

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JULIO EDUARDO SANTOS DE LARA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MICROCONTROLADO PARA CULTIVO
INDOOR: CONTROLE AMBIENTAL E INTERFACE PARA USUÁRIO**

MEDIANEIRA

2025

versão 11.0 (abr.25)

JULIO EDUARDO SANTOS DE LARA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MICROCONTROLADO PARA CULTIVO
INDOOR: CONTROLE AMBIENTAL E INTERFACE PARA USUÁRIO**

**Development of a microcontrolled system for indoor cultivation: environmental
control and user interface**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Alberto Noboru Miyadaira.

MEDIANEIRA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JULIO EDUARDO SANTOS DE LARA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MICROCONTROLADO PARA CULTIVO
INDOOR: CONTROLE AMBIENTAL E INTERFACE PARA USUÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 27/novembro/2025

Alberto Noboru Miyadaira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Filipe Marangoni
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ismael Burgardt
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2025

AGRADECIMENTOS

Não tenho como expressar minha imensa gratidão aos meus pais Julio Cesar Bonazza de Lara, e Thiarliane Scheile Schwanck dos Santos por todo apoio incondicional e sacrifício durante a minha vida. Sem o apoio, encorajamento e amor de vocês, eu jamais seria a pessoa que sou hoje.

Seus esforços incansáveis para me proporcionar as melhores oportunidades educacionais moldaram não apenas meu futuro, mas também os valores e princípios que me guiaram até aqui. Em especial, quero reconhecer os sacrifícios que fizeram, renunciando a suas próprias necessidades, para que eu pudesse me dedicar inteiramente aos estudos.

Cada conquista que alcancei é um reflexo direto do amor e apoio inabaláveis que vocês me proporcionaram. Sei que nem sempre foi fácil, mas vocês nunca vacilaram em seu compromisso com o meu sucesso. Suas lições de perseverança, dedicação e resiliência serão tesouros que levarei para toda a vida.

Também gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha namorada Maria Fernanda Arenhart por todo o apoio, paciência e compreensão ao longo do período de graduação. Sua presença constante foi fundamental para que eu mantivesse o equilíbrio emocional diante dos desafios dessa jornada.

Agradeço por compreender meus momentos de ausência, pelas palavras de incentivo e por celebrar comigo cada pequena conquista. Sua parceria, carinho e apoio incondicional foram essenciais para que eu mantivesse o foco e a motivação até a conclusão deste projeto.

RESUMO

A agricultura tradicional enfrenta diversos desafios, incluindo a dependência de condições climáticas imprevisíveis, pragas, doenças e a necessidade de grandes áreas de terra fértil, que estão se tornando cada vez mais escassas. Cultivos internos e controlados oferecem uma alternativa promissora, mitigando esses problemas ao criar um ambiente ideal e constante para o desenvolvimento das plantas, independente das condições externas. O presente trabalho apresenta um estudo para o desenvolvimento de um sistema microcontrolado para cultivo indoor que seja capaz de otimizar o controle das variáveis ambientais, como temperatura, iluminação, umidade relativa e umidade do solo, sendo essas essenciais para o crescimento saudável das plantas. Este sistema utiliza sensores para monitorar as variáveis críticas do ambiente de cultivo e atuadores para ajustá-las automaticamente conforme necessário. Para a aquisição de dados, emprega o sensor BME280, responsável pela medição de temperatura e umidade do ar, e o sensor HD-38, utilizado para determinar a umidade do solo. O acionamento dos dispositivos de controle é realizado por meio de um módulo de relés, enquanto a interação com o usuário ocorre através de um display OLED SSD1306 e de um encoder rotativo KY-040, que permitem configurar e acompanhar facilmente as condições do ambiente de cultivo. A expectativa é que este trabalho contribua para uma solução mais acessível e igualmente eficiente em comparação com as opções existentes no mercado, democratizando o acesso à tecnologia de cultivo indoor. A implementação de um sistema microcontrolado de baixo custo pode viabilizar a adoção em larga escala, promovendo uma agricultura mais sustentável e resiliente.

Palavras-chave: microcontroladores; controle de temperatura; irrigação; estufas para cultivo.

ABSTRACT

Traditional agriculture faces several challenges, including dependence on unpredictable weather conditions, pests, diseases, and the need for large areas of fertile land, which are becoming increasingly scarce. Indoor and controlled cultivation offers a promising alternative by mitigating these issues and creating an ideal and stable environment for plant development, regardless of external conditions. This work presents the development of a microcontrolled system for indoor cultivation capable of optimizing the control of environmental variables such as temperature, lighting, relative humidity, and soil moisture, factors essential for healthy plant growth. The system uses sensors to monitor critical environmental variables and actuators to adjust them automatically when necessary. For data acquisition, it employs the BME280 sensor, responsible for measuring ambient temperature and humidity, and the HD-38 sensor, used to determine soil moisture. The control of external devices is performed through a relay module, while user interaction is provided via an SSD1306 OLED display and a KY-040 rotary encoder, allowing easy configuration and monitoring of cultivation conditions. This work aims to contribute to a more accessible and efficient solution compared to existing commercial options, democratizing access to indoor cultivation technology. The implementation of a low-cost microcontrolled system may enable large-scale adoption, promoting more sustainable and resilient agricultural practices.

Keywords: microcontrollers; temperature control; irrigation; greenhouses.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de malha fechada.....	16
Figura 2 – Sistema de controle liga-desliga.....	16
Figura 3 – Histerese	17
Figura 4 – Sinal de saída de um sistema com controle on-off e histerese.....	17
Figura 5 – Controlador <i>GrowHub</i> E42A.....	28
Figura 6 – Controlador <i>Hydro-X</i> HCS-1	28
Figura 7 – Cartão eletrônico <i>Blue Pill</i>	30
Figura 8 – Esquemático do sistema	31
Figura 9 – Sensor BME280	31
Figura 10 – Módulo sensor BME280	32
Figura 11 – Sensor HD-38 e módulo de comunicação	32
Figura 12 – <i>Encoder</i> rotativo KY-040.....	33
Figura 13 – Display OLED SSD1306	33
Figura 14 – Módulo de relés com quatro canais.....	34
Figura 15 – Módulo conversor USB-Serial FT232RL.....	34
Figura 16 – Arquitetura do sistema	36
Figura 17 – Inicialização e laço principal	39
Figura 18 – Aquisição de dados BME280.....	40
Figura 19 – Aquisição de dados HD-38	41
Figura 20 – Aquisição de dados RTC	42
Figura 21 – Aquisição da rotação e clique do KY-040	43
Figura 22 – Controle de temperatura com histerese.....	44
Figura 23 – Controle de umidade com histerese.....	45
Figura 24 – FSM do controle de irrigação	46
Figura 25 – Lógica de monitoramento.....	47
Figura 26 – Lógica do tempo de irrigação.....	48
Figura 27 – Lógica do tempo de absorção.....	48
Figura 28 – Lógica de tratamento de erro	49
Figura 29 – Controle de iluminação.....	50
Figura 30 – Estrutura das camadas do menu	52
Figura 31 – Processo de navegação no menu.....	53
Figura 32 – Processo de edição de valores	54
Figura 33 – Sistema de registro de dados.....	55

Figura 34 – Vista superior do protótipo eletrônico desenvolvido.....	59
Figura 35 – Parte inferior da placa com interligações e pontos de solda	60
Figura 36 – Estufa utilizada como ambiente de teste	60
Figura 37 – Sistema completo acoplado à estufa.....	61
Figura 38 – Menu principal do sistema.....	61
Figura 39 – Tela de medições.....	62
Figura 40 – Opções no menu de configurações.....	62
Figura 41 – Configurações individuais.....	63
Figura 42 – Menu de calibração do sensor HD-38.....	64
Figura 43 – Menu de configurações da irrigação	64
Figura 44 – Menu de configuração do RTC.....	64
Figura 45 – Menu de controles.....	65
Figura 46 – Temperatura ao longo de 24 horas de operação do sistema	66
Figura 47 – Umidade relativa do ar ao longo de 24 horas de operação do sistema.....	67
Figura 48 – Período de estabilização da temperatura após o acionamento da iluminação.....	68
Figura 49 – Controle de temperatura em regime estável.....	68
Figura 50 – Período de estabilização da umidade após o acionamento da iluminação.....	69
Figura 51 – Controle de umidade em regime estável.....	69
Figura 52 – Resposta da temperatura ao sistema sem histerese	70
Figura 53 – Resposta da umidade ao sistema sem histerese	70
Figura 54 – Resposta da temperatura ao sistema com histerese	71
Figura 55 – Resposta da umidade ao sistema com histerese	71
Figura 56 – Variação da umidade do solo durante um ciclo de irrigação	72
Figura 57 – Tempo de ativação da bomba de irrigação	73
Figura 58 – Ciclo completo do sistema de iluminação durante 24 horas.....	74
Figura 59 – Momento de acionamento do sistema de iluminação.....	74
Figura 60 – Momento de desligamento do sistema de iluminação.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros relacionados ao controle de temperatura e umidade do ar	66
Tabela 2 – Parâmetros relacionados ao controle de irrigação.....	72
Tabela 3 – Parâmetros relacionados ao controle de iluminação	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	Revisão histórica	15
2.2	Controle de malha aberta e malha fechada	15
2.3	Controle on-off com histerese	16
2.4	Variáveis ambientais	18
2.4.1	Temperatura e umidade relativa do ar	18
2.4.2	Umidade do solo	19
2.5	Interface para o usuário	20
2.5.1	Display <i>OLED</i>	21
2.5.2	<i>Encoder</i> incremental	21
2.6	Relés	22
2.7	Microcontroladores	23
2.7.1	STM32F103C8T6	24
<u>2.7.1.1</u>	<u><i>Analog-to-Digital Converter (ADC)</i></u>	<u>24</u>
<u>2.7.1.2</u>	<u><i>Inter-Integrated Circuit (I²C)</i></u>	<u>24</u>
<u>2.7.1.3</u>	<u><i>Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter (USART)</i></u>	<u>25</u>
<u>2.7.1.4</u>	<u><i>General-Purpose Input/Output (GPIO)</i></u>	<u>26</u>
<u>2.7.1.5</u>	<u>Timer</u>	<u>26</u>
<u>2.7.1.6</u>	<u><i>Real-Time Clock (RTC)</i></u>	<u>26</u>
<u>2.7.1.7</u>	<u><i>SysTick</i> Timer</u>	<u>27</u>
2.8	Controladores disponíveis no mercado	27
2.8.1	Controlador Vivosun <i>GrowHub</i> E42A	27
2.8.2	Controlador <i>TrolMaster Hydro-X</i> HCS-1	28
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	30
3.1	Topologia física	30
3.1.1	Dispositivos e interconexões	30
<u>3.1.1.1</u>	<u>Sensor BME280</u>	<u>31</u>
<u>3.1.1.2</u>	<u>Sensor HD-38</u>	<u>32</u>
<u>3.1.1.3</u>	<u><i>Encoder</i> rotativo KY-040</u>	<u>32</u>
<u>3.1.1.4</u>	<u>Display <i>OLED</i> SSD1306</u>	<u>33</u>
<u>3.1.1.5</u>	<u>Módulo de relés com quatro canais</u>	<u>33</u>
<u>3.1.1.6</u>	<u>Conversor USB-Serial FT232RL</u>	<u>34</u>

