

DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTUFA INTELIGENTE COM MONITORAMENTO AMBIENTAL E CONTROLE AUTOMATIZADO

Guilherme Pegoraro Mirabeti ¹; Konrad Souza Friedrich ¹; Leonardo Del Bel Sonoda ¹; Rafael Mayrink Shimoda dos Santos ¹

¹ Aluno do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

Resumo. *Este artigo apresenta o desenvolvimento de um modelo de estufa automatizada de baixo custo, capaz de monitorar e controlar temperatura, umidade do solo e luminosidade, utilizando sensores analógicos integrados ao microcontrolador RP2040. O sistema emprega filtragem digital para garantir estabilidade nas medições. Ventilação, irrigação e iluminação artificial são acionadas automaticamente, conforme os valores definidos pelo usuário. Uma interface de supervisão desenvolvida em Python permite o monitoramento em tempo real, armazenamento de dados e ajuste remoto dos parâmetros. A API Gemini auxilia na escolha de setpoints para plantas desejadas. O artigo descreve a estrutura física da estufa, os circuitos eletrônicos, firmware, software de supervisão e os resultados iniciais de operação. O projeto foi considerado viável para aplicações didáticas e experimentais, e tem potencial de melhorias, por meio de métodos de monitoramento e sensores mais avançados.*

Introdução

O aumento da população urbana tem intensificado os desafios relacionados à produção e distribuição de alimentos. Segundo a Organização das Nações Unidas, 68% da população mundial viverá em áreas urbanas até 2050, o que exige soluções produtivas mais eficientes, sustentáveis e próximas dos centros de consumo (ONU, 2018). Nesse cenário, a agricultura em ambiente controlado surge como alternativa de baixo impacto para reduzir perdas logísticas, otimizar recursos e fornecer condições adequadas para o desenvolvimento de plantas em espaço limitado.

A produção em estufas inteligentes permite controlar variáveis essenciais, como temperatura, umidade e luminosidade, garantindo maior estabilidade nas condições de cultivo. Sistemas de cultivo em ambiente controlado podem reduzir em até 95–98% o consumo de água e em até 99% a necessidade de área agrícola quando comparados à agricultura tradicional, graças ao uso otimizado de sensores e sistemas fechados de controle (FAO, 2020). Dessa forma, sensores e atuadores tornam-se elementos fundamentais para manter essas grandezas dentro de faixas ideais de operação.

Com base nesse contexto, o presente trabalho desenvolve uma estufa automatizada de baixo custo, utilizando sensores simples, termistor NTC 103, sensor resistivo de umidade e LDR, integrados ao microcontrolador RP2040, responsável pela aquisição de dados, filtragem e acionamento automático de ventilação, irrigação e iluminação artificial. O sistema realiza comunicação com o usuário via UART por meio de módulo Bluetooth, permitindo o ajuste remoto dos parâmetros ambientais.

Como diferencial, integra-se a API Gemini como ferramenta de apoio ao cultivo: ao informar a espécie vegetal, o usuário recebe recomendações automáticas de temperatura, umidade e fotoperíodo, auxiliando na definição dos setpoints mesmo sem conhecimento agrônômico prévio. Dessa forma, demonstra-se a viabilidade de combinar sensores acessíveis, técnicas de instrumentação e recursos modernos de inteligência artificial para o controle ambiental de pequenas estruturas de cultivo.

