

# Aplicação de automação e controle em ambiente protegido no IFFar - Frederico Westphalen

Tauani Loronha Pires<sup>1</sup>, Fernando de Cristo<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha (IFFar) Caixa Postal 169 – 98.400-000 – Frederico Westphalen – RS – Brasil

<sup>1</sup>tauani.2022013813@aluno.iffar.edu.br,

<sup>2</sup>fernando.cristo@iffarroupilha.edu.br

**Abstract.** *The manual control of climatic variables in agricultural greenhouses requires constant supervision, which can compromise productive efficiency due to reliance on human intervention. In this scenario, the application of the Internet of Things (IoT) emerges as a solution to automate the protected environment and ensure management precision. To implement this proposal at IFFar - Frederico Westphalen, an ESP32 microcontroller with Wi-Fi connection, temperature and humidity sensors (DHT11), and actuators (relays) are employed, integrated into a web interface for remote management. Thus, it becomes possible to monitor and control cultivation conditions in real-time, reducing the need for manual actions and possibly optimizing crop development.*

**Resumo.** *O controle manual de variáveis climáticas em estufas agrícolas exige supervisão constante, o que pode comprometer a eficiência produtiva pela dependência da intervenção humana. Nesse cenário, a aplicação da Internet das Coisas (IoT) surge como solução para automatizar o ambiente protegido e garantir precisão no manejo. Para viabilizar essa proposta no IFFar - Frederico Westphalen, empregam-se o microcontrolador ESP32 com conexão Wi-Fi, sensores de temperatura e umidade (DHT11) e atuadores (relés), integrados a uma interface web para gestão remota. Dessa forma, torna-se possível monitorar e controlar as condições de cultivo em tempo real, reduzindo a necessidade de ações manuais e possivelmente otimizando o desenvolvimento das culturas.*

## 1. Introdução

A produção agrícola mundial enfrenta desafios diários para suprir as demandas de uma população em constante crescimento. Dentre as estratégias para ampliar a produtividade, destacam-se as estufas agrícolas, estruturas que permitem maior controle das variáveis ambientais para o cultivo de hortaliças, flores e mudas. No entanto, a eficiência desses ambientes depende de um monitoramento rigoroso de fatores como temperatura, umidade e ventilação. O controle manual dessas variáveis exige supervisão constante, tornando o processo suscetível a falhas e demandando excessiva mão de obra, o que muitas vezes se mostra inviável ou ineficiente para o produtor.

Este tema insere-se no contexto da Agricultura de Precisão, uma área que busca otimizar o uso de recursos e aprimorar a produtividade agrícola por meio do monitoramento e tratamento de dados espaciais e temporais. As motivações para a escolha deste tema incluem a necessidade de modernizar as práticas de cultivo no IFFar – Campus Frederico Westphalen e o potencial dos sistemas embarcados para transformar a gestão agrícola. O uso da automação na estufa da instituição pode contribuir significativamente para a redução do tempo gasto pelo agricultor na

supervisão e para a melhoria da eficiência produtiva, atendendo às demandas por processos mais autônomos.

Este trabalho teve por objetivo criar um sistema de automação e controle ambiental, unindo sensores e atuadores ao microcontrolador ESP32 com interface Web. Para tanto, buscou-se desenvolver uma solução baseada em hardware e software que monitora variáveis climáticas e aciona automaticamente a abertura e o fechamento das cortinas da estufa para regular a temperatura e a ventilação. Este estudo teve como objetivos específicos projetar a arquitetura de hardware selecionando os componentes adequados, desenvolver o software embarcado para coleta de dados e controle dos motores das cortinas, e construir uma interface web para visualização e acionamento remoto. Além disso, buscou implementar a solução fisicamente na estufa da instituição, realizar testes funcionais para validar o desempenho da automação das cortinas em condições reais e analisar os resultados para garantir a eficácia do sistema proposto.

A justificativa para este trabalho reside na necessidade de reduzir a intervenção manual e aumentar a eficiência do cultivo protegido. Com a coleta e atuação automáticas sobre a temperatura e a umidade, é possível garantir condições ideais de crescimento sem a necessidade de supervisão humana permanente. Além disso, a integração desses dados em uma plataforma web disponibiliza uma interface amigável para que o usuário possa monitorar o status da estufa e alterar parâmetros de controle remotamente, independentemente de sua localização física. Essa inovação, validada em um ambiente de ensino real, demonstra que tecnologias acessíveis, com baixo custo de implementação, podem ser aplicadas para resolver problemas práticos do campo, ampliando o acesso a automações agrícolas.

## **2. Referencial Teórico**

Este referencial aborda práticas e tecnologias aplicadas à automação de estufas agrícolas, com ênfase na olericultura em ambientes protegidos, baseando-se em conceitos da Agricultura de Precisão e da Internet das Coisas (IoT). Explora a aplicação de microcontroladores, especialmente o ESP32, bem como sensores e atuadores. Também apresenta dados sobre os benefícios do controle ambiental e os impactos na produtividade e sustentabilidade. Por fim trabalhos relacionados que fundamentam esse estudo.

### **2.1 Cultivo em ambiente protegido**

Altas temperaturas, excesso de chuvas ou secas, granizo e geadas são preocupações constantes do produtor rural, pois as condições climáticas adversas comprometem a rentabilidade e a qualidade das cultivares (SILVA; SILVA; PAGIUCA, 2014). Nesse contexto, o cultivo em ambiente protegido surge como uma alternativa viável para mitigar esses riscos. Estruturas como estufas e casas de vegetação permitem certo controle sobre variáveis climáticas importantes — como temperatura, umidade do ar e do solo, radiação solar e vento — criando um ambiente mais favorável ao desenvolvimento das plantas e aumentando a eficiência produtiva.

No entanto, apesar da adoção desse tipo de sistema de cultivo proporcionar vantagens em relação a eficiência de produção, com poucas perdas e melhor qualidade, a simples presença de uma cobertura não garante bons resultados. Como destacam Silva, Silva e Pagiuca (2014): “a cobertura não faz milagre; é preciso manejo

adequado”. Neste contexto, o termo manejo refere-se às práticas de controle do microclima da estufa, tais como a definição do momento adequado para ventilação, a regulação da entrada de radiação solar e o fechamento das estruturas de proteção, ações diretamente relacionadas à manutenção das condições ideais para o desenvolvimento das culturas. Dessa forma, reforça-se que o sucesso produtivo depende da adoção de práticas de controle e monitoramento eficientes dentro da estufa.

## **2.2 Agricultura de precisão**

A Agricultura de Precisão (AP), segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) é caracterizada como: “um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial e temporal da unidade produtiva e visa ao aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito ao ambiente”. Em termos práticos, a AP é um conjunto de técnicas que utiliza tecnologia avançada, como sensores, softwares e controladores para mapear e tratar áreas com diferentes níveis de produtividade.

A adoção de tecnologias da agricultura de precisão pode proporcionar ganhos expressivos, chegando a 29% de aumento na produtividade, conforme divulgado pela Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA, 2021). Com a implementação dessas tecnologias no campo, é possível coletar inúmeras informações sobre o plantio, desde o nível de umidade do solo até a identificação de falhas na lavoura e a presença de pragas por meio de sensores e GPS.