3.1.2	Sistema de alimentação e filtragem.....	34
3.2	Desenvolvimento do software embarcado.....	35
3.2.1	Arquitetura do sistema.....	35
3.2.2	Recursos de hardware utilizados.....	38
3.2.3	Inicialização e laço principal	39
3.2.4	Sensores e dispositivo de entrada.....	40
<u>3.2.4.1</u>	<u>BME280.....</u>	<u>40</u>
<u>3.2.4.2</u>	<u>HD-38</u>	<u>41</u>
<u>3.2.4.3</u>	<u>RTC</u>	<u>42</u>
<u>3.2.4.4</u>	<u>Encoder rotativo</u>	<u>42</u>
3.2.5	Sistemas de controle	43
<u>3.2.5.1</u>	<u>Controle de temperatura e umidade</u>	<u>44</u>
<u>3.2.5.2</u>	<u>Controle de irrigação</u>	<u>46</u>
<u>3.2.5.3</u>	<u>Controle de iluminação</u>	<u>49</u>
3.2.6	Interface com o usuário	51
<u>3.2.6.1</u>	<u>Camadas do menu</u>	<u>51</u>
<u>3.2.6.2</u>	<u>Navegação</u>	<u>53</u>
<u>3.2.6.3</u>	<u>Menu de edição</u>	<u>54</u>
3.2.7	Registro de dados	55
3.3	Procedimentos de teste e validação.....	56
3.3.1	Ambiente de teste.....	56
3.3.2	Comunicação e registro de dados	56
3.3.3	Validação dos controles	57
3.3.4	Análise dos dados obtidos.....	57
4	RESULTADOS.....	59
4.1	Protótipo e ambiente de teste	59
4.2	Interface com o usuário	61
4.2.1	Menu principal	61
4.2.2	Tela de medições	62
4.2.3	Menus de configuração	62
4.2.4	Menu de controle.....	65
4.3	Sistemas de controle	65
4.3.1	Controle de temperatura e umidade relativa do ar	65
<u>4.3.1.1</u>	<u>Controle diário completo.....</u>	<u>66</u>
<u>4.3.1.2</u>	<u>Controle em períodos parciais.....</u>	<u>67</u>

<u>4.3.1.3</u>	<u>Comparação entre controle com e sem histerese</u>	<u>69</u>
4.3.2	Controle de irrigação	72
4.3.3	Controle de iluminação	73
4.4	Análise geral dos resultados.....	75
5	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

A agricultura atual enfrenta uma série de desafios que tornam a adoção de novas tecnologias e práticas mais urgente do que nunca. A população mundial está em constante crescimento, aumentando a demanda por alimentos.

Estima-se que em até 2050, a produção de alimentos precisará aumentar significativamente para alimentar uma população que pode ultrapassar os 9 bilhões de pessoas, como afirma *Food and Agriculture Organization of the United Nations* em 2017.

Também sustenta que as mudanças climáticas têm um impacto profundo na agricultura, causando eventos climáticos extremos e inesperados, como secas, inundações e temperaturas fora do padrão, que podem devastar colheitas. A degradação do solo e a escassez de água também limitam a capacidade de produção em muitas regiões.

Além disso, a globalização e a urbanização acelerada exigem sistemas de produção de alimentos que sejam resilientes, eficientes e capazes de operar em espaços urbanos. A agricultura tradicional, com sua dependência de grandes áreas de terra e condições climáticas favoráveis, na maioria dos casos não consegue atender a essas demandas de maneira sustentável (Kurt e Tomkins, 2018).

O presente projeto de pesquisa visa desenvolver um sistema microcontrolado para cultivo indoor, com foco no controle ambiental e na interface para o usuário. Este sistema pretende integrar sensores e atuadores, monitorados e gerenciados por um microcontrolador, com o objetivo de otimizar as condições de crescimento de plantas em ambientes internos. A interface do usuário será projetada para permitir a fácil configuração e monitoramento dos parâmetros ambientais, como temperatura, umidade, tempo de luz, irrigação e VPD (Déficit de Pressão de Vapor).

No cultivo indoor, a principal dificuldade reside no controle constante das condições ambientais necessárias para o crescimento saudável das plantas. Problemas comuns incluem variações indesejadas de temperatura e umidade, iluminação inadequada e falta de monitoramento contínuo dos parâmetros vitais. Além disso, a complexidade e o custo dos sistemas disponíveis no mercado podem representar barreiras significativas para pequenos produtores e entusiastas do cultivo indoor.

Partindo desses problemas, este projeto formula as seguintes hipóteses: um sistema microcontrolado pode fornecer um controle ambiental mais consistente em comparação com métodos manuais ou semiautomatizados; a criação de uma interface intuitiva e acessível permitirá que usuários com diferentes níveis de conhecimento técnico possam configurar e monitorar o sistema eficientemente; e o desenvolvimento de um sistema de baixo custo, utilizando componentes acessíveis, pode tornar o cultivo indoor mais viável economicamente para pequenos produtores e entusiastas.

Romanini, Garcia, Alvarado *et al.* (2010) destacam que o cultivo indoor está se tornando cada vez mais popular devido à urbanização e à limitação de espaços externos para agricultura. Cultivar plantas dentro de ambientes controlados pode proporcionar uma solução sustentável para a produção de alimentos, ervas medicinais e plantas ornamentais em áreas urbanas.

Além disso, o controle ambiental é essencial para maximizar o rendimento e a qualidade das plantas cultivadas, o que pode ser significativamente aprimorado com o uso de tecnologias microcontroladas.

A pesquisa se justifica pela crescente demanda por sistemas que sejam ao mesmo tempo tecnicamente eficazes e economicamente acessíveis. Muitos dos sistemas disponíveis atualmente são caros e complexos, limitando seu uso a grandes produtores ou a entusiastas com recursos financeiros e técnicos avançados.

Desenvolver um sistema microcontrolado com interface amigável e de baixo custo pode democratizar o acesso a essa tecnologia, beneficiando um público mais amplo e incentivando práticas de cultivo sustentável.

Assim, este estudo não só contribuirá para o avanço tecnológico no campo do cultivo indoor, mas também promoverá práticas agrícolas mais eficientes e acessíveis, alinhando-se às necessidades contemporâneas de sustentabilidade e urbanização.

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema microcontrolado, capaz de controlar de forma eficaz um ambiente de cultivo interno para diversas culturas. Para isso, os objetivos específicos buscados são:

- Desenvolver uma interface para monitoramento das variáveis e configuração do sistema;
- Implementar um timer programável para controle de iluminação;
- Automatizar o controle de irrigação;
- Implementar o controle ajustável de temperatura e umidade.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Revisão histórica

Como destaca Ogata (2011), em qualquer campo tecnológico o controle automatizado é uma tendência dominante, ele está inserido em diversos campos de aplicação incluindo veículos espaciais, robótica, processos industriais, e qualquer outro processo que necessite de algum tipo de controle.

No século XVIII, com o avanço da revolução industrial surgiu o primeiro trabalho significativo envolvendo o controle automático da velocidade de uma máquina a vapor, desenvolvido por James Watt. Já no século XX importantes trabalhos contribuíram para o desenvolvimento da teoria de controle, vale citar o método desenvolvido por Ziegler e Nichols, em 1940, onde foram criadas regras que permitem a obtenção de parâmetros de um controlador P, PI, ou PID sem a necessidade do conhecimento da função transferência do sistema a ser controlado (Ogata, 2011).