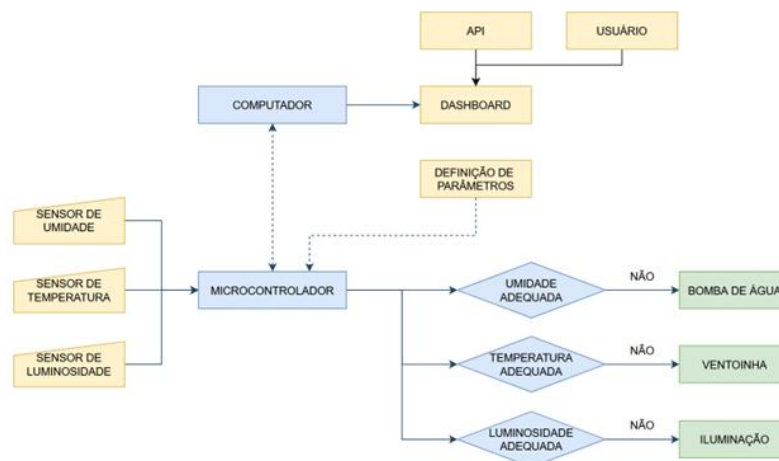
Material e Métodos

Inicialmente, foram realizados testes preliminares para avaliar o comportamento dos sensores utilizados no monitoramento ambiental da estufa inteligente. O objetivo dessa etapa foi verificar a resposta dos dispositivos diante de diferentes condições de operação, assegurando sua estabilidade e adequação para uso no sistema final.

Os sensores escolhidos foram o termistor NTC 103, para a temperatura, um fotoresistor LDR, para a luminosidade e um sensor resistivo de umidade, para ler essa variável no solo. Para a leitura dos três componentes, foram utilizados divisores de tensão, que permitem transformar uma variação de resistência em um valor de tensão, compatível com a entrada ADC do RP2040. Os valores e configurações escolhidos serão explicados mais adiante.

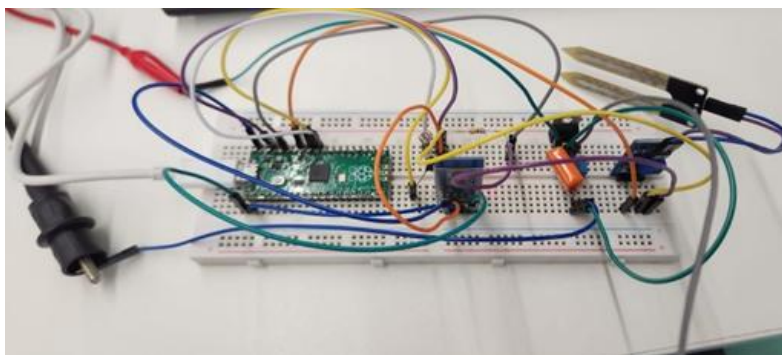
Para a confirmação do comportamento esperado para cada sensor, foi montado um circuito de testes em uma protoboard, seguindo a lógica do fluxograma da Figura 1, feito previamente para ilustrar a lógica do funcionamento geral do dispositivo. A Figura 2 ilustra o protótipo montado para validação prática das medições e integração inicial entre sensores, atuadores e o microcontrolador.

Figura 1 – Diagrama de blocos



Fonte: Autoria própria, 2025

Figura 2 – Circuito de teste na protoboard



Fonte: Autoria própria, 2025

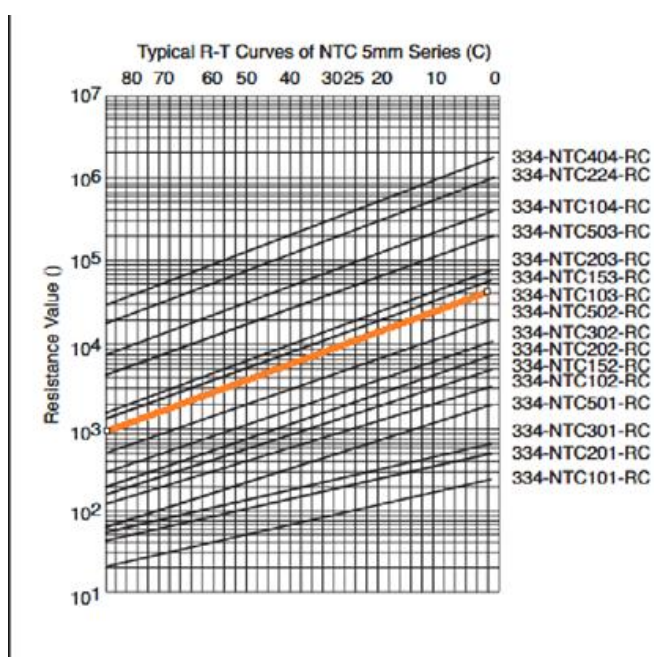
Após a validação do protótipo em protoboard, foi elaborado o esquemático eletrônico completo do sistema. A Figura 3 apresenta a integração entre o microcontrolador RP2040, os sensores de temperatura (NTC 103), de umidade do solo e de luminosidade (LDR), bem como os atuadores da estufa: ventoinha, bomba peristáltica e fita LED.

