis em ambiente residencial. *Universidade Federal do Ceará*. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica.
- Alura (2023). O que é flutter? o framework do iniciante ao avançado. Disponível em: <https://www.alura.com.br/artigos/flutter/>. Acesso em: 24 de jul de 2023.
- Amazon Web Services, I. (2024). O que é a internet das coisas? Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/what-is/iot/>. Acesso em: 9 de abr de 2024.
- Barichello, D. L. (2024). Agricultura 5.0 como caminho para mitigação das mudanças climáticas: um estudo de caso na microrregião do alto uruguaí. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/30906>. Acesso em: 12 de abril de 2024.
- Bastos, C. E., Ferreira, T., e Galli, R. (2020). Diana – dispositivo de análise e controle de estufas agrícolas. *Tecnológica*.
- BitMaker (2024). Cooler ventoinha dc - 12v - 80x80x25mm. Disponível em: <https://www.bitmaker.com.br/ventilador-cooler-12v-fan-80x80x25mm.html>. Acesso em: 12 de abril de 2024.
- Bivocom (2024). Introdução ao espressif-idf: Programa esp32 usando esp-idf. Disponível em: <https://www.bivocom.com/>. Acesso em: 17 de abr de 2024.
- Bliska Júnior, A. (2011). Manejo de ambientes protegidos: Estufas e casas de vegetação. *Casa da Agricultura*.
- Dare (2022). *Estufas Agrícolas*. Dare Agro, 1th edition. ESTUFAS AGRÍCOLAS — Sistema de produção agrícola especializado.
- Digikey (2024). Esp32-pico-kit: Intergrated bluetooth and wifi microcontroller. Disponível em: <https://www.digikey.ch/reference-designs/de/open-source-mcu-platforms/2568>. Acesso em: 17 de abr de 2024.

- Eletrogate (2024). Led rgb alto brilho 5mm - anodo comum. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/led-rgb-5mm-anodo-comum-alto-brilho/>. Acesso em: 12 de abr de 2024. Acesso em: 12 de abril de 2024.
- Fernandes, D. G. (2017). Sistema automatizado de controle de estufas para cultivo de hortaliças. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Maria, RS. Curso de Sistemas de Informação.
- Figueiredo, G. (2011). Panorama da produção em ambiente protegido. *Casa da Agricultura*.
- Fonseca, M. S., Custódio, M. M., e Franca, M. P. (2017). Automação no plantio em estufas: Controle de irrigação no consumo de água e eletricidade. *Anais do 9º SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO - SIEPE*. Universidade Federal do Pampa — Santana do Livramento, 21 a 23 de novembro de 2017.
- GroHo Hidroponia (2024). Influência do espectro da luz no crescimento das plantas. Disponível em: <https://www.groho.pt/post/influencia-do-espectro-da-luz/>. Acesso em: 18 de abril de 2024.
- Kerschbaumer, R. (2018). Apostila de microcontroladores. Disponível em: <https://professor.luzerna.ifc.edu.br/ricardo-kerschbaumer/wp-content/uploads/sites/43/2018/02/Apostila-Microcontroladores.pdf/>. Acesso em: 17 de abr de 2023.
- Longo, A. K. e Abreu, B. S. (2021). Estufa automatizada: Controle automático para o cultivo de hortaliças. *Universidade do Sul de Santa Catarina*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Luís Fernando Ferreira de Campos, Ms.
- MakerHero (2024). Módulo sensor de umidade de solo. Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/sensor-de-umidade-do-solo-higrometro/>. Acesso em: 12 de abr de 2024.
- Mickens, M. A., Skoog, E., Reese, L., Barnwell, P., Spencer, L., Massa, G., e Wheeler, R. (2018). A strategic approach for investigating light recipes for ‘outredgeous’ red romaine lettuce using white and monochromatic leds. *Life Sciences in Space Research*, 18:1–11.
- Moraes, A. A. (2003). Robótica. Disponível em: <https://www.adororobotica.com/RBSENAI.pdf>. Acesso em: 18 de abril de 2024.
- Murguero Junior, R. T. (2016). Automação de estufas agrícolas. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/167746?show=full/>. Acesso em: 17 de abr de 2024.
- Organis (2023). Pesquisa revela que 31% dos brasileiros consomem orgânicos. Disponível em: <https://organis.org.br/imprensa/pesquisa-revela-que-31-dos-brasileiros-consomem-organicos/>. Acesso em: 10 de out de 2024.
- Paulilo, M. T. S., Viana, A. M., e Randi, M. (2020). Fisiologia vegetal. <https://antigo.uab.ufsc.br/biologia//files/2020/08/Fisiologia-Vegetal.pdf>. Material didático.
- RoboCore (2024). Mini bomba de Água 12v rs-385. Disponível em: <https://robocore.net/atuador/mini-bomba-de-agua-12v-rs-385>. Acesso em: 12 de abr de 2024.
- Roisenberg, L. (2024). Sensores e atuadores: O coração da automação. Disponível em: <https://blog.lri.com.br/sensores-e-atuadores-o-coracao-da-automacao/>. Acesso em: 1 de março de 2024.

- Santana, C., Andrade, L., Mello, B., Sampaio, J., Batista, E., e Prazeres, C. (2019). Teoria e prática de microserviços reativos: Umestudo de caso na internet das coisa. *Research-Gate*.
- Silva, P. R. (2016). Uma abordagem sobre o mercado de hortaliças minimamente processadas. *Informações Econômicas*, 38(4):52–57.
- SoBiologia (2008). Pigmentos fotossintetizantes. Disponível em: <https://www.sobiologia.com.br/conteudos/bioquimica/bioquimica13.php/>. Acesso em: 18 de julho de 2024.
- Stempedia (2024). Etiquetas rfid para patrimônio. Disponível em: <https://ai.thestempedia.com/docs/evive-iot-kit/how-to-interface-temperature-humidity-sensor-with-evive/>. Acesso em: 17 de abr de 2024.
- Tech, S. H. X. W. Y. (2024). Esp32 smart display screen, wifi e bluetooth development board240 x 320, 2.8 ”lcd tft module com touch screen, nerdminer, 2432s028r. *AliExpress*.
- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (2020). Fotossíntese - aula 2. <https://uenf.br/cbb/lbt/files/2020/02/Fotosstese-aula-2.pdf>. Apresentação de aula.
- Verde (2024). O que é a agricultura 5.0? Disponível em: <https://www.afixcode.com.br/identificacao/etiquetas-rfid-patrimonio/>. Acesso em: 17 de abril de 2023.
- Zhang, A. (2024). Qual é o melhor espectro de luz para o crescimento das plantas? Disponível em: <https://www.casyoo.com/pt/what-is-the-best-light-spectrum-for-plant-growth/>. Acesso em: 18 de julho de 2024.