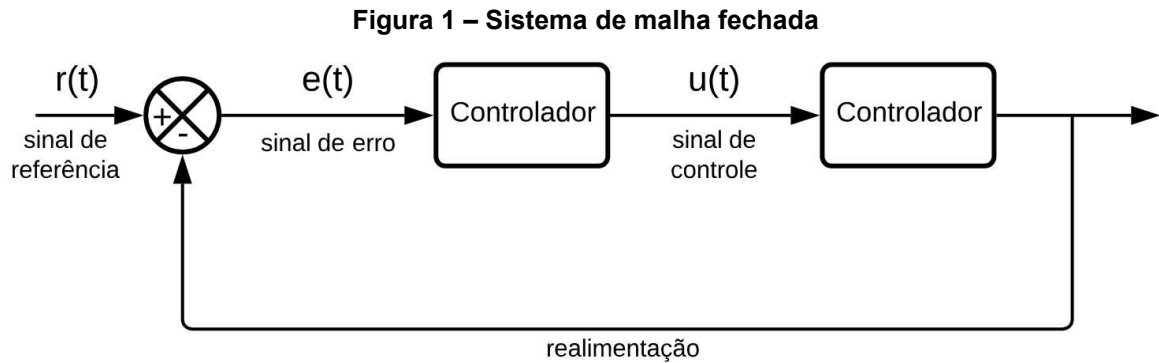
2.2 Controle de malha aberta e malha fechada

Ogata (2011) argumenta que, sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que a saída não exerce nenhum controle no sistema, a variável de saída não é medida nem relacionada com a entrada, ou seja, não possui realimentação. Dessa forma, a saída depende apenas de um ponto fixo de operação, como por exemplo tomar uma ação em determinado tempo. Já em sistemas de controle de malha fechada estabelecem o erro, uma diferença entre a saída medida e a entrada, essa informação realimenta o controlador de modo a minimizar o erro e alcançar o valor de saída desejado.

O uso de controle de malha aberta é favorável em sistemas que não estão sujeitos a perturbações e a entrada é conhecida. Por outro lado, sistemas sujeitos a distúrbios se beneficiam do controle de malha fechada em razão de possuírem realimentação constante que faz com que a resposta do sistema se ajuste ao valor determinado (Ogata, 2011).

A Figura 1 traz um exemplo de um sistema de controle de malha fechada, em que é possível observar que a saída $y(t)$ é realimentada até o bloco somador onde é comparada com a entrada $r(t)$ (chamado comumente de *setpoint*), o resultado disso é o sinal de erro $e(t)$ que é utilizado pelo controlador para determinar o sinal de controle

$u(t)$ que deve ser aplicado ao processo que resultará na saída $y(t)$ que será realimentada novamente a fim de minimizar o erro.

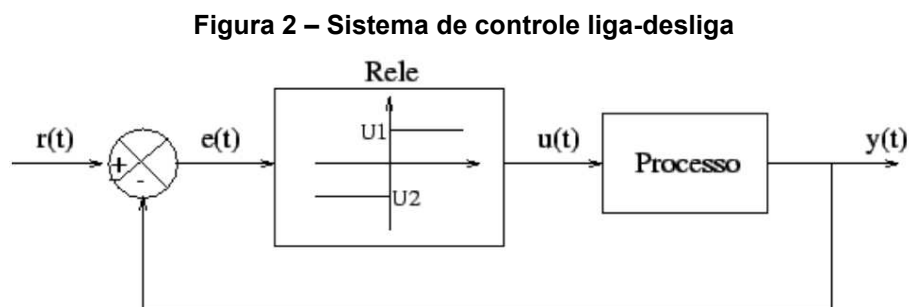


Fonte: Autoria própria (2025)

2.3 Controle on-off com histerese

De acordo com Bazanella e Da Silva Junior (2005), nesse tipo de abordagem o sinal controle pode obter apenas dois valores, ligado ou desligado, esse tipo de implementação pode ser feito com um relé para controle da saída. Vale destacar que essa forma de controle teria uma inconsistência no valor do set-point e na presença de ruído poderia causar chaveamentos não desejados.

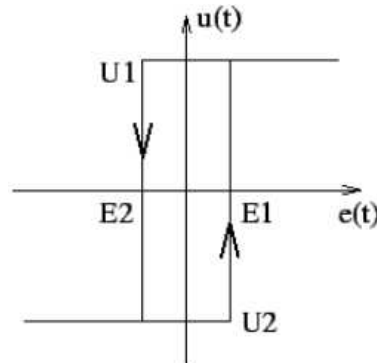
A Figura 2 apresenta um sistema de controle liga-desliga onde o sinal de controle $u(t)$ poderá assumir os valores $U1$ ou $U2$ dependendo do resultado do erro $e(t)$.



Fonte: Bazanella e Da Silva Junior (2005)

Uma forma de lidar com esse transtorno na prática é o uso do chamado controlador liga-desliga com histerese, desta maneira será determinado um valor de histerese que atrasará a ação do relé (Bazanella e Da Silva Junior, 2005). A Figura 3 apresenta o funcionamento da histerese.

Figura 3 – Histerese



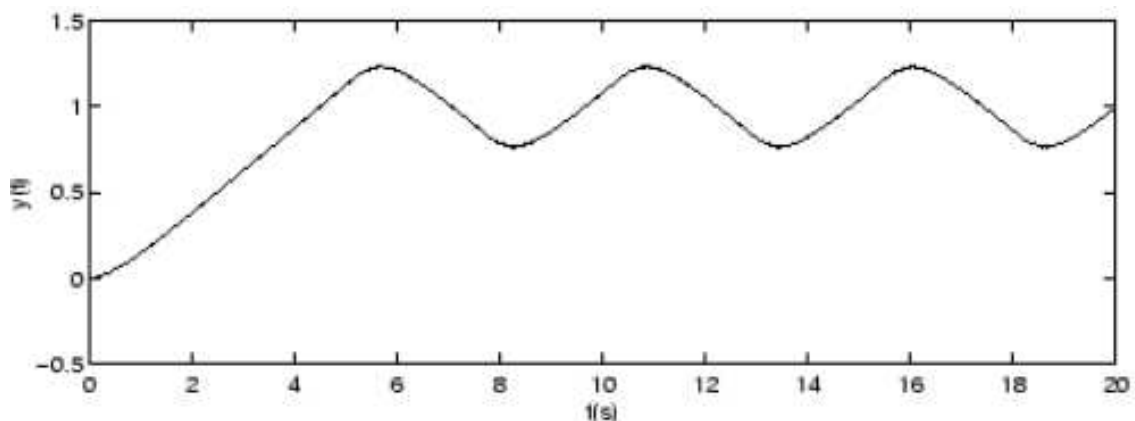
Fonte: Bazanella e Da Silva Junior (2005)

Após aplicar a histerese no controlador liga-desliga passa a ser necessário que $e(t)$ atinja um valor menor que $E2$ para que haja um chaveamento de $U2$, por sua vez, para que $U1$ seja chaveado faz-se necessário que o valor do erro exceda o valor de $E1$, para a determinação dos valores $E1$ e $E2$ é necessário o conhecimento da aplicação e dos componentes que serão utilizados (Bazanella e Da Silva Junior, 2005).

Bazanella e Da Silva Junior (2005) descreve que, a ação de controle liga-desliga com ou sem histerese é considerada a ação de controle de maior simplicidade de implementação e mais viável economicamente, esse tipo de controle pode ser utilizado em sistemas que não necessitam de tanta precisão e que não visam a eliminação total do erro.

A Figura 4 mostra a curva de resposta em malha fechada para um sistema de controle liga-desliga com histerese, nota-se que o valor da saída oscila em torno da referência, entre o limite superior e inferior da histerese.

Figura 4 – Sinal de saída de um sistema com controle on-off e histerese



Fonte: Bazanella e Da Silva Junior (2005)

2.4 Variáveis ambientais

2.4.1 Temperatura e umidade relativa do ar

Liliane e Charles (2020) afirmam que, dentre os aspectos de um cultivo, temperatura e umidade relativa são dois dos fatores determinantes no sucesso de qualquer horto-cultura, pois influenciam processos vitais da planta como a transpiração, taxa de fotossíntese e absorção de nutrientes. Variações extremas dessas grandezas causarão impactos negativos, incluindo estresse, propensão a pragas e conseqüentemente a morte da planta. Portanto, faz-se crucial o monitoramento e controle efetivo dessas duas variáveis.

Em um ambiente de cultivo externo, como uma horta, o controle climático é praticamente impossível. Já um cultivo interno possibilita a criação de um ambiente mais isolado, e por conseqüência, permite o controle de ambos os aspectos com mais facilidade, visto que estará menos suscetível a perturbações externas, como calor, irradiação solar e chuvas (Ampim, Obeng e Olvera-Gonzales, 2022).

Nos diversos processos que requerem medição de temperatura e umidade diferentes tipos de sensores ou módulos são utilizados, as características destes dispositivos de medição variam de acordo com cada projeto, levando em conta faixas de medição, precisão, robustez, dificuldade de implementação, orçamento e tipos de comunicação como afirmado por Javaid, Haleem, Rab *et al.* (2021).

Sensores de temperatura resistivos, como termistores e detectores de temperatura por resistência (RTD), operam com base na variação da resistência elétrica de um material em função da temperatura. Termistores são geralmente feitos de materiais cerâmicos ou poliméricos e apresentam alta precisão em uma faixa de temperatura limitada, enquanto RTD's são fabricados com metais puros, oferecendo utilidade em uma faixa mais ampla, porém com precisão relativa menor. Ambos podem ser utilizados com entradas analógicas padrão devido à sua linearidade, diferentemente dos termopares, que necessitam de condicionamento especial para linearização do sinal (Lamb, 2013).

Módulos de sensores de baixo custo são muito utilizados nos desenvolvimentos de automações com microcontroladores devido à facilidade de acesso, boas faixas de medição para aplicações semelhantes à proposta, uma boa precisão e ao fato da não dependência de conexão a um conversor analógico-digital.

Para a medição das variáveis ambientais geralmente são utilizados modelos LM35, DHT11, DHT22, BMP180 e BME280 (Rocha, Da Silva e Costa, 2019).

No trabalho citado anteriormente foi desenvolvido um sistema para medição de fatores climáticos visando a obtenção de uma base de dados e a aplicação de métodos matemáticos para a análise de precisão dos modelos dos sensores citados. O estudo demonstrou que dentre eles o BME280 apresentou maior precisão, tanto na medição de temperatura quanto de umidade em um período de três meses de dados coletados.