O esquema inclui os divisores resistivos para leitura dos sensores, os transistores de acionamento dos atuadores e as conexões de alimentação. Esse esquemático serviu como base para a organização do circuito final, criação da PCB e para a montagem da versão definitiva do sistema.

Fonte: Autoria própria, 2025

O termistor NTC 103 apresenta uma redução não linear da sua resistência elétrica, conforme o aumento da temperatura. Foi considerada para a análise deste sensor a curva encontrada em seu datasheet, ilustrada na Figura 4, com a curva específica ilustrada em laranja.

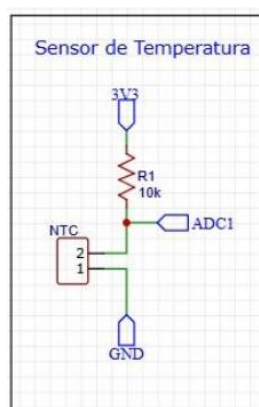
Figura 4 – Curva característica do NTC 103 (em laranja)



Fonte: Datasheet 334-NTCXXX-RC Series - XICON

Esse termistor foi associado em série a um resistor fixo, R1, de 10 k Ω , de forma a gerar um divisor de tensão, em que esta variável será lida entre os dois resistores, pelos motivos justificados previamente. O valor de R1 foi estabelecido como 10 k Ω por ser igual à resistência nominal do NTC 103 a 25°C. Desta forma, a tensão de saída, ADC1, será próxima à metade da tensão de entrada 3,3V na temperatura ambiente e terá a maior sensibilidade para valores no entorno desta. O circuito do sensor de temperatura está representado na Figura 5. O comportamento não linear será tratado posteriormente, via software.

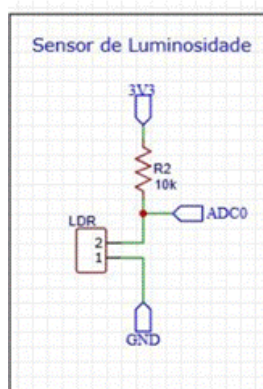
Figura 5 – Circuito do sensor de temperatura



Fonte: Autoria própria, 2025

O sensor de luminosidade utilizou uma lógica semelhante à do sensor de temperatura. O LDR apresenta uma curva não linear, sua resistência diminui conforme a luminosidade aumenta, sendo novamente necessário o divisor de tensão. A resistência escolhida, R2, foi novamente de 10 k Ω , dessa vez escolhida por gerar um valor satisfatório de leitura nos testes de calibração, em que foi simulada uma luminosidade considerada baixa como ponto de virada. O circuito final está ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Circuito do sensor de luminosidade



Fonte: Autoria própria, 2025

O sensor de umidade escolhido apresenta um divisor de tensão integrado, não sendo necessária a construção do circuito novamente. No entanto, não existe no datasheet uma curva de valores característicos para cada valor de umidade, uma vez que esta depende do solo analisado.