Embora a AP seja frequentemente associada a grandes áreas a céu aberto, seus princípios também se aplicam ao cultivo em ambientes protegidos. Nesses casos, o monitoramento contínuo de variáveis como temperatura, umidade e luminosidade, aliado ao uso de sistemas automatizados de controle, permite ajustar o ambiente de forma mais precisa às necessidades das cultivares. A integração entre sensoriamento, processamento de dados e atuação sobre o ambiente cria as bases para sistemas de estufas inteligentes, alinhados às demandas de eficiência e sustentabilidade da agricultura moderna.

## **2.3 Microcontroladores, atuadores e sensores**

De acordo com Rech (2022), um microcontrolador é um pequeno computador em um único circuito integrado, contendo um núcleo de processador, memória e periféricos programáveis de entrada e saída. Esses dispositivos são amplamente utilizados em sistemas embarcados devido à sua capacidade de processar informações do ambiente e tomar decisões em tempo real, sendo amplamente usados em projetos de automação residencial, industrial e agrícola.

Dentre as opções disponíveis de microcontroladores voltadas para a Internet das Coisas (IoT), destaca-se o ESP32. Desenvolvido pela Espressif Systems, o ESP32 é um *System on a Chip* (SoC) de baixo custo. Sua principal característica é a integração nativa de conectividade Wi-Fi e Bluetooth (modo dual), o que facilita a comunicação direta com redes TCP/IP e dispositivos móveis sem a necessidade de módulos externos complexos, simplificando a arquitetura de hardware (ESPRESSIF, 2024). Essas especificações o tornam uma solução viável para aplicações que exigem não apenas a leitura de sensores, mas também o envio de dados para servidores web.

Para a coleta de dados ambientais, é comum o uso de sensores digitais integrados, como o sensor DHT11, empregado para a leitura simultânea de temperatura

e umidade. Segundo a documentação técnica disponibilizada pela Adafruit (LADY ADA, 2012), este sensor digital de baixo custo opera com tensão de alimentação entre 3 e 5V. O dispositivo é capaz de medir temperaturas na faixa de 0°C a 50°C com precisão de  $\pm 2^\circ\text{C}$ , e umidade relativa do ar entre 20% e 80% com precisão de 5%. Embora sua taxa de amostragem seja limitada a 1 Hz (uma leitura por segundo), suas especificações são compatíveis com projetos educacionais e protótipos de IoT que não exigem precisão industrial crítica.

A intervenção física sobre o ambiente é feita por meio de atuadores, que são dispositivos que convertem energia elétrica, hidráulica ou pneumática em energia mecânica, movimento (HERMINI,2007). No contexto da automação de estufas (agricultura protegida), esses componentes assumem papel central na mecanização de tarefas, como abertura de cortinas, acionamento de ventilação, controle de irrigação e ajuste de sombreamento. Dessa forma, contribuem diretamente para a manutenção das condições ideais para o desenvolvimento das plantas.

## 2.4 Desenvolvimento Web

Para possibilitar o monitoramento e o controle remoto em sistemas de Internet das Coisas (IoT), é comum a utilização de interfaces web que permitem ao usuário acessar e interagir com a aplicação por meio de navegadores em computadores ou dispositivos móveis. A construção dessas interfaces requer uma camada de processamento no servidor capaz de receber informações dos dispositivos, armazená-las e disponibilizá-las ao usuário.

Nesse contexto, a linguagem Python destaca-se no *back-end* pela sintaxe clara, tipagem dinâmica e suporte multiparadigma, características que, segundo a Python Software Foundation (2024), aumentam a produtividade do desenvolvedor e facilitam a integração com bancos de dados e protocolos de comunicação, aspectos essenciais em aplicações IoT. A implementação de sistemas complexos nessa linguagem é frequentemente otimizada por meio de *frameworks* de desenvolvimento voltados ao desenvolvimento web, dentre os quais se destaca o Django. Esse *framework* gratuito e de código aberto abstrai tarefas repetitivas do desenvolvimento web e disponibiliza componentes nativos de segurança, além de um painel administrativo automático que acelera o gerenciamento de dados.

O Django adota a arquitetura MVT (Model-View-Template), no qual, o Model funciona como uma abstração dos dados, permitindo a manipulação das informações no banco por meio de um mapeamento objeto-relacional (ORM), sem a necessidade de escrita manual de SQL. A lógica de negócios é processada pela View, responsável por interpretar as requisições do usuário e selecionar os dados adequados, enquanto o Template define a camada de apresentação, gerando dinamicamente as páginas HTML exibidas no navegador (DJANGO PROJECT, 2024). Essa organização modular favorece a escalabilidade do sistema, reduz a redundância de código e facilita sua manutenção ao longo do tempo.

## 2.5 Trabalhos relacionados

O trabalho de Fernandes et al. (2017) descreve o desenvolvimento e a implementação de um protótipo automatizado de estufa utilizando as plataformas Arduino e Android, que

tem como objetivo fornecer acesso remoto aos dados da plantação, além do controle e monitoramento em tempo real da estufa. A solução proposta envolve sensores ambientais de temperatura, umidade do solo, luminosidade conectados a um microcontrolador Arduino Mega, responsável por processar as leituras e acionar os equipamentos das tarefas automatizadas. Os dados são transmitidos através um webservice em PHP e armazenados em um banco de dados onde o usuário pode registrar novos parâmetros e consultar relatórios como o histórico de leituras e ativações.

No artigo “Automação de estufa agrícola integrando hardware livre e controle remoto pela internet” de Loureiro et al. (2018) desenvolveram um protótipo de estufa inteligente que deve realizar o monitoramento da temperatura, umidade do solo e luminosidade, bem como o controle da irrigação e abertura e fechamento das cortinas laterais por meio de comandos enviados de forma remota ou parametrizações definidas pelo usuário. Um recurso adicional desse projeto é a incorporação de uma câmera que, por meio de visão computacional, estima a taxa de crescimento das cultivares com base na quantidade de pixels verdes presentes nas imagens capturadas. Para o controle da estufa foram utilizadas as plataformas Raspberry Pi e Arduino, com a comunicação dos dispositivos via protocolo I2C. O controle do sistema é feito através de um aplicativo Android permitindo ao usuário fazer configurações de parâmetros, visualizar os dados em tempo real e acionar os equipamentos.

Buscando otimizar o controle em ambientes agrícolas com base na Internet das Coisas (IoT), Jürgensen (2022) desenvolveu uma solução aplicada em uma estufa em escala reduzida integrada a sensores e a um microcontrolador, STM32, com comunicação LoRa e um gateway central. Os dados lidos são armazenados em um banco de dados e gerenciados por uma aplicação web, onde o usuário pode consultar os gráficos gerados, nesse caso umidade e temperatura do ar, umidade do solo e luminosidade, além de regular variáveis de controle. A proposta visa tornar o cultivo em estufas totalmente autônomo proporcionando melhores condições para o desenvolvimento das plantas e aumento do lucro e do rendimento para os agricultores.