De acordo com Bosch Sensortec (2024), o BME280 é um sensor digital que integra em um único encapsulamento sensores de temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica. Seu princípio de funcionamento baseia-se na variação de propriedades elétricas internas, como resistência e capacitância em resposta às grandezas físicas medidas, permitindo a conversão direta dos sinais em valores digitais processáveis pelo microcontrolador.

Conforme descrito no datasheet disponibilizado pela Bosch Sensortec (2024), a comunicação com o microcontrolador é realizada por meio dos protocolos I²C ou SPI, ambos suportados pelo dispositivo. Essa flexibilidade de interface facilita a integração em sistemas embarcados e reduz o número de conexões necessárias entre os módulos, otimizando o uso de pinos do microcontrolador.

O sensor opera com tensão de alimentação de 3,3 V, apresenta baixo consumo de energia e oferece alta precisão nas medições: cerca de $\pm 0,5$ °C para temperatura, $\pm 3\%$ para umidade relativa e ± 1 hPa para pressão atmosférica (Bosch Sensortec, 2024).

2.4.2 Umidade do solo

Solo é um composto formado por matéria orgânica, minerais, organismos vivos, água e gases. A água se comporta de duas formas durante o processo de percolação: parte dela é absorvida pelas partículas minerais do solo e será utilizada para manutenção da vida do mesmo; outra parte fica disponível para absorção da planta pelas raízes. A parte mineral do solo pode ser muito diversificada e, dependendo de suas características, a absorção de água pelos compostos minerais pode variar, alterando a quantidade de água disponível para as plantas (Kashyap e Kumar, 2021).

Kashyap e Kumar (2021) também afirmam que a agricultura de precisão contribuiu para estabelecer metas em relação ao desenvolvimento de tecnologias de medição da umidade do solo. Manter a disponibilidade ideal de água é essencial para processos biológicos como ciclos de nutrientes, sustentabilidade da biodiversidade do solo e também processos de desenvolvimento das plantas, tal como germinação, transpiração, fotossíntese e crescimento.

Existem fundamentalmente dois métodos de determinação da umidade do solo: os diretos, onde amostras do solo são examinadas em laboratório, e os indiretos, que se baseiam em propriedades físicas e químicas do solo estritamente ligadas a quantidade de água nele, como resistência, capacitância e tensão (Bruske, 2013).

Silva (2009) aponta a importância da aplicação de sensores para a obtenção de dados como a umidade do solo para tomada de decisões eficientes em cultivos, destacando também aplicações de automação e sistemas eletrônicos onde a informação deve estar disponível em tempo real para que o sistema.

Os dispositivos de medição com maior precisão disponíveis são acompanhados pelo custo elevado. Alguns módulos de sensores de baixo custo disponíveis no mercado, como os sensores resistivos HL-69 e HD-38, apresentam características favoráveis para aplicações semelhantes a proposta, visando a redução de custos, facilidade de implementação e utilização e boa precisão (Borges, 2024).

Em um trabalho recente realizado por Borges (2024), foi desenvolvido um sistema para medição da umidade do solo para a análise de precisão dos modelos dos sensores citados, o estudo demonstrou que ambos são de fácil implementação e possuem boa precisão nas medições.

2.5 Interface para o usuário

Como afirma Lamb (2013), operadores devem interagir com as máquinas para que seja possível ativar dispositivos ou processos e obter informações de funcionamento. Conforme o avanço tecnológico esses sistemas de interação deixaram de ser feitos com botões, interruptores e lâmpadas e passaram a ter displays com textos e gráficos que informam o estado atual das máquinas, até interfaces mais avançadas que permitem entradas de dados e interações mais complexas.

A interface com o operador é composta por componentes físicos (hardware) e lógicos (software), permitindo ao usuário visualização de dados e sinais do sistema assim como o controle de saídas.

Também sustenta que a mesma deve ser projetada para que o usuário possa inserir de forma simples os parâmetros desejados como entrada, permitindo que o sistema produza os resultados esperados. Em seguida, a interface deve fornecer apenas as informações necessárias para monitoramento eficiente do sistema (Lamb, 2013).

Lamb (2013) esclarece que interfaces podem ser baseadas em texto, simplesmente fornecendo instruções ou mostrando informações do processo para o operador. Elas podem ou não incluir botões para entrada de dados.

2.5.1 Display *OLED*

O SSD1306, desenvolvido pela *Solomon Systech Limited* (2008), é um controlador gráfico para displays *OLED* de matriz 128×64 pontos, amplamente utilizado em sistemas embarcados. O circuito integra as funções de driver e controlador, permitindo o gerenciamento direto dos segmentos e linhas da matriz de diodos orgânicos emissores de luz. Sua arquitetura interna inclui memória gráfica (GDDRAM) dedicada para armazenamento do conteúdo exibido, além de circuitos de temporização, controle de contraste e geração de sinais de varredura.

O dispositivo suporta múltiplos modos de comunicação, incluindo interfaces paralelas de 8 bits e interfaces seriais SPI e I²C, o que facilita sua integração com diferentes microcontroladores e reduz o número de conexões físicas necessárias. O controlador também oferece baixo consumo de energia e opera tipicamente com tensão de alimentação de 3,3 V.

2.5.2 *Encoder* incremental

Os *encoders* são dispositivos transdutores utilizados para detectar posição ou orientação, convertendo o movimento mecânico em sinais elétricos que podem ser interpretados por sistemas de controle. Esses sensores são amplamente aplicados em sistemas que requerem referência de posição ou realimentação ativa para o controle de movimento de motores e atuadores (Lamb, 2013).

Existem diferentes classificações de *encoders* conforme sua forma construtiva e princípio de funcionamento. De acordo com o tipo de movimento medido, podem ser rotativos ou lineares; quanto ao método de detecção, podem ser ópticos ou magnéticos; e conforme o tipo de sinal gerado, podem ser analógicos ou digitais.

Lamb (2013) também afirma que nos *encoders* ópticos rotativos, um disco metálico ou de vidro com ranhuras ou perfurações é acoplado ao eixo de rotação. Um emissor de luz (LED) e um sensor óptico são posicionados de modo que, ao girar, o disco interrompa periodicamente o feixe luminoso, gerando uma sequência de pulsos correspondente à movimentação angular do eixo.

Entre os tipos de *encoders* rotativos, o incremental é amplamente utilizado por sua simplicidade e precisão na medição de deslocamentos relativos. Ele gera um conjunto de sinais digitais conhecidos como canais A e B, que são defasados em 90° elétricos entre si. Essa defasagem entre os pulsos A e B é conhecida como quadratura e permite identificar não apenas o deslocamento angular, mas também a direção de rotação do eixo (Lamb, 2013).

Segundo JOY-IT (2017) o módulo KY-040 é um *encoder* rotativo de tipo incremental, projetado para converter o movimento giratório de um eixo em sinais digitais que indicam tanto a direção quanto a quantidade de movimento. Ele opera tipicamente com tensão de alimentação entre 3,3 V e 5 V e inclui duas saídas principais (CLK e DT) que produzem pulsos em quadratura. Além disso, o módulo incorpora um botão de pressão no eixo, proporcionando uma função adicional de entrada do usuário.

2.6 Relés

Como afirma Lamb (2013), os relés são dispositivos utilizados para realizar a comutação elétrica de circuitos por meio de um sinal de controle, permitindo o acionamento de cargas de diferentes tensões ou correntes a partir de um mesmo sistema de comando. Existem diversos tipos de relés, entre eles os eletromecânicos e os de estado sólido, além de variações como os modelos de contato *reed* ou *mercury wetted*, todos projetados com o mesmo propósito: controlar um circuito por meio de outro ou permitir que um único sinal comande múltiplas saídas.

Os relés eletromecânicos operam a partir de uma bobina eletromagnética, responsável por mover mecanicamente um conjunto de contatos elétricos entre as posições aberta e fechada. Quando a bobina é energizada, o campo magnético gerado atrai uma armadura metálica, alterando o estado dos contatos e, conseqüentemente, permitindo ou interrompendo a passagem de corrente no circuito controlado (Lamb, 2013).

Lamb (2013) enfatiza que esses dispositivos podem ser acionados por tensão contínua (DC) ou alternada (AC), característica que depende da especificação do modelo e da aplicação. Entre os principais parâmetros de um relé estão a tensão de acionamento da bobina, o número de polos e a corrente máxima suportada pelos contatos. Os contatos são classificados como normalmente abertos (NO) ou normalmente fechados (NC), conforme sua condição quando o relé está desenergizado. Alguns modelos possuem múltiplos polos com combinações de contatos NO e NC, permitindo o controle simultâneo de vários circuitos a partir de um único sinal de comando.

2.7 Microcontroladores

Os microcontroladores são sistemas computacionais incorporados a dispositivos eletrônicos que não se caracterizam como computadores convencionais. Segundo Tanenbaum (2006), esses sistemas embarcados têm a função de gerenciar o funcionamento dos equipamentos e de manipular as interfaces de usuário, atuando como o núcleo de controle de inúmeros dispositivos.

Esses dispositivos integram em um único chip todos os elementos essenciais de um computador, como unidade de processamento, memória e interfaces de entrada e saída, o que lhes permite executar tarefas de controle e tomada de decisão em tempo real (Tanenbaum, 2006). Essa característica explica sua ampla utilização em produtos de uso cotidiano, como eletrodomésticos, sistemas automotivos, equipamentos médicos, dispositivos de comunicação e brinquedos eletrônicos.

De acordo com Tanenbaum (2006), a variedade de microcontroladores disponíveis no mercado é resultado das diferentes combinações de capacidade de processamento, memória e periféricos. Essa flexibilidade permite sua aplicação tanto em sistemas simples, como o controle de iluminação, quanto em sistemas complexos, como veículos modernos e aeronaves, que podem conter dezenas ou até centenas de microcontroladores operando de forma distribuída.