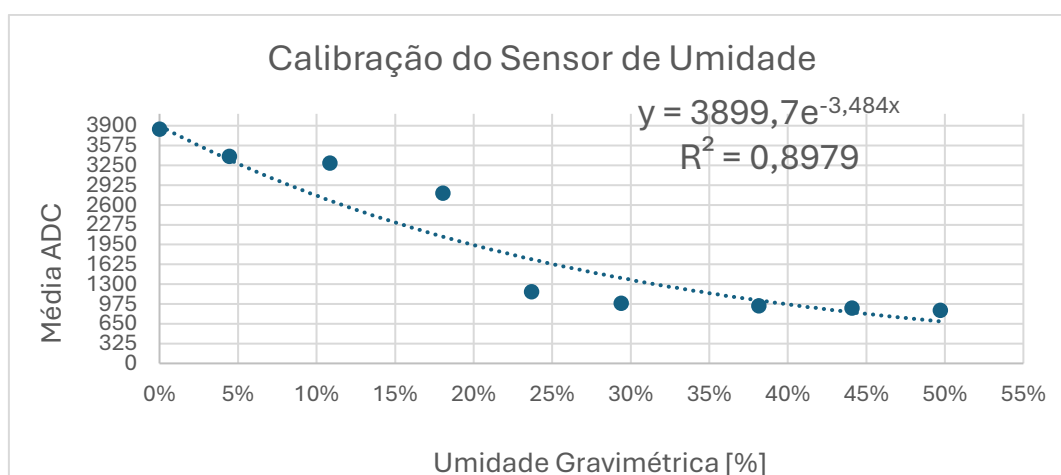
Portanto, foi realizada uma calibração com o solo que seria utilizado no modelo, com diferentes níveis de umidade. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 1. Através desses valores, foi criado um gráfico, ilustrado na Figura 7, através do qual foi criada uma linha de tendência, cuja equação foi utilizada na lógica do programa. A montagem final do sensor no circuito está ilustrada na Figura 8.

Tabela 1 – Calibração do sensor de umidade

Peso total	% de água	Média ADC	Situação do solo
48,11	0%	3845	Seco
50,25	4,4%	3395	-
53,33	10,9%	3284	-
56,79	18,0%	2795	-
59,51	23,7%	1174	-
62,25	29,4%	988	-
66,47	38,2%	946	-
69,32	44,1%	905	Extremamente molhado
72,03	49,7%	869	Extremamente molhado

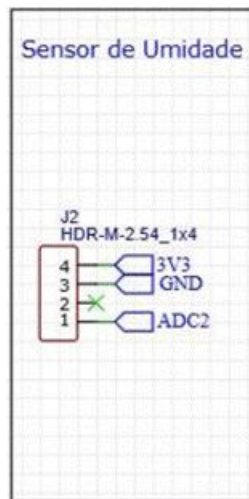
Fonte: Autoria própria, 2025

Figura 7 – Gráfico da calibração do sensor de umidade



Fonte: Autoria própria, 2025

Figura 8 – Sensor de umidade

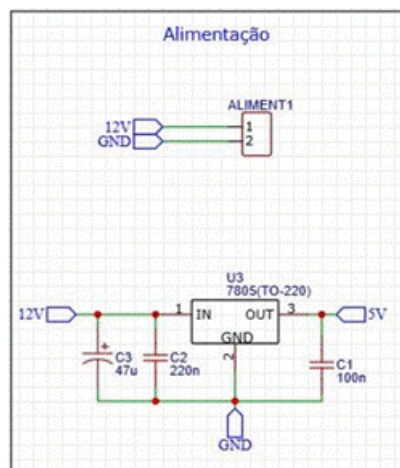


Fonte: Autoria própria, 2025

A alimentação geral do sistema foi realizada a partir de uma entrada de 12 V, responsável por acionar os atuadores e aplicada ao regulador linear 7805, responsável por fornecer os 5 V necessários ao microcontrolador e ao módulo Bluetooth, Figura 9.

Seguindo as recomendações do datasheet do componente, foram adicionados dois capacitores cerâmicos na entrada e na saída, de 220 nF e 100 nF, respectivamente. Esses capacitores tem a função de filtrar e estabilizar o sinal. Já o capacitor eletrolítico foi adicionado para estabilizar a variação na fonte de entrada.

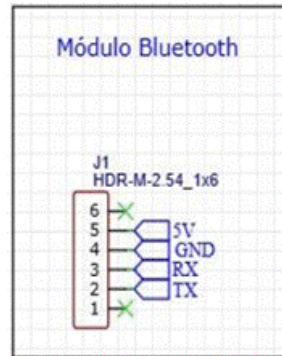
Figura 9 – Circuito da alimentação



Fonte: Autoria própria, 2025

O módulo Bluetooth foi alimentado em 5 V pelo pino físico 40 e conectado ao microcontrolador, utilizando o pino físico 1 como TX e o pino físico 2 como RX, Figura 10. Essa ligação permitiu comunicação sem fio para envio e recebimento de dados.