Já o projeto de Rodrigues e Meurer (2024), apresentou-se uma proposta de sistema de automação usando um Controlador Lógico Programável (CLP) integrado a uma Interface Homem-Máquina (IHM), visando o controle da irrigação e adubação de estufas agrícolas. A interface do sistema mostra as informações de umidade e temperatura da estufa, status da bomba e alertas de nível de água do tanque, além disso permite ao usuário configurar e controlar o período e o tempo da irrigação, podendo acionar a bomba d'água remotamente se necessário.

A proposta deste trabalho, diferente do projeto de Fernandes et al. (2017) e Loureiro et al. (2018), que utilizaram uma aplicação Android e Rodrigues e Meurer (2024), que utilizaram uma Interface Homem-Máquina (IHM), o trabalho atual adota uma solução baseada em web, acessível por qualquer dispositivo com navegador, dispensando painéis ou instalação de aplicativos. Outro diferencial importante é o uso do microcontrolador ESP32, que já possui conectividade Wi-Fi integrada, dispensando módulos adicionais para comunicação, simplifica tanto a arquitetura do sistema quanto o processo de transmissão de dados.

Ademais, enquanto os trabalhos mencionados apresentaram protótipos ou sistemas que ainda não foram testados em ambientes reais de cultivo, o presente trabalho será implementado em uma estufa real da instituição de ensino, o que possibilita a validação do sistema em condições práticas, ampliando sua relevância e aplicabilidade.

### **3. Metodologia**

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho possui caráter aplicado e experimental, visando a construção e validação de um protótipo funcional para a automação de ambiente protegido. Para atingir os objetivos propostos, o trabalho foi estruturado em etapas sequenciais que abrangem desde a seleção e montagem dos componentes físicos até a implementação lógica do sistema. A seguir, são detalhados os procedimentos técnicos referentes à arquitetura de hardware, ao desenvolvimento do firmware de controle, à construção da interface web e aos protocolos de comunicação utilizados para a integração do sistema.

#### **3.1 Requisitos do Ambiente e do Sistema**

O sistema proposto foi desenvolvido para atender às demandas específicas de uma estufa agrícola em operação, localizada no Instituto Federal Farroupilha – Campus Frederico Westphalen, ambiente real no qual a solução foi efetivamente implantada, testada e validada, conforme ilustrado na Figura 1. Essa estufa caracteriza-se pelo uso de laterais móveis, nas quais as próprias paredes funcionam como cortinas mecanizadas. A abertura dessas cortinas promove a ventilação natural do ambiente interno, reduzindo a temperatura por meio da renovação do ar; inversamente, o seu fechamento favorece a elevação térmica em função do efeito estufa, permitindo a conservação do calor acumulado. Dessa forma, a movimentação dessas estruturas constitui o principal mecanismo de regulação do microclima interno.



**Figura 1. Estufa agrícola do Instituto Federal Farroupilha – Campus Frederico Westphalen, local de implantação do sistema.**

Fonte: Autoria Própria.

A partir dessa dinâmica operacional, o principal requisito funcional do sistema consiste em monitorar continuamente as variáveis ambientais de temperatura e umidade,

e acionar de maneira automática ou manual os motores responsáveis pela abertura e fechamento das cortinas laterais da estufa. Adicionalmente, o sistema deve prover uma interface web responsiva, que permita ao usuário a visualização dos dados telemétricos em tempo real, a execução de comandos remotos e a parametrização das regras de controle, como a definição de temperatura mínima e máxima e do tempo de acionamento dos motores.

### 3.2 Arquitetura de Hardware

Para o desenvolvimento do sistema de automação de controle das cortinas, adotou-se uma arquitetura de hardware baseada na plataforma ESP32, selecionada por sua capacidade de processamento dual-core e conectividade Wi-Fi nativa. O microcontrolador foi configurado para atuar como a unidade central de processamento, realizando a leitura cíclica dos dados ambientais provenientes do sensor digital DHT11 e gerenciando o acionamento dos módulos de relé, responsáveis pelo acionamento dos motores das cortinas. A integração desses componentes seguiu o princípio de sistemas embarcados em malha fechada, nos quais o firmware interpreta variáveis físicas em tempo real para definir ações de controle sem a necessidade de intervenção humana contínua.

Conforme demonstrado na Figura 2, o sensor de temperatura e umidade DHT11 foi conectado à porta GPIO 17, utilizando um resistor de *pull-up* para garantir a estabilidade do sinal. O sistema de atuação emprega um módulo de quatro relés optoacoplados, configurado para garantir o isolamento elétrico entre o circuito de potência e o microcontrolador. Para assegurar a compatibilidade entre os níveis lógicos, adotou-se a segregação das fontes de energia: o pino de potência das bobinas conecta-se à saída VIN (5 V), ao passo que o circuito lógico é suprido pela saída de 3,3 V do ESP32. Essa topologia protege as portas do microcontrolador contra surtos de corrente e adequa a operação do módulo às especificações do hardware.

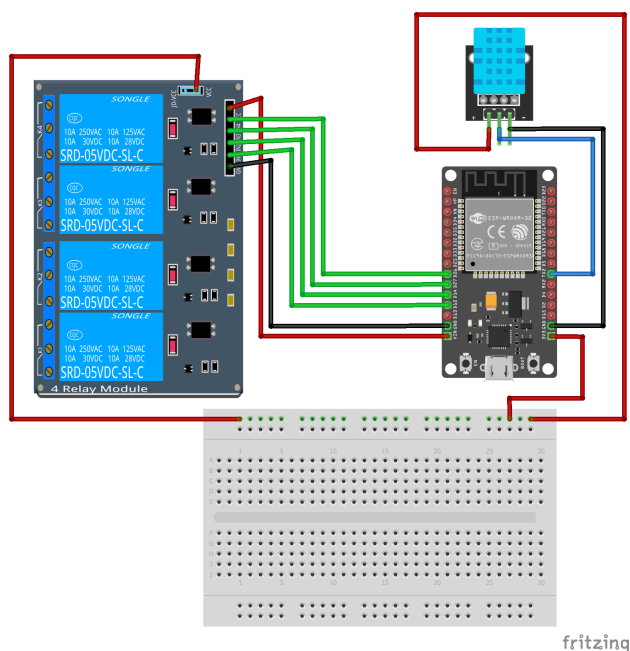


Figura 2. Esquema Elétrico

Fonte: Autoria Própria.

O controle efetivo dos motores para abertura e fechamento das laterais é realizado pelas portas GPIO 12, 14, 27 e 26, ligadas aos canais IN1 a IN4. O acionamento opera em lógica ativa em nível baixo (low trigger), onde o estado lógico '0' energiza a bobina. Por fim, todos os componentes compartilham o mesmo referencial de terra (GND) para garantir a integridade dos sinais.