Outro aspecto importante destacado por Tanenbaum (2006) é que a maioria desses sistemas opera em tempo real, devendo responder imediatamente a estímulos externos, como o acionamento de sensores ou botões. Além disso, os microcontroladores são desenvolvidos levando em consideração restrições físicas e elétricas, como tamanho, peso e consumo de energia, o que os torna adequados para aplicações compactas e de baixo custo.

Por fim, uma aplicação particularmente relevante da tecnologia de microcontroladores é a plataforma Arduino, desenvolvida por Massimo Banzi e David Cuartielles, que tornou os sistemas embarcados acessíveis e amplamente difundidos. Essa plataforma aberta combina hardware de baixo custo e uma linguagem de programação simplificada, possibilitando o aprendizado e a prototipagem rápida em ambientes educacionais e de pesquisa (Tanenbaum, 2006).

2.7.1 STM32F103C8T6

O STM32F103C8T6 pertence à família STM32F1, desenvolvida pela STMicroelectronics, e integra um núcleo ARM Cortex-M3 operando a até 72 MHz. Possui 64 kB de memória Flash para armazenamento de código e 20 kB de SRAM para dados voláteis. Trabalha com tensão de alimentação entre 2,0 V e 3,6 V, oferecendo bom equilíbrio entre desempenho e baixo consumo de energia (STMicroelectronics, 2025).

2.7.1.1 Analog-to-Digital Converter (ADC)

Segundo Miyadaira (2021), quando há necessidade do monitoramento de grandezas físicas, como temperatura e umidade são utilizados dispositivos que fazem a conversão dos sinais medidos na forma analógica para digital, comumente conhecidos como ADC's. O conversor A/D utiliza uma faixa de tensão de referência para transformar um sinal analógico em um valor binário de n bits que depende da resolução do conversor.

O STM32F103C8T6 dispõe de dois conversores A/D independentes de 12 bits, cada um com até 16 canais multiplexados. O ADC permite medições com taxa de amostragem de até 1 MSPS (mega amostra por segundo), podendo operar em modo contínuo, varredura sequencial de canais ou conversão única (STMicroelectronics, 2025).

2.7.1.2 Inter-Integrated Circuit (I²C)

De acordo com Miyadaira (2021) a interface I²C foi desenvolvida para simplificar a comunicação entre CI's por meio de uma interface síncrona do tipo *Multi-Master*, nessa arquitetura a troca de informações ocorre através de duas linhas de dados em um barramento: uma bidirecional (SDA); e um sinal de *clock* (SCL).

É necessário o uso de resistores de *pull-up* entre as linhas de comunicação e a alimentação, já que os pinos de saída dos dispositivos conectados ao barramento são do tipo dreno-aberto.

Existem duas principais condições para início e fim da comunicação: a condição *START* é atendida quando uma borda de descida é imposta sobre a linha SDA enquanto a linha SCL está em nível alto; a condição *STOP* ocorre quando é aplicada uma borda de subida na linha SDA enquanto a linha SCL está em nível alto (Miyadaira, 2021).

O microcontrolador implementa até duas interfaces I²C compatíveis com o padrão Philips®, permitindo comunicação síncrona bidirecional com periféricos externos. Cada interface suporta modos padrão (100 kHz) e rápido (400 kHz), além de endereçamento de 7 ou 10 bits (STMicroelectronics, 2025).

De acordo com o manual do STM32F103C8T6 fornecido pela STMicroelectronics (2025) o controlador I²C integrado possui detecção automática de *START* e *STOP*, controle de retransmissão e verificação de erro de transmissão, garantindo confiabilidade nas trocas de dados.

2.7.1.3 Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter (USART)

Conforme descrito por Miyadaira (2021), a UART é um periférico responsável por realizar a conversão entre dados paralelos e seriais, permitindo a comunicação entre dispositivos digitais de forma assíncrona. Essa interface é amplamente utilizada em conjunto com o padrão RS-232, que define a comunicação serial entre equipamentos de terminal de dados (DTE) e equipamentos de comunicação (DCE), como computadores e periféricos.

A comunicação RS-232 pode operar com ou sem controle de fluxo. No modo sem controle de fluxo, utiliza-se apenas as linhas TxD (transmissão), RxD (recepção) e GND (referência), sendo uma configuração simples e comumente empregada em sistemas embarcados. Já no modo com controle de fluxo, sinais adicionais como RTS, CTS, DSR e DTR são utilizados para coordenar a troca de dados, prevenindo perdas de informação quando o receptor está ocupado (Miyadaira, 2021).

Segundo Miyadaira (2021), a transmissão de dados via RS-232 é assíncrona e estruturada em quadros compostos por um bit de *start*, oito bits de dados, bit de paridade opcional e um ou mais bits de *stop*.

O STM32F103C8T6 possui até três interfaces USART/UART, capazes de operar em comunicação *full-duplex* ou *half-duplex*. São compatíveis com padrões de comunicação assíncrona e síncrona, com suporte a velocidades de até 4,5 Mbit/s (STMicroelectronics, 2025).

2.7.1.4 General-Purpose Input/Output (GPIO)

A documentação técnica da STMicroelectronics (2025) destaca que o microcontrolador disponibiliza até 37 pinos de entrada/saída de uso geral (GPIO's), organizados em portas de 16 bits (PORTA, PORTB e PORTC). Cada pino pode ser configurado individualmente como entrada, saída *push-pull*, saída *open-drain*, entrada com *pull-up/pull-down* interno ou função alternativa. Os GPIO's operam em nível lógico de 3,3 V, mas são tolerantes a 5 V em determinados pinos, o que amplia a compatibilidade com módulos externos.

2.7.1.5 Timer

Miyadaira (2021) afirma que timers são periféricos que podem ser configurados para operar como temporizadores, geralmente utilizados para determinar intervalos de tempo, ou contadores para determinar o número de ocorrência de eventos.

O STM32F103C8T6 dispõe de quatro temporizadores gerais (TIM2 a TIM5) e dois básicos (TIM6 e TIM7), além de temporizadores dedicados ao controle PWM (STMicroelectronics, 2025). Esses periféricos podem operar como contadores ascendentes, descendentes ou em modo de captura e comparação. Também são capazes de lidar com sinais em quadratura de *encoders* incrementais.

2.7.1.6 Real-Time Clock (RTC)

O *Real-Time Clock* integrado permite a contagem precisa de tempo e data, mesmo quando o microcontrolador está em modo de baixo consumo. Ele pode ser alimentado por uma bateria externa conectada ao pino VBAT, garantindo o funcionamento contínuo durante desligamentos da alimentação principal (STMicroelectronics, 2025).

Conforme especificado pela STMicroelectronics (2025) o RTC utiliza contadores internos para manter a contagem de tempo e data, podendo gerar

interrupções periódicas ou de alarme conforme configurado pelo *firmware*. Seu funcionamento é baseado em um oscilador de baixa frequência (32,768 kHz), que pode ser proveniente de cristal externo, ressonador, oscilador interno de baixa potência ou do *clock* principal dividido internamente. Além disso, o módulo possui recursos de calibração e *prescaler* programável, permitindo ajustar a precisão temporal e gerar uma base de tempo de 1 segundo a partir do sinal de referência.

2.7.1.7 SysTick Timer

O *SysTick* é um temporizador de 24 bits integrado ao núcleo ARM Cortex-M3, projetado para gerar interrupções em intervalos regulares. Ele é amplamente utilizado para criação de temporizações no sistema operacional embarcado (RTOS) ou para implementação de rotinas periódicas não bloqueantes (Miyadaira, 2021).

No contexto das bibliotecas HAL (*Hardware Abstraction Layer*), o *SysTick* é usado pela função *HAL_GetTick()*, que fornece a base de tempo em milissegundos para o controle das rotinas de software.

2.8 Controladores disponíveis no mercado

O aumento e a disseminação do cultivo indoor têm gerado uma demanda crescente pelo avanço e integração de novas tecnologias, visando um controle mais eficaz e um monitoramento mais preciso dos ambientes de cultivo. Atualmente, dentro do Brasil infelizmente estes produtos são de difícil acesso e custo elevado, mas internacionalmente existe uma ampla gama de controladores disponíveis no mercado, projetados especificamente para regular as variáveis ambientais dentro de estufas. Além disso, existem controladores adaptáveis a essas necessidades específicas, mesmo que originalmente desenvolvidos para outras aplicações.

2.8.1 Controlador Vivosun *GrowHub* E42A

O controlador *GrowHub*, é um dispositivo que faz o controle de ventilação, umidade, tempo e espectro de luz, oferecendo uma solução excelente para automação de cultivos. Sua interface em *Liquid Crystal Display* (LCD) permite, além do monitoramento, a visualização e configuração diretamente no dispositivo ou através de aplicativo no celular.

Além disso, o controlador mostrado na Figura 5 oferece um sistema de comunicação eficiente e uma integração perfeita com equipamentos como exaustores, ventiladores, painéis de iluminação, todos produzidos pela mesma marca.

Figura 5 – Controlador *GrowHub E42A*



Fonte: Vivosun (2024)

2.8.2 Controlador *TroIMaster Hydro-X HCS-1*

O controlador HCS-1 é o dispositivo mais básico da linha de controladores Hydro-X, capaz de controlar até 512 luzes, 4 dispositivos de temperatura, 2 de umidade, 2 de CO2 e 9 dispositivos pré-programados, oferece uma flexibilidade excelente para a personalização de sistemas de cultivo além da possibilidade de controle de cultivos de larga escala.

O sistema também se destaca pela facilidade de uso, com um display LCD para configuração e monitoramento, como mostra a Figura 6, além da conectividade que permite o monitoramento e controle remoto através de um aplicativo para smartphones.