Figura 10 – Circuito do Módulo Bluetooth



Fonte: Autoria própria, 2025

Para o acionamento dos atuadores, foi utilizado um transistor NPN TIP 122. Para que ele funcione conforme o esperado, ou seja, como chave, é necessário que o transistor esteja saturado. Considerando a tensão de saída de nível alto do microcontrolador, de 3,3 V, a queda de tensão do par de transistores $V_{be} = 1,4V$ e o resistor de base, $R_b = 1\text{ k}\Omega$. Através da Equação 1, foi calculada a corrente na base do transistor.

$$I_B = \frac{V_{GPIO} - V_{BE(sat)}}{R_B} = \frac{3,3 - 1,4}{1000} = 1,9\text{ mA} \quad (1)$$

Dado que o ganho mínimo de corrente do TIP122 é de 1000, essa corrente de base é capaz de sustentar uma corrente de coletor (I_c) calculada na Equação 2.

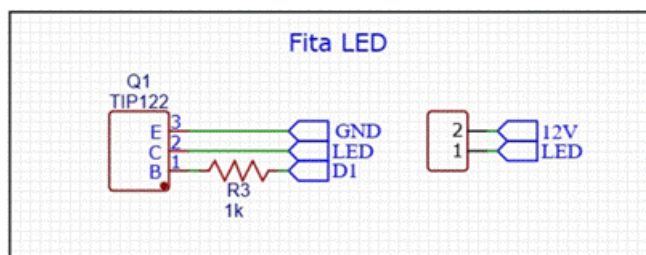
$$I_{C(max)} = I_B \cdot h_{FE} = 1,9\text{ mA} \cdot 1000 = 1,9\text{ A} \quad (2)$$

Como as correntes dos atuadores são baixas (cerca de 500 mA), a corrente máxima é muito superior à corrente de carga, assegurando que o transistor opere saturado.

Além disso, para cargas indutivas, foi implementado um diodo 1N4007 em paralelo com a carga, funcionando de modo flyback. Dessa maneira, há um caminho para a corrente gerada pelos campos magnéticos das bobinas quando estas são desligadas, evitando picos de tensão reversos.

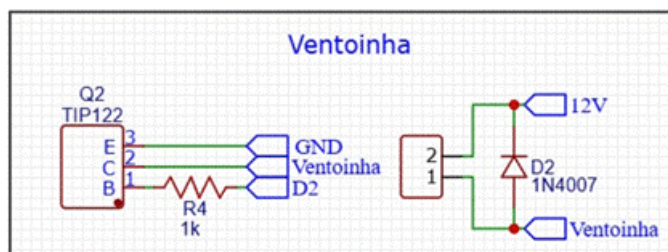
Os circuitos finais da fita LED, ventoinha e bomba estão representados na Figuras 11, 12 e 13, respectivamente.

Figura 11– Circuito da fita LED



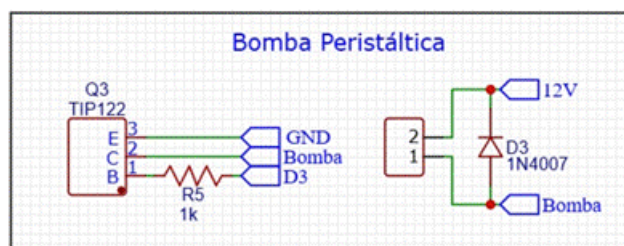
Fonte: Autoria própria, 2025

Figura 12 – Circuito da Ventoinha



Fonte: Autoria própria, 2025

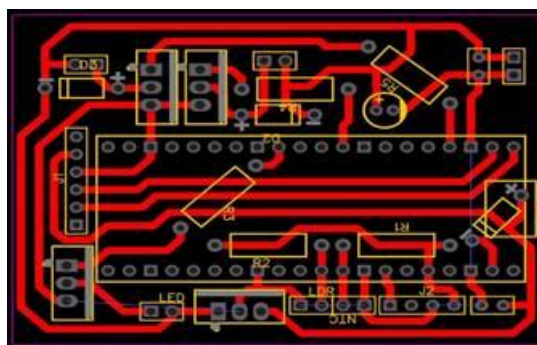
Figura 13 – Circuito da bomba peristáltica