### 3.3 Desenvolvimento do Firmware e Lógica de Controle

O firmware foi desenvolvido em linguagem C++ utilizando a Arduino IDE, com uma arquitetura de execução não bloqueante (*non-blocking loop*). Para isso, adotou-se uma estratégia de gerenciamento temporal baseada em contadores internos do sistema (função `millis()`) que viabiliza a concorrência cooperativa entre tarefas distintas. Essa abordagem elimina a necessidade de instruções de atraso estático (`delay`), permitindo que a aquisição de dados do sensor DHT11, o controle dos relés e a manutenção da pilha de protocolos de rede ocorram de forma pseudo-paralela.

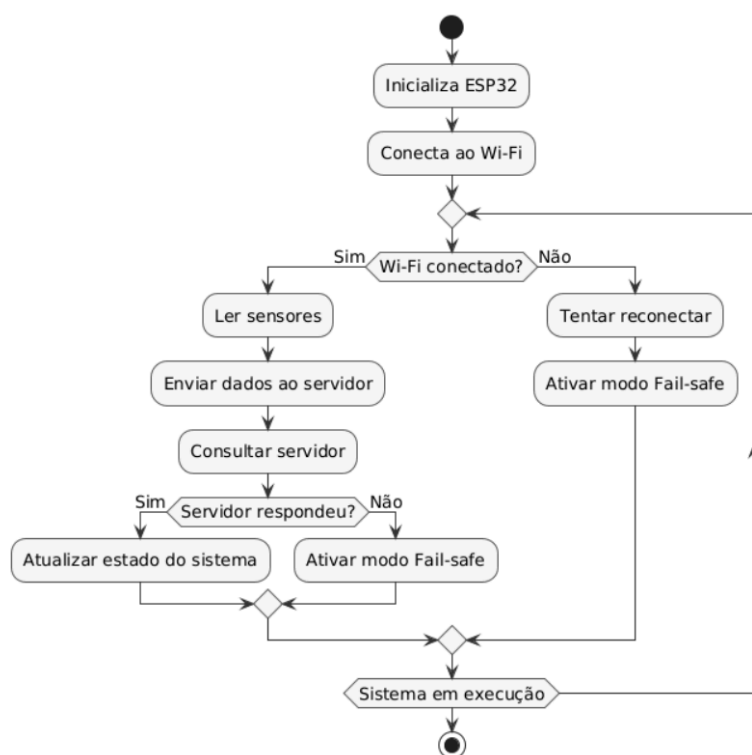


Figura 3. Fluxograma do funcionamento geral da comunicação do sistema

Fonte: Autoria Própria.

O fluxo operacional do sistema está detalhado na Figura 3. Conforme ilustrado no fluxograma, o algoritmo inicia priorizando a conexão Wi-Fi. Uma vez conectado, o sistema entra em um ciclo contínuo de repetição onde alterna sequencialmente entre a leitura dos sensores, o envio de telemetria para o servidor e a verificação de novos comandos remotos, garantindo que nenhuma tarefa bloqueie o processamento da outra.

No que tange ao controle dos atuadores, implementou-se a lógica de temporização dinâmica e parametrizável, cujos valores de configuração são recebidos da interface web. Este parâmetro define a janela temporal máxima de energização dos relés, durante a qual o algoritmo monitora a duração do acionamento e interrompe a alimentação quando o intervalo estipulado é atingido.

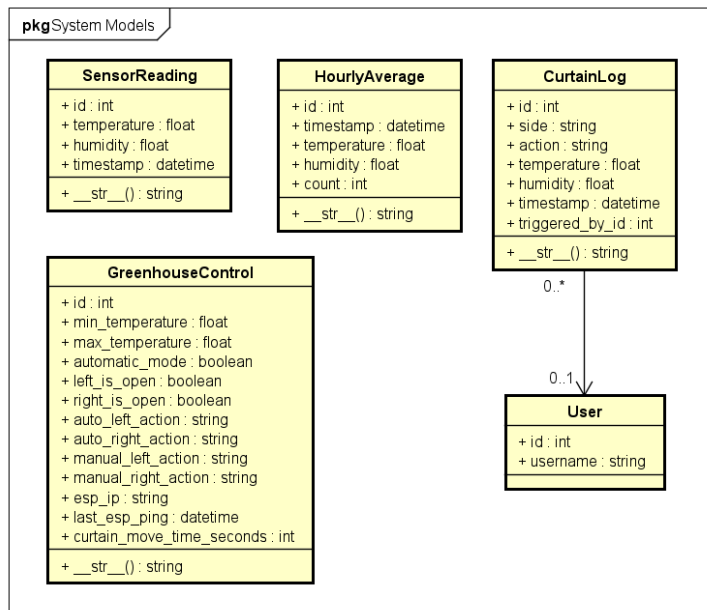
Adicionalmente, implementou-se um mecanismo de tolerância a falhas (*fail safe*) para assegurar a integridade da cultura em caso de perda na comunicação com o servidor remoto. Nesta modalidade autônoma, o sistema ignora os comandos externos e utiliza as leituras locais de temperatura para tomar decisões: caso os valores ultrapassem os limites críticos pré-definidos, serão executadas automaticamente as manobras necessárias para restabelecer o microclima ideal.

### **3.4 Desenvolvimento da Interface Web**

O desenvolvimento da interface de supervisão e controle remoto da estufa foi estruturado utilizando a linguagem de programação Python, em conjunto com o *framework* Django, que adota a arquitetura MVT (Model-View-Template). Esse padrão organiza a aplicação em três camadas distintas: a camada Model, que atua como a fonte definitiva dos dados, utilizando Mapeamento Objeto-Relacional (ORM) para abstrair a complexidade das transações; a camada View, que concentra a lógica de negócios e o processamento das requisições HTTP; e, por fim, a camada Template, que isola a lógica de apresentação ao renderizar dinamicamente a interface gráfica em HTML.

Para a camada de dados, optou-se pelo banco de dados relacional SQLite, que, por ser serverless e baseado em arquivo, integra-se nativamente ao Django e adequa-se aos requisitos de armazenamento do protótipo sem demandar configurações complexas de servidor.