Existem também modelos de dispositivos da mesma empresa que permitem a conexão de mais dispositivos assim como o controle de sistemas maiores.

Figura 6 – Controlador *Hydro-X HCS-1*



Fonte: TroIMaster (2024)

Apesar das funcionalidades avançadas e da confiabilidade dos sistemas apresentados acima, seu alto custo e a dependência de ecossistemas proprietários acabam limitando o acesso a essa tecnologia, especialmente para pequenos produtores e projetos de menor escala. Essa barreira reforça a importância do desenvolvimento de soluções abertas e de baixo custo, como a proposta apresentada neste trabalho.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

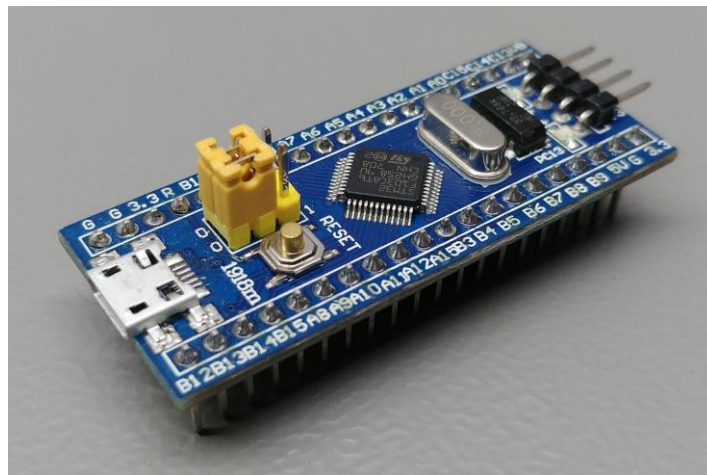
O objeto de estudo é um dispositivo que, quando acoplado a uma estufa, permite o controle geral dos parâmetros internos ao sistema de cultivo, como temperatura, umidade, iluminação e irrigação. O controlador foi desenvolvido com o objetivo de facilitar o controle das variáveis ambientais dentro de faixas de valores adequadas.

Neste trabalho, foi realizada a construção e programação do sistema, explorando princípios de eletrônica, sensores e atuadores, assim como técnicas de programação para alcançar um sistema funcional.

3.1 Topologia física

Esta seção apresenta o desenvolvimento do hardware do sistema, detalhando a alimentação, filtragem e interconexões elétricas entre os módulos que o compõem. O projeto é baseado no microcontrolador STM32F103C8T6, desenvolvido pela STMicroelectronics, montado em uma placa conhecida como “Blue Pill”, exibida na , que atua como núcleo de processamento, realizando o gerenciamento das entradas e saídas conforme o *firmware* desenvolvido.

Figura 7 – Cartão eletrônico *Blue Pill*



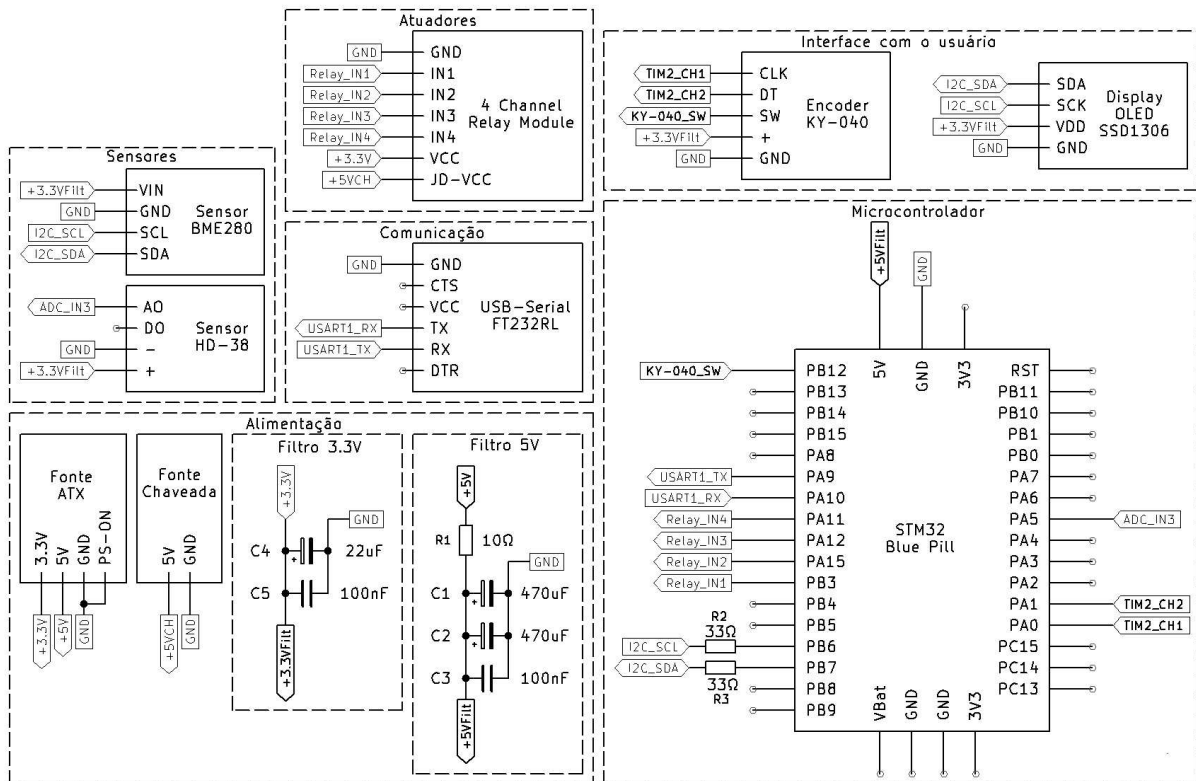
Fonte: STM32-base (2025)

3.1.1 Dispositivos e interconexões

O sistema proposto é composto por diversos módulos eletrônicos integrados ao microcontrolador principal, cada um desempenhando uma função específica dentro da arquitetura geral. A Figura 8, apresentada a seguir, ilustra o esquema elétrico de

conexão entre os módulos, destacando as principais linhas de alimentação e sinais de controle. Os dispositivos e componentes utilizados foram selecionados com base nas características apresentadas no capítulo de Revisão da Literatura, levando em consideração fatores como custo, disponibilidade, facilidade de integração e adequação às necessidades do sistema desenvolvido.

Figura 8 – Esquemático do sistema



Fonte: Autoria própria (2025)

3.1.1.1 Sensor BME280

O sensor BME280, evidenciado na Figura 9 é responsável pela medição de temperatura e umidade relativa do ar, variáveis utilizadas no controle climático da estufa.

Figura 9 – Sensor BME280



Fonte: Bosch (2024)

Sua comunicação com o microcontrolador ocorre através do cartão eletrônico exibido na Figura 10, por meio do protocolo I²C, permitindo a aquisição dos dados ambientais.

Figura 10 – Módulo sensor BME280



Fonte: Smarkits (2024)

3.1.1.2 Sensor HD-38

Na Figura 11 é possível observar o sensor HD-38 e o módulo de comunicação que é empregado na medição da umidade do solo, parâmetro fundamental para o controle automático do sistema de irrigação. O sensor fornece uma saída analógica proporcional à condutividade elétrica entre suas sondas, possibilitando a leitura direta pelo conversor A/D do microcontrolador.

Figura 11 – Sensor HD-38 e módulo de comunicação

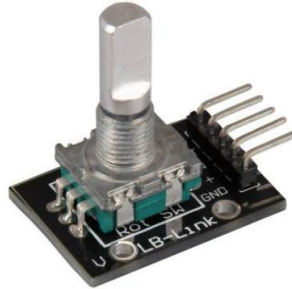


Fonte: Usinainfo (2024)

3.1.1.3 Encoder rotativo KY-040

A Figura 12 ilustra o *encoder* rotativo KY-040 atua como interface de entrada do usuário, permitindo a navegação entre os menus e o ajuste dos parâmetros de controle do sistema. O dispositivo gera sinais digitais de quadratura, que são lidos pelo timer, e possui um botão de clique integrado, sendo conectado às entradas GPIO do microcontrolador.

Figura 12 – Encoder rotativo KY-040



Fonte: Joy-it (2017)

3.1.1.4 Display OLED SSD1306

A Figura 13 mostra o display OLED SSD1306 que é utilizado como interface de saída visual, exibe as variáveis medidas pelos sensores e permite que o usuário realize as configurações do sistema. Sua comunicação com o microcontrolador ocorre também via barramento I²C.

Figura 13 – Display OLED SSD1306



Fonte: Eletrogate (2024)

3.1.1.5 Módulo de relés com quatro canais

O módulo de relés apresentado na Figura 14 possui quatro canais independentes e é responsável pelo acionamento dos dispositivos de saída, como o exaustor, o umidificador, a bomba de irrigação e o sistema de iluminação. Cada canal é isolado eletricamente, garantindo a comutação segura das cargas a partir dos sinais de controle do microcontrolador.

Figura 14 – Módulo de relés com quatro canais



Fonte: Eletrogate (2024)

3.1.1.6 Conversor USB-Serial FT232RL

Na Figura 15 é mostrado o módulo conversor USB–Serial FT232RL que realiza a comunicação com o computador através da UART do microcontrolador, permitindo a transmissão de dados em tempo real (FTDI, 2020).

Essa interface possibilita a coleta, o registro e a análise das informações por meio de um script desenvolvido em Python, utilizado para validação do controle e acompanhamento das variáveis durante os testes.