Fonte: Autoria própria, 2025

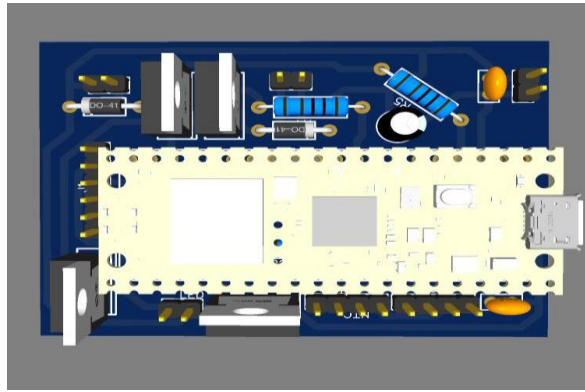
O circuito final para a PCI e uma representação 3D da placa estão representados nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

Figura 14 – Circuito final da PCI



Fonte: Autoria própria, 2025

Figura 15 – Representação 3D da PCI



Fonte: Autoria própria, 2025

Além da montagem eletrônica e do desenvolvimento do firmware, foi elaborado também um modelo conceitual da estufa, utilizado para representar a estrutura planejada do sistema. A Figura 16 apresenta o modelo externo da estufa, desenvolvido em MDF e acrílico, com cortes a laser, ilustrando a proposta de disposição física dos sensores, atuadores e do microcontrolador. Esse modelo serviu de referência para o projeto final, permitindo visualizar o posicionamento dos elementos e avaliar previamente o espaço necessário para a montagem.

A Figura 17 mostra a vista interna desse modelo conceitual, indicando a forma como os componentes seriam distribuídos no interior da estrutura. Essa representação foi utilizada como base para orientar o arranjo físico durante a montagem real, incluindo a organização dos cabos, a separação entre circuitos de potência e lógica, e a ventilação necessária para o conjunto eletrônico.

Figura 16 – Vista isométrica do modelo



Fonte: Autoria própria, 2025

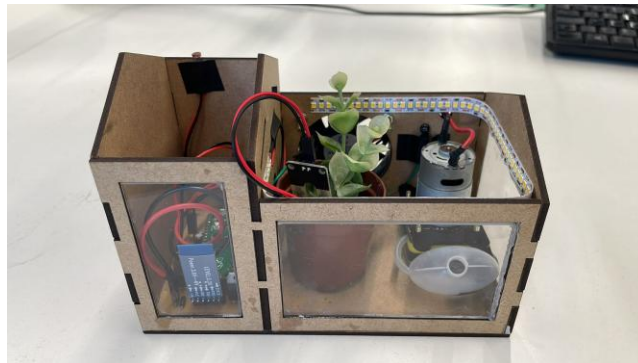
Figura 17 – Vista interna do modelo



Fonte: Autoria própria, 2025

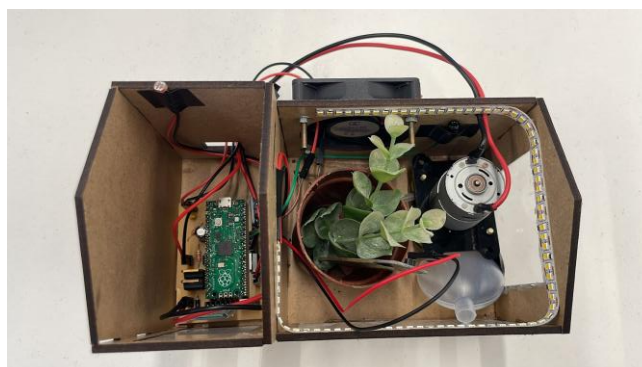
A Figura 18 apresenta a vista isométrica da estrutura final do protótipo, destacando a disposição externa dos componentes e a conformidade da montagem com o modelo previamente planejado. A Figura 19 mostra a vista interna do sistema, evidenciando a organização dos elementos eletrônicos, o roteamento dos cabos e a separação entre os circuitos, garantindo ordem e funcionalidade na configuração final.