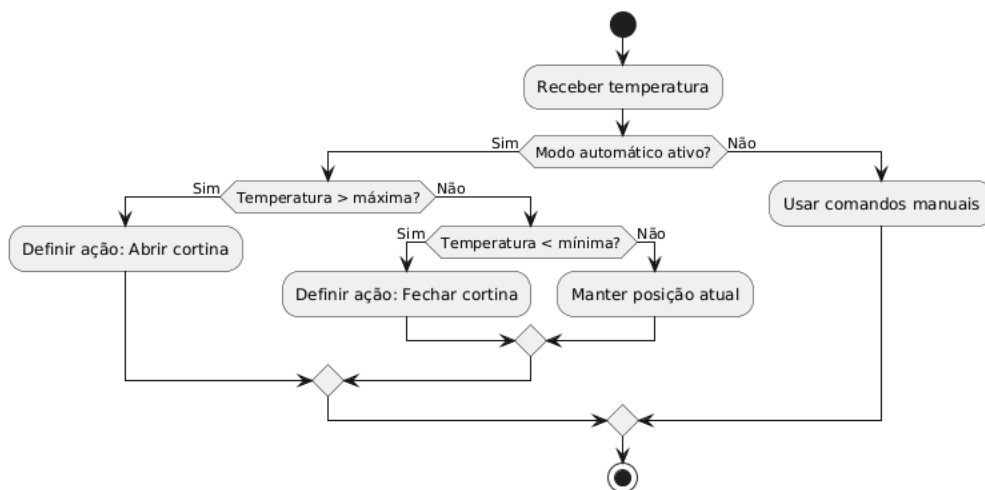
A Figura 4 apresenta o Diagrama de Classes da aplicação, ilustrando a modelagem adotada. Nessa representação, é possível observar que a classe *GreenhouseControl* atua como um centralizador de estados, armazenando os parâmetros de automação e o modo de operação. Adicionalmente, o diagrama evidencia a entidade *SensorReading*, responsável por persistir o histórico das leituras ambientais, e a classe *CurtainLog*, que registra os acionamentos dos motores. Esta última mantém um relacionamento direto com a tabela de usuários (User) do framework, garantindo a rastreabilidade de quem executou os comandos manuais.



**Figura 4. Diagrama de Classes da aplicação Web**

Fonte: Autoria Própria.

Além da estrutura de dados, o servidor é responsável por processar a lógica de controle automatizado. Conforme detalhado no fluxograma da Figura 5, o algoritmo no *back-end* compara periodicamente as últimas leituras de temperatura recebidas com os parâmetros definidos pelo usuário (Mínima e Máxima).



**Figura 5. Fluxograma da lógica de controle automático das cortinas**

Fonte: Autoria Própria.

Inicialmente, o sistema verifica se o modo automático encontra-se habilitado. Caso contrário, os comandos manuais enviados pelo usuário por meio da interface web são priorizados. Quando o modo automático está ativado, a temperatura atual é comparada com os parâmetros configurados: se o valor medido for superior ao limite máximo, a ação de abertura da cortina é definida com o objetivo de promover a ventilação do ambiente; se for inferior ao limite mínimo, a ação de fechamento é

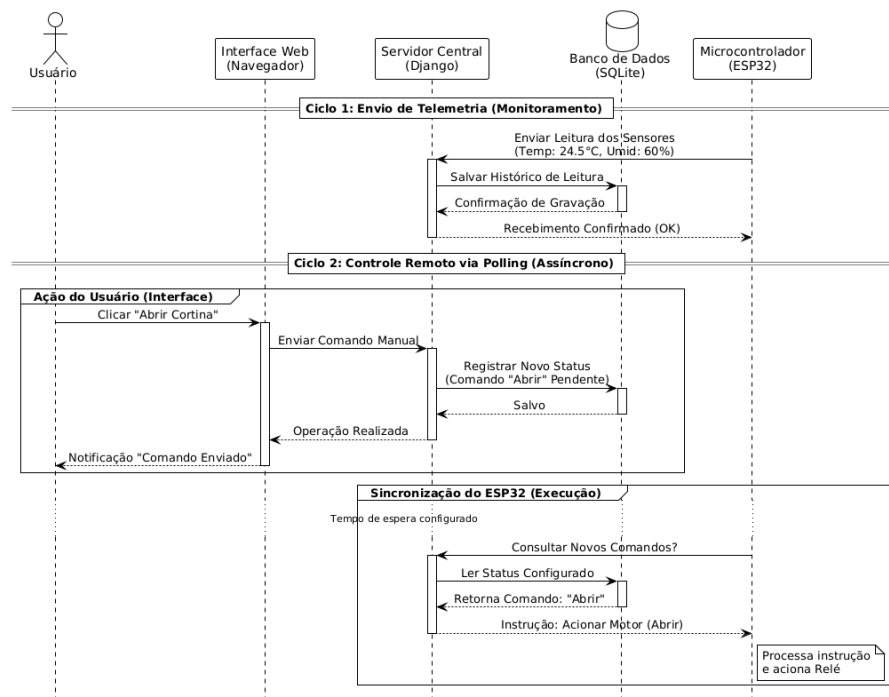
acionada visando à conservação térmica. Caso a temperatura esteja dentro da faixa ideal, a posição atual é mantida.

Além do controle automatizado, foram implementadas funcionalidades para o monitoramento em tempo real dos sensores (temperatura e umidade), bem como rotinas para o registro histórico das medições e a execução de comandos remotos, especificamente o acionamento dos motores das cortinas laterais para controle de ventilação. Para garantir a interatividade sem a necessidade de recarregamento constante da página, foram implementadas requisições assíncronas (AJAX) comunicando-se com endpoints específicos da API desenvolvida em Django.

A disponibilização do sistema para acesso externo foi realizada por meio da hospedagem na plataforma PythonAnywhere. O serviço foi escolhido por oferecer suporte nativo a aplicações Python/Django e fornecer um plano gratuito com 512 MB de armazenamento, suficiente para o protótipo. Essa estratégia permitiu a implantação em um ambiente de nuvem pública (subdomínio próprio), eliminando a necessidade de infraestrutura física de servidores locais e simplificando o processo de *deploy*.

### **3.5 Comunicação e Integração**

Com a infraestrutura estabelecida, a troca de dados entre a unidade de processamento embarcada (ESP32) e a aplicação web ocorreu por meio do protocolo HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), padrão da camada de aplicação que rege a comunicação na arquitetura *World Wide Web*. No contexto deste trabalho, adotou-se o paradigma cliente-servidor, no qual o microcontrolador atua como cliente, instanciando requisições do método POST para a transmissão dos dados telemétricos — temperatura e umidade — que são subsequentemente processados e persistidos no banco de dados. Concomitantemente, a sincronização dos comandos de controle é realizada por meio de requisições do método GET, mecanismo pelo qual o dispositivo consulta periodicamente (*polling*) as instruções de acionamento definidas na interface web. Essa arquitetura, baseada em transações síncronas de solicitação e resposta, assegurou a interoperabilidade entre o hardware e a infraestrutura em nuvem, permitindo a operação integrada e validando a integridade funcional do sistema em tempo real.



**Figura 6. Diagrama de Sequência da comunicação entre ESP32 e Servidor Web**

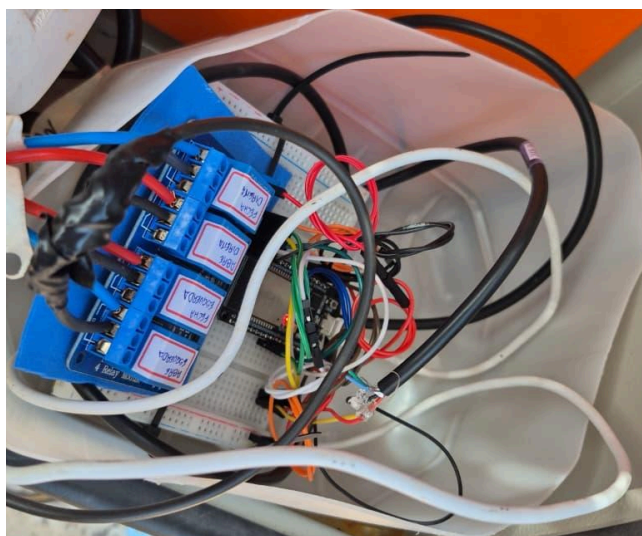
Fonte: Autoria Própria.