Figura 15 – Módulo conversor USB-Serial FT232RL



Fonte: MakerHero (2025)

3.1.2 Sistema de alimentação e filtragem

A alimentação do sistema utiliza uma fonte ATX (*Advanced Technology eXtended*) como unidade principal, responsável por fornecer as tensões de 5 V e 3,3 V necessárias aos diferentes módulos do projeto. A linha de 5 V alimenta diretamente o STM32, sendo aplicada uma etapa de filtragem passiva composta por um resistor de 10 Ω em série, seguido por dois capacitores eletrolíticos de 470 μF e um capacitor cerâmico de 100 nF em paralelo. A configuração descrita atua como um filtro passa-baixa, reduzindo ruídos provenientes da fonte e das comutações dos relés, contribuindo para a estabilidade da alimentação do microcontrolador.

A tensão de 3,3 V é destinada à alimentação dos módulos periféricos, cada um contando com capacitores de desacoplamento de 100 nF (cerâmico) e 22 μ F (tântalo), posicionados próximos aos pinos de alimentação, de modo a garantir estabilidade e reduzir interferências de alta frequência. Embora o esquema elétrico apresente apenas um exemplo de filtragem, esse mesmo arranjo foi aplicado a todos os dispositivos alimentados por 3,3 V.

Além disso, uma fonte chaveada de 5 V foi empregada exclusivamente para a alimentação das bobinas dos relés, isolando a carga indutiva do circuito lógico e minimizando possíveis perturbações na linha principal do microcontrolador.

Por fim, para o barramento I²C, foram adicionados resistores de 33 Ω em série com os sinais SDA e SCL, com o objetivo de limitar correntes de pico e reduzir oscilações durante as transições lógicas, o que melhora a integridade do sinal e reduz a suscetibilidade a interferências externas.

3.2 Desenvolvimento do software embarcado

Esta seção apresenta o processo de desenvolvimento do firmware responsável pelo controle e integração dos módulos de hardware descritos anteriormente. O código embarcado foi elaborado de forma a garantir a aquisição dos dados dos sensores, o acionamento dos atuadores e a comunicação com o sistema de supervisão.

O *firmware* desenvolvido tem como objetivos principais a possibilitação do usuário escolher os valores de referência para os parâmetros de seu cultivo, a partir do momento da obtenção dos parâmetros o sistema desenvolvido deverá controlar e monitorar as variáveis.

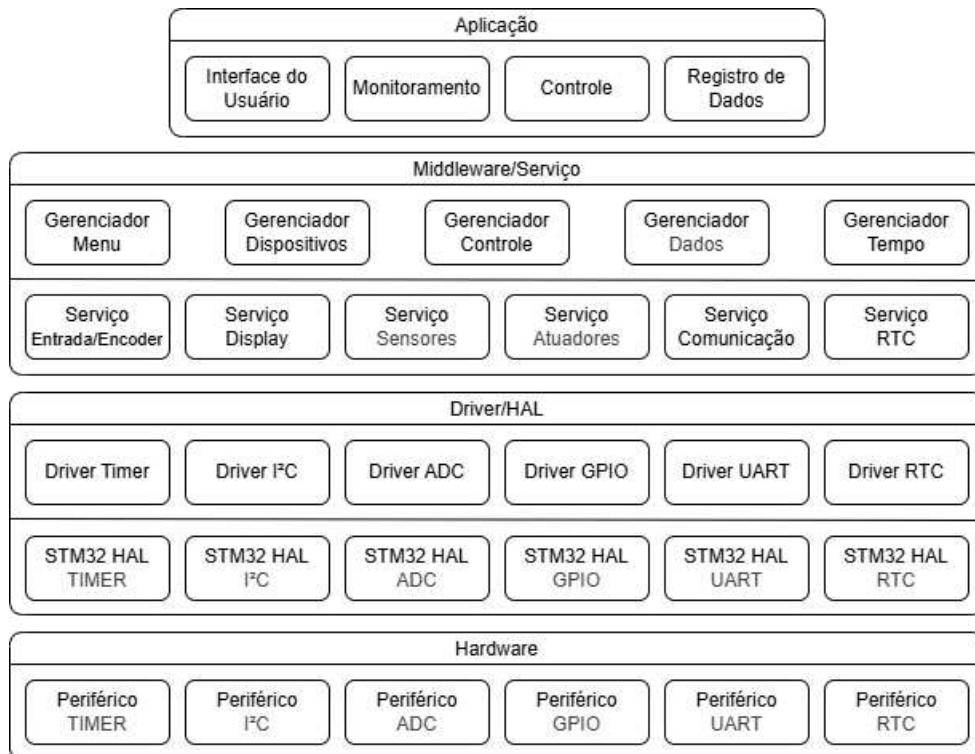
A linguagem de programação C foi empregada por sua portabilidade e ampla compatibilidade com os microcontroladores da família STM32. A implementação utilizou as bibliotecas HAL disponibilizadas pela ST, que simplificam o acesso aos periféricos e aceleram o processo de desenvolvimento, garantindo padronização e portabilidade entre diferentes dispositivos da mesma linha.

3.2.1 Arquitetura do sistema

A arquitetura do sistema foi desenvolvida em quatro camadas hierárquicas: Hardware, *Driver*/HAL, *Middleware*/Serviço e Aplicação. Essa estrutura segue o

princípio de dependência unidirecional, no qual as camadas superiores utilizam apenas os serviços oferecidos pelas inferiores. Dessa forma, os detalhes de implementação permanecem encapsulados, o que aumenta a modularidade, a testabilidade e a facilidade de manutenção do sistema embarcado. A Figura 16 apresenta o diagrama de blocos correspondente à arquitetura proposta.

Figura 16 – Arquitetura do sistema



Fonte: Autoria própria (2025)

A camada de Hardware é responsável pelos componentes físicos do microcontrolador, incluindo os periféricos TIMER, I²C, ADC, GPIO, UART e RTC. Esses elementos realizam funções essenciais como comunicação, controle digital, conversão analógico-digital, temporização e manutenção do tempo real. Além disso, fornecem as características elétricas fundamentais do sistema, como *pull-ups*, latências e limites de corrente admissíveis.

Acima dela, a camada de *Driver*/HAL encapsula o acesso direto ao hardware, oferecendo uma interface estável e independente da plataforma. Essa camada realiza a inicialização, leitura e escrita dos periféricos por meio de API's padronizadas. Também é responsável por lidar com detalhes de temporização, modos de baixo consumo e mapeamento de pinos físicos, assegurando que as camadas superiores possam operar sem depender das particularidades do microcontrolador.

A camada de *Middleware*/Serviço implementa funcionalidades intermediárias e combina os serviços dos *drivers* em blocos de lógica mais elaborados. Nela estão os módulos Gerenciador de Menu, Gerenciador de Controle, Gerenciador de Dados, Serviço de Sensores, Serviço de Display, Serviço de Comunicação e Serviço de RTC. Esses componentes traduzem comandos de alto nível da aplicação em chamadas aos *drivers*, como a leitura de dados do sensor BME280. Também encapsulam políticas de operação, como *debounce*, filtragem e adaptação para chamadas assíncronas.

No topo da hierarquia encontra-se a camada de Aplicação, que contém a lógica principal do sistema. Ela é composta pelos módulos Interface do Usuário, Monitoramento, Controle e Registro de Dados. A aplicação utiliza apenas as API's fornecidas pelo *middleware*, sem acesso direto aos *drivers*, e é responsável por implementar os casos de uso do sistema, o gerenciamento e a transmissão de dados. O módulo Controle, por exemplo, utiliza informações do RTC tanto para associar *timestamps* às aquisições quanto para determinar períodos de iluminação automática.

O fluxo de execução do sistema segue a hierarquia de camadas. Quando a aplicação solicita uma leitura de sensor, o Serviço de Sensores no *middleware* faz a interface com o *Driver* I²C, que se comunica diretamente com o periférico do sensor. O resultado é retornado ao *middleware*, que valida e filtra os dados antes de disponibilizá-los à aplicação. Da mesma forma, ao realizar uma ação de controle, a aplicação chama o Gerenciador de Controle, que decide o acionamento do atuador e utiliza o Serviço de Atuadores, responsável por enviar o comando ao *Driver* GPIO que altera o estado físico do relé.

Cada camada define contratos e interfaces bem especificados, incluindo funções, pré-condições e códigos de erro. A padronização de estruturas de dados (*structs* de sensores e *enums* de estado) garante o desacoplamento entre módulos, permitindo substituição ou atualização de componentes sem afetar o restante do sistema. Essa abordagem também favorece a testabilidade e reutilização do código em outros projetos.

Do ponto de vista de boas práticas, a arquitetura adota a separação de responsabilidades para aumentar a coesão e facilitar testes unitários e manutenção. A inversão de dependência garante que os módulos de alto nível dependam de abstrações em vez de detalhes concretos de hardware, ampliando a portabilidade.

3.2.2 Recursos de hardware utilizados

Esta seção apresenta os principais periféricos e recursos internos do microcontrolador utilizados no desenvolvimento do sistema, descrevendo sua aplicação prática dentro da arquitetura do software embarcado proposto.

O conversor analógico-digital foi empregado na aquisição do sinal proveniente do sensor HD-38, responsável pela medição de temperatura e umidade do solo. O periférico realiza a conversão do sinal analógico em valores digitais, que são posteriormente processados pelo microcontrolador para exibição, controle e registro.

O barramento I²C foi utilizado para comunicação serial com os módulos BME280 e OLED. O BME280 fornece medidas de temperatura e umidade, enquanto o display OLED é empregado na exibição local das variáveis monitoradas e configurações do sistema. Essa interface permite a troca de dados utilizando apenas duas linhas (SDA e SCL), otimizando a utilização de pinos do microcontrolador.

A interface UART foi utilizada para comunicação serial entre o microcontrolador e o computador, por meio do conversor FT232RL. Essa conexão permite o recebimento de dados em tempo real, possibilitando o monitoramento e registro e das variáveis do sistema durante os testes.