Figura 18 – Vista isométrica do projeto



Fonte: Autoria própria, 2025

Figura 19 – Vista interna do projeto



Fonte: Autoria própria, 2025

A programação do microcontrolador foi desenvolvida utilizando o SDK do Raspberry Pi Pico e linguagem C, adotando uma arquitetura orientada por interrupções, garantindo uma resposta eficiente às variações ambientais da estufa automatizada.¹

Na etapa de inicialização, o microcontrolador configura os periféricos conforme o esquema eletrônico previamente apresentado. Os canais analógicos do conversor ADC são habilitados para leitura contínua dos sensores de temperatura, umidade do solo e luminosidade, enquanto os pinos destinados ao acionamento da ventoinha, da bomba peristáltica e da iluminação artificial são ajustados como saídas digitais. A comunicação UART é ativada para integrar o módulo Bluetooth, permitindo telemetria contínua e o envio remoto de comandos pelo usuário.

Um temporizador periódico executa a rotina de aquisição, realizando leituras sucessivas dos sensores e atualizando buffers circulares que, por meio de média móvel, reduzem ruídos e fornecem valores estabilizados. Nessa mesma rotina é contabilizado o fotoperíodo diário: a cada segundo verifica-se se há luz natural suficiente ou se a iluminação artificial está ativa, incrementando-se o tempo acumulado sempre que as condições de cultivo são atendidas.

O controle dos atuadores baseia-se nas variáveis filtradas. A ventoinha é acionada quando a temperatura ultrapassa o limite configurado; a bomba peristáltica opera quando a umidade fica abaixo do desejado; e a iluminação artificial complementa a luz natural quando o limiar definido não é atingido. Cada atuador é acionado por um transistor de chaveamento, com proteção adequada contra sobretensões provenientes das cargas indutivas.

Os dados são enviados ao software supervisor em quadros binários contendo as leituras dos sensores, os estados dos atuadores e o tempo de luz acumulado. Um byte de verificação garante a integridade da comunicação. Além da telemetria, o firmware processa comandos recebidos para atualizar setpoints e redefinir o contador diário.

O software de supervisão, desenvolvido em Python, recebe e armazena os dados em um banco SQLite e apresenta gráficos em tempo real em um dashboard criado com a biblioteca Dash. A interface permite ao usuário ajustar parâmetros, que são imediatamente transmitidos ao microcontrolador.

O sistema também integra a API Gemini, que fornece recomendações automáticas de temperatura, umidade e horas de luz para a espécie vegetal indicada pelo usuário, permitindo atualização direta dos setpoints. Para garantir que as respostas sejam satisfatórias, o sistema envia um prompt pronto, apenas substituindo o nome da planta inserida, que solicita as informações necessárias e solicita o retorno em formato JSON, que pode ser interpretado posteriormente pelo Python.

¹ O código-fonte do firmware e os arquivos do projeto estão disponíveis no repositório GitHub: <https://github.com/leosonoda00/Projeto-Instrumenta-o-2-Semestre/tree/main>

A comunicação entre o software de supervisão e o microcontrolador é feita através do protocolo UART, que é gerado diretamente pelo RP2040, com uma taxa de transmissão de 9600 bps. Esse sinal é enviado para o computador através de um módulo Bluetooth, conectado aos pinos TX e RX. No computador, esse sinal é recebido e interpretado através da porta COM virtual.

Resultados e Discussão

A análise preliminar dos dados apresentados no dashboard, Figura 20, permite avaliar o comportamento operacional do sistema e verificar a consistência entre as medições realizadas pelos sensores e as ações executadas pelos atuadores da estufa automatizada. Ainda que o conjunto de dados disponível represente apenas um recorte temporal, é possível identificar padrões relevantes que evidenciam o correto funcionamento da arquitetura proposta.