Para detalhar o fluxo operacional dessa integração, a Figura 6 ilustra o diagrama de sequência da comunicação. A representação visual está dividida em dois momentos distintos: o Ciclo 1, que demonstra o envio ativo de telemetria pelo ESP32 ao servidor; e o Ciclo 2, que evidencia a lógica de controle remoto via *polling*. Neste último, observa-se o desacoplamento entre a ação do usuário na interface (assíncrona) e a execução física pelo microcontrolador, intermediada pelo armazenamento temporário do comando no banco de dados.

#### 4. Discussão dos resultados

A validação do protótipo ocorreu por meio da integração física dos componentes e da verificação das rotinas de software, comprovando a estabilidade da comunicação entre o dispositivo embarcado e a interface web. O circuito eletrônico foi montado conforme o esquema projetado, integrando o microcontrolador ESP32, o módulo de relés e o sensor DHT11. Após a montagem, o sistema foi fixado na estrutura da estufa para validação em campo, conforme exibido na Figura 7.

A Figura 7 apresenta o protótipo finalizado, onde é possível visualizar a disposição das conexões físicas que permitem a leitura das variáveis ambientais e a atuação sobre os motores das cortinas. Durante os testes de energização, a estratégia de segregação das fontes de alimentação mostrou-se eficaz, garantindo que o acionamento das cargas não interferisse no processamento lógico do microcontrolador.



**Figura 7. Montagem dos componentes internos no quadro de comando**

Fonte: Autoria Própria.

Durante a fase inicial de coleta de dados, identificou-se uma divergência significativa nas leituras ambientais: o sensor DHT11, inicialmente posicionado dentro do quadro de comando junto com os demais componentes, registrava temperaturas superiores à realidade do ambiente. A análise do problema indicou que a incidência direta de radiação solar sobre a caixa metálica gerava um acúmulo de calor interno, distorcendo a aferição das variáveis climáticas.

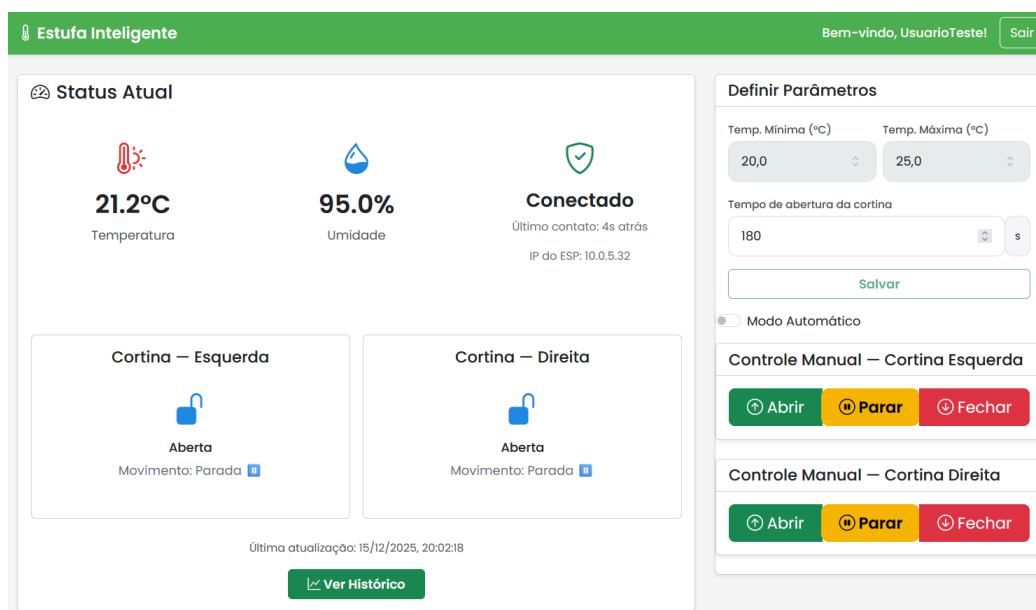
Com objetivo de corrigir essa distorção e assegurar maior precisão na coleta dos dados telemétricos, implementou-se uma alteração no projeto físico. O sensor foi realocado para um compartimento externo impresso em 3D, acoplado à parte inferior do quadro de comando, conforme detalhado na Figura 8. Essa adaptação permitiu a livre circulação do ar ambiente pelo sensor, eliminando a interferência térmica do gabinete e validando a precisão das leituras de temperatura e umidade transmitidas ao sistema.



**Figura 8. Adaptação externa do sensor para correção de leitura térmica**

Fonte: Autoria Própria.

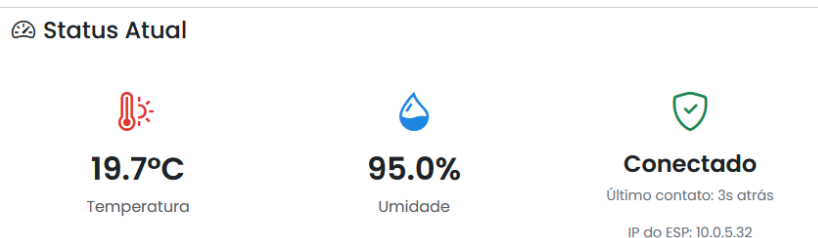
Com o hardware instalado e operacional, iniciou-se os testes de funcionamento da interface de software. O sistema desenvolvido conta com um mecanismo de controle de acesso que exige autenticação prévia, assegurando a segurança da operação. Após o login, o usuário é direcionado ao Painel de Supervisão (*dashboard*), cuja visão geral é apresentada na Figura 9. Essa interface possui layout responsivo, centralizando as principais informações do sistema e possibilitando uma visualização integrada do estado da estufa, adaptando-se automaticamente a telas de computadores ou smartphones.



**Figura 9. Painel de Supervisão do sistema de automação da estufa**

Fonte: Autoria Própria.

Os detalhes dos indicadores climáticos e de conexão são destacados na Figura 10. Nessa seção da interface, é possível confirmar que os dados telemétricos são processados e exibidos instantaneamente via requisições assíncronas em tempo real nos cartões de destaque, dispensando a necessidade de recarregamento manual da página. Adicionalmente, um indicador de status monitora a latência da comunicação, confirmando a estabilidade da conexão entre o servidor e o microcontrolador.



**Figura 10. Indicadores de telemetria e conectividade**

Fonte: Autoria Própria.

Para a operação do sistema, a interface concentra todas as configurações na coluna lateral direita. A Figura 11 detalha esse painel, no qual se encontram os campos para definição dos parâmetros de automação — Temperatura Mínima, Temperatura Máxima e Tempo de Abertura da cortina — dispostos imediatamente acima dos comandos de acionamento manual. Essa organização foi pensada tanto para facilitar a configuração das regras de controle quanto às ações diretas sobre o equipamento.