As entradas e saídas digitais foram configuradas para o acionamento dos relés, responsáveis pelo controle de dispositivos externos, e para a leitura do clique do *encoder* rotativo KY-040, utilizado como interface de ajuste e navegação no menu.

O periférico Timer do microcontrolador foi configurado para operar no modo *encoder*, sendo utilizado na leitura do KY-040, que compõe a interface de usuário do sistema. Nesse modo de operação, o timer atua como um contador quadratura, interpretando os sinais provenientes dos canais A e B do dispositivo para determinar a direção e o sentido de rotação do eixo.

A configuração em modo *encoder* permite que o microcontrolador interprete as variações de pulso, dessa forma, cada incremento ou decremento gerado pelo movimento do dispositivo é automaticamente contabilizado pelo periférico.

O RTC interno do microcontrolador foi empregado para o controle de temporização e registro horário das medições, garantindo o registro cronológico correto dos dados adquiridos.

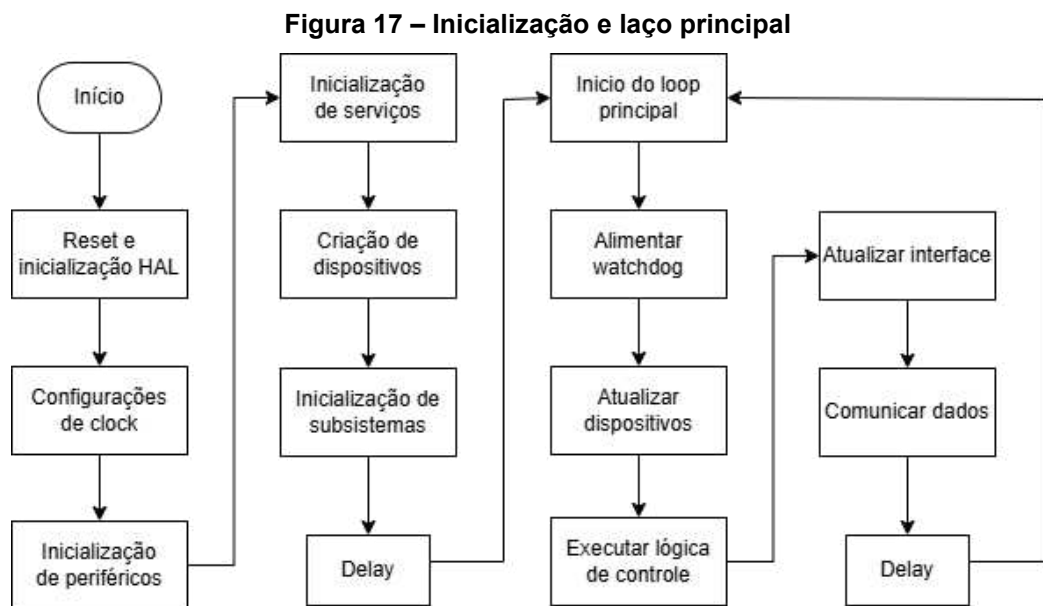
O controle de temporização das rotinas foi implementado utilizando a função *HAL_GetTick()* da biblioteca HAL da STMicroelectronics. Essa função retorna o tempo

em milissegundos desde a inicialização do sistema, utilizando a interrupção do *SysTick* Timer interno do microcontrolador.

Com base nesse contador, foram implementadas rotinas de controle não bloqueantes para leitura periódica de sensores, atualização do display e acionamento dos relés, sem a necessidade de funções de atraso como *HAL_Delay()*, que interrompem a execução global do programa.

3.2.3 Inicialização e laço principal

O fluxograma apresentado na Figura 17 descreve de forma clara a sequência de inicialização e operação cíclica do sistema embarcado.



Fonte: Autoria própria (2025)

Inicialmente, o microcontrolador realiza o *reset* e configura os parâmetros básicos de hardware, incluindo a definição de *clock* e a ativação dos periféricos essenciais. Em seguida, ocorre a preparação da camada de abstração de hardware, que garante o funcionamento correto dos dispositivos de entrada e saída.

Após essa fase, são iniciados os serviços e subsistemas que darão suporte à aplicação principal, como temporizadores, comunicação serial e módulos de aquisição de dados. A criação de dispositivos e a inicialização de subsistemas têm como objetivo estabelecer todas as interfaces necessárias antes do início do controle em tempo real.

No loop principal, o sistema entra em operação contínua, executando de forma cíclica as funções de monitoramento e controle. O *watchdog* é alimentado

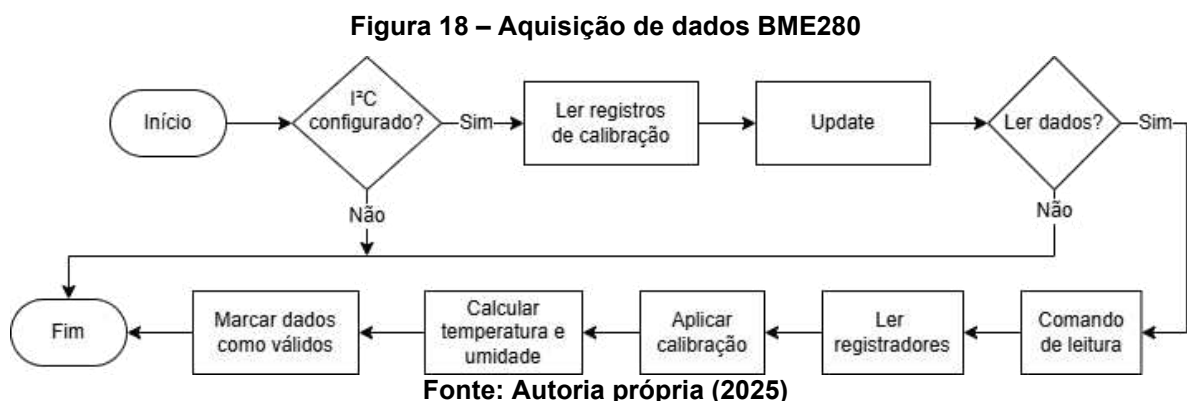
periodicamente para evitar travamentos, enquanto as rotinas de atualização de dispositivos e interface garantem que sensores, atuadores e o display estejam sincronizados com o estado atual do sistema. As funções de comunicação realizam a troca de dados com o computador, e a lógica de controle executa as ações de decisão com base nas leituras dos sensores. Pequenos atrasos (*delays*) são inseridos para temporização e estabilização do ciclo de execução.

3.2.4 Sensores e dispositivo de entrada

As rotinas associadas aos sensores e ao dispositivo de entrada são executadas diretamente no loop principal do *firmware*, o que significa que cada função é chamada a cada ciclo do sistema, sem a necessidade de estruturas de repetição internas. Dessa forma, cada rotina é iniciada, processada e finalizada dentro de um único ciclo, garantindo atualização contínua dos valores lidos e evitando bloqueios ou atrasos no fluxo geral de execução.

3.2.4.1 BME280

O fluxograma exibido na Figura 18 representa o processo de leitura e calibração do sensor de temperatura e umidade via interface I²C, descrevendo as etapas lógicas executadas pelo *firmware* para aquisição e validação dos dados medidos.



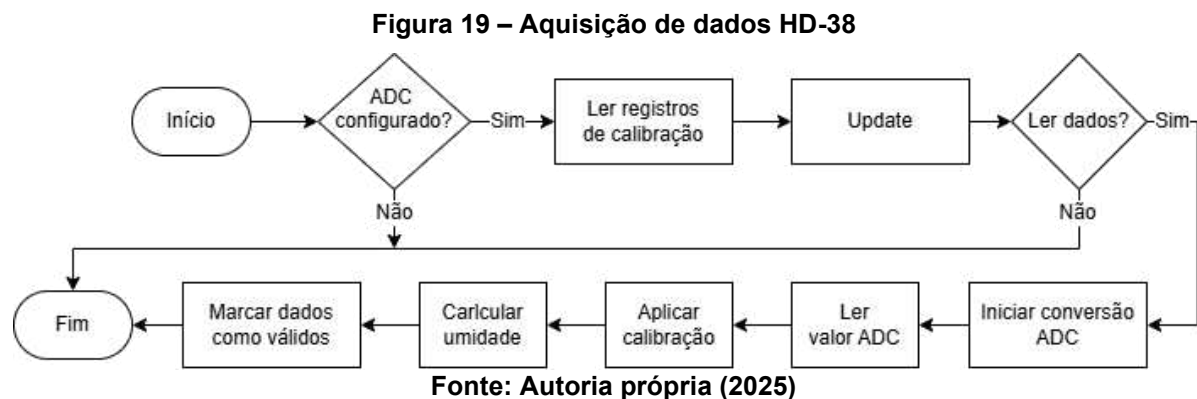
Inicialmente, o sistema realiza a verificação da configuração e conexão I²C para garantir a comunicação com o sensor. Em seguida, são efetuadas leituras dos registros de calibração, que contêm os coeficientes necessários para o cálculo das grandezas físicas. Após a leitura e o armazenamento desses parâmetros, o *firmware*

executa o comando de leitura principal, obtendo os registradores de dados brutos correspondentes às medições de temperatura e umidade.

Na sequência, o algoritmo aplica a calibração utilizando os coeficientes previamente obtidos, transformando os valores brutos em unidades físicas. Em seguida, são realizadas as operações de cálculo e atualização dos valores medidos, marcando os dados como válidos para uso pelas demais rotinas do sistema. O bloco decisório “Ler dados?” determina a frequência de atualização, caso novas medições sejam necessárias, o ciclo de leitura é reiniciado; caso contrário, o processo é encerrado até o próximo ciclo de amostragem.

3.2.4.2 HD-38