Figura 20 – Dashboard comportamental da estufa



Fonte: Autoria própria, 2025

A análise da curva de temperatura, Figura 20, demonstra a eficácia do filtro digital de média móvel implementado no firmware. Nota-se a ausência de ruídos de alta frequência típicos de conversores A/D e de interferências eletromagnéticas, resultando em uma curva suave e estável. Essa estabilidade é crucial para o sistema de controle, pois impede o acionamento intermitente da ventoinha quando a temperatura oscila próxima aos valores limite definidos.

No caso da luminosidade, observam-se picos bem definidos ao longo do gráfico, correspondentes ao acionamento da iluminação artificial. Esses eventos ocorrem quando a leitura do LDR permanece abaixo do limiar pré-estabelecido e enquanto a meta diária de fotoperíodo ainda não

é atendida. Tal relação direta entre a leitura sensorial e o acionamento do atuador evidencia a conformidade da lógica de controle com o comportamento esperado, validando a implementação do mecanismo de compensação luminosa.

A variável de umidade do solo, por sua vez, exibe oscilações compatíveis com a natureza dos sensores resistivos utilizados, reconhecidamente sensíveis a variações locais do substrato e a interferências externas. Ainda que apresentem variabilidade inerente, os valores obtidos permanecem coerentes para a faixa de operação adotada. Esses dados indicam que, ao atingir o limiar mínimo configurado, a bomba peristáltica poderá ser acionada com precisão aceitável, atendendo às exigências operacionais da estufa.

A contagem do fotoperíodo, visualizada no painel inferior da Figura 15, reafirma o funcionamento correto do sistema de temporização luminosa. O incremento contínuo do tempo de exposição (natural ou artificial) demonstra a capacidade do firmware em registrar, discriminar e acumular períodos válidos de iluminação, permitindo ao usuário acompanhar de forma integrada o cumprimento da meta diária estabelecida.

Outro aspecto relevante é a interação com o módulo de inteligência artificial por meio da API Gemini. A resposta obtida para a espécie “tomate” apresenta recomendações coerentes com parâmetros agrônômicos amplamente descritos na literatura, reforçando o potencial da funcionalidade como ferramenta de apoio ao usuário na definição de condições ambientais adequadas ao cultivo.

De modo geral, mesmo com um conjunto inicial de leituras, os resultados obtidos demonstram que o sistema é capaz de monitorar, processar e representar variáveis ambientais de forma integrada, além de executar ações corretivas de acordo com os setpoints definidos. Com a obtenção de um conjunto mais amplo de medições experimentais, será possível aprofundar a discussão, realizar comparações quantitativas e avaliar o desempenho global da estufa automatizada com maior rigor estatístico.

Conclusões

O sistema de estufa automatizada desenvolvido neste trabalho demonstrou-se funcional e capaz de monitorar continuamente as variáveis ambientais essenciais ao cultivo, temperatura, luminosidade e umidade do solo, por meio de sensores de baixo custo integrados ao microcontrolador RP2040. A lógica de controle implementada atuou de forma coerente com os setpoints definidos, acionando ventilação, irrigação e iluminação suplementar quando necessário.

A interface de supervisão em Python permitiu visualização clara dos dados, armazenamento histórico e ajuste remoto dos parâmetros de operação, enquanto a integração com a API Gemini agregou um recurso adicional de apoio ao usuário, fornecendo recomendações alinhadas às necessidades de diferentes espécies vegetais.

Mesmo com o conjunto inicial de testes, os resultados indicam que a solução é consistente e adequada para aplicações didáticas e experimentais, evidenciando o potencial do protótipo como ferramenta acessível para estudos em instrumentação, automação e monitoramento ambiental. Trabalhos futuros poderão aprofundar a análise de desempenho, substituir sensores por modelos mais precisos e expandir a comunicação para redes sem fio de maior alcance.

Referências Bibliográficas

- ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. New York: United Nations, 2018. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *The State of Food and Agriculture 2020*. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/sofa/2020/en/>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- ON SEMICONDUCTOR. TIP120/TIP121/TIP122 Series: Darlington Transistors. Datasheet, 2014.
- STMICROELECTRONICS. L78 Series: Positive Voltage Regulators. Datasheet. Geneva, 2014.
- XICON PASSIVE COMPONENTS. 334-NTCXXX-RC Series: Thermistors. Datasheet. 2007.