Definir Parâmetros

Temp. Mínima (°C) 20      Temp. Máxima (°C) 40

Tempo de abertura da cortina 150 s

Salvar

Modo Automático

Controle Manual — Cortina Esquerda

Abrir Parar Fechar

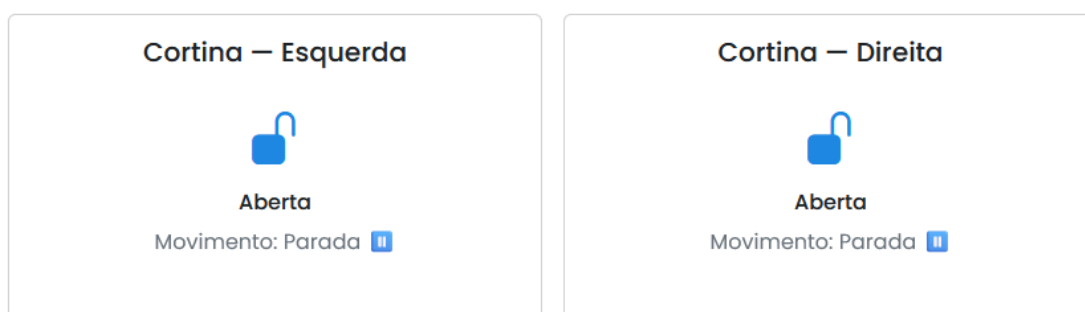
Controle Manual — Cortina Direita

Abrir Parar Fechar

**Figura 11. Painel de parametrização e controle manual**

Fonte: Autoria Própria.

A eficácia do controle remoto foi verificada através dos painéis de acionamento das cortinas. Sempre que o usuário envia um comando manual ou quando os limites de automação são atingidos, o sistema atualiza o estado da cortina exibido na interface assim que a confirmação é recebida. A Figura 12 ilustra esse mecanismo de retorno visual: o cartão correspondente apresenta um ícone dinâmico (cadeado aberto/fechado) e o status do movimento (abrindo, fechando ou parado), assegurando que a representação na tela corresponda ao estado físico real do equipamento instalado na estufa.



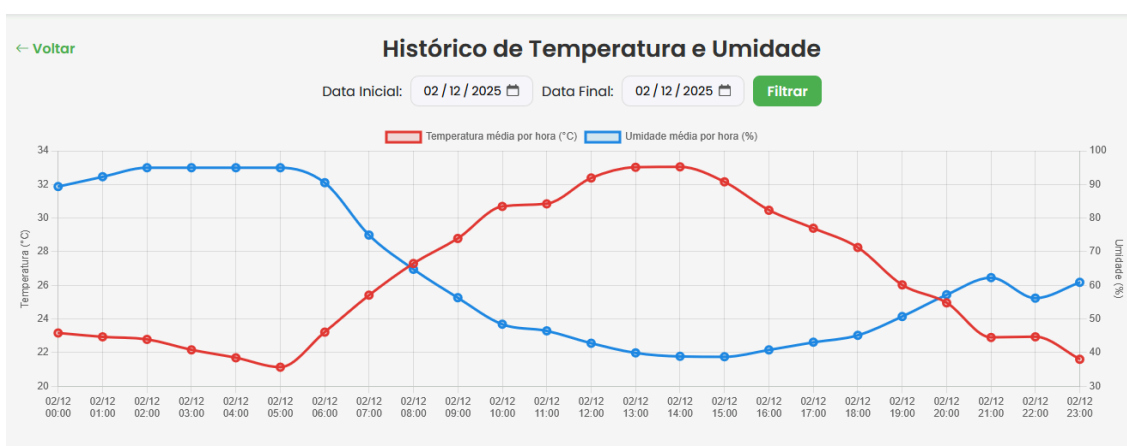
Última atualização: 09/12/2025, 23:09:41

**Figura 12. Resposta visual do status da cortina**

Fonte: Autoria Própria.

Embora o mecanismo de atualização de status tenha se mostrado adequado para validar a comunicação funcional do protótipo, a análise dos resultados evidenciou limitações associadas à arquitetura baseada em *polling*. Observou-se que o intervalo de consulta configurado resultou em uma latência operacional média de aproximadamente 10 segundos entre o envio do comando pela interface web e sua efetiva execução pelo microcontrolador. Além disso, verificou-se que esse modelo implica em consumo contínuo de recursos de rede, uma vez que o ESP32 realiza requisições contínuas ao servidor mesmo na ausência de novos comandos. Essa característica, inerente ao uso do protocolo HTTP nesse modelo de implementação, indica que, para aplicações que demandam tempos de resposta imediatos, protocolos orientados a eventos mostrariam-se mais adequados.

A tela de histórico disponibiliza um gráfico, apresentado na Figura 13, construído a partir das médias horárias de temperatura e umidade, calculadas pelo servidor com base nos registros individuais enviados pelo ESP32. Esse processamento reduz ruídos de leitura e apresenta uma visão mais estável do comportamento climático da estufa ao longo do tempo. O usuário pode definir intervalos específicos por meio dos campos de Data Inicial e Data Final, permitindo análises comparativas e a identificação de tendências ao longo de diferentes períodos.



**Figura 13. Histórico de variações de temperatura e umidade**

Fonte: Autoria Própria.

Abaixo do gráfico, o sistema apresenta uma tabela de logs de eventos, detalhada na Figura 14, que registra com precisão cada acionamento das cortinas. Cada entrada contém o *timestamp* completo, o lado acionado, o estado resultante (aberta, fechada ou parada), o modo de operação (manual ou automático), além dos valores de temperatura e umidade no momento da ação. Quando a intervenção é realizada por um usuário autenticado, o log identifica também o responsável pelos comandos. Através desses registros é possível diferenciar decisões automáticas da lógica de controle e intervenções manuais realizadas pelo usuário.

Histórico de Ações da Cortina						
Data e Hora	Status	Lado	Modo	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Usuário
03/12/2025 09:18:32	Aberta	Cortina Direita	Manual	27,4	50,0	UsuarioTeste
03/12/2025 09:18:22	Aberta	Cortina Esquerda	Manual	27,4	49,0	UsuarioTeste
03/12/2025 09:17:41	Fechada	Cortina Direita	Manual	27,5	49,0	UsuarioTeste
03/12/2025 09:16:52	Aberta	Cortina Direita	Manual	27,7	48,0	UsuarioTeste
03/12/2025 09:16:50	Aberta	Cortina Esquerda	Manual	27,7	48,0	UsuarioTeste
01/12/2025 17:30:39	Fechada	Cortina Direita	Manual	27,5	64,0	UsuarioTeste
01/12/2025 17:30:37	Fechada	Cortina Esquerda	Manual	27,5	64,0	UsuarioTeste
01/12/2025 17:29:49	Aberta	Cortina Direita	Manual	27,6	64,0	UsuarioTeste
01/12/2025 17:29:38	Aberta	Cortina Esquerda	Manual	27,6	64,0	UsuarioTeste
01/12/2025 17:28:50	Aberta	Cortinas	Automático	27,7	64,0	Automático

**Figura 14. Tabela de Logs**

Fonte: Autoria Própria.

Além da validação técnica e dos testes de comunicação, o protótipo foi submetido a uma avaliação qualitativa pelo professor responsável pelo Laboratório de Ensino, Pesquisa, Extensão e Produção (LEPEP) de Olericultura do IFFar. A avaliação destacou o potencial da solução aliada ao baixo custo de implementação.

Segundo a devolutiva recebida, o sistema demonstrou ser de fácil operação, apresentando uma interface intuitiva que pode resultar em ganho de produtividade e economia de mão de obra. O responsável ressaltou que o controle manual tradicional, baseado na abertura física de cortinas, é impreciso e demanda excessiva intervenção humana. Portanto, a solução proposta atende diretamente à demanda por maior precisão no controle de temperatura e umidade, variáveis críticas para a produção vegetal.

## 5. Considerações Finais

O presente trabalho atingiu seu objetivo principal ao desenvolver e implementar um sistema de baixo custo para a automação e monitoramento de uma estufa agrícola, utilizando a plataforma ESP32 integrada a uma aplicação web em Django. A solução proposta demonstrou-se funcional e eficiente, preenchendo a lacuna entre a necessidade de controle ambiental preciso e a acessibilidade tecnológica para pequenos produtores ou ambientes educacionais.

Durante a execução do trabalho, foi possível comprovar a eficiência da comunicação via protocolo HTTP entre o microcontrolador e o servidor, bem como o correto funcionamento da lógica de acionamento dos motores das cortinas e a visualização dos dados telemétricos em tempo real. A correção realizada no posicionamento do sensor DHT11, com a confecção de um suporte externo impresso em 3D, mostrou-se eficaz para garantir leituras condizentes com o ambiente externo, eliminando a interferência térmica gerada pelo quadro de controle.

Entretanto, a validação experimental da capacidade do sistema em manter o microclima ideal de forma autônoma e prolongada não pôde ser concluída integralmente. Devido a adversidades climáticas, a estrutura física da estufa sofreu avarias significativas decorrentes de intempéries severas, resultando no destelhamento da cobertura plástica. Esse incidente comprometeu o isolamento térmico da estufa, impossibilitando a coleta de dados comparativos que comprovasse a estabilidade da

temperatura e umidade controladas exclusivamente pelo sistema de automação proposto. Contudo, tal intercorrência não invalida a proposta tecnológica, que se manteve operacional e registrou fielmente as variações ambientais ocorridas.

Quanto a trabalhos futuros, e em consonância com as sugestões levantadas pelo responsável do LEPEP, recomenda-se a expansão do sistema para incluir telas de sombreamento móveis, que auxiliam no controle térmico. Além disso, a integração de um anemômetro torna-se imperativa para a segurança da estrutura; este sensor permitiria o fechamento automático das cortinas em situações de ventos fortes, prevenindo danos estruturais como os observados durante a validação deste estudo.

No âmbito do software, visando a otimização do tempo de resposta e da eficiência energética, sugere-se a evolução do protocolo de comunicação para o padrão MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Embora a arquitetura de requisições periódicas (HTTP) adotada neste trabalho tenha cumprido com êxito o propósito de validar a integração lógica entre o servidor e o microcontrolador, a migração para um protocolo orientado a eventos melhoraria a comunicação dinâmica de controle em tempo real.

Ademais, embora a comunicação Wi-Fi tenha se mostrado eficaz para o protótipo, a exploração de tecnologias de longo alcance em áreas sem cobertura de internet convencional poderia ampliar significativamente o escopo da solução.

Conclui-se, portanto, que a automação acessível de baixo custo tem um grande potencial para transformar práticas agrícolas, especialmente no contexto da agricultura familiar e de ambientes educacionais. O protótipo desenvolvido estabelece uma base para futuras investigações e aprimoramentos, mostra-se como um ponto de partida para a modernização das práticas de cultivo no IFFar – Frederico Westphalen.

## 6. Referências

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Conceitos relacionados à agricultura de precisão. Brasília: MAPA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/conceitos-relacionados-a-agricultura-de-precisao-1.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA). Com agricultura de precisão, produtores rurais alcançam até 29% de aumento na produtividade. Disponível em: <https://cnabrasil.org.br/noticias/com-agricultura-de-precisao-produtores-rurais-alcancam-ate-29-de-aumento-na-productividade>. Acesso em: 21 maio 2025.

DJANGO SOFTWARE FOUNDATION. Django: The Web framework for perfectionists with deadlines. 2024. Disponível em: <https://www.djangoproject.com/>. Acesso em: 07 dez. 2025.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SoC. 2024. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 21 maio 2025.

- FERNANDES, D. G.; PREUSS, E.; SILVA, T. L. da. Sistema automatizado de controle de estufas para cultivo de hortaliças. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Sistemas de Informação) – Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen, Frederico Westphalen, 2017.
- INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. Agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C. et al. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 21–33.
- JÜRGENSEN, G. P. Monitoramento e automação de estufa agrícola. 2022. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, Joinville, 2022.
- LADY ADA. DHT11 basic temperature-humidity sensor + extras. Adafruit Learning System, [s.d.]. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/dht>. Acesso em: 01 set. 2025.
- LOUREIRO, J. F. et al. Automação de estufa agrícola integrando hardware livre e controle remoto pela internet. Revista de Computação Aplicada ao Agronegócio, v. 1, n. 1, p. 38–55, 2018.
- ONU BRASIL. Mundo precisará produzir 70% mais alimentos até 2050, calcula ONU. Brasília: Nações Unidas no Brasil, 2013. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/64466-mundo-precisar%C3%A1-produzir-70-mais-alimentos-at%C3%A9-2050-calcula-onu>. Acesso em: 28 maio 2025.
- PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Welcome to Python.org. 2024. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 07 dez. 2025.
- RECH, E. V. F. Projeto de Hardware e Desenvolvimento de Software para Computador de Bordo para CubeSats. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2022.
- RODRIGUES, I. G.; MEURER, S. Automatização de irrigação e adubação de estufa agrícola com controlador lógico programável: cultivo sustentável e eficiente. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2024.
- SAHOUR, A.; BOUMEHREZ, F.; BENOURET, M.; MOKHNECHE, A. Greenhouse climate controller by using of internet of things technology and fuzzy logic. Instrumentation Measure Métrologie, Edmonton, v. 20, n. 1, p. 29–38, fev. 2021. Disponível em: <https://www.iieta.org/journals/i2m/paper/10.18280/i2m.200105>. Acesso em: 28 maio 2025.
- SILVA, B. A.; SILVA, A. R.; PAGIUCA, L. G. Cultivo protegido: em busca de mais eficiência produtiva. 2014. Disponível em: [https://www.cepea.esalq.usp.br/hfbrasil/edicoes/132/mat\\_capa.pdf](https://www.cepea.esalq.usp.br/hfbrasil/edicoes/132/mat_capa.pdf). Acesso em: 10 maio 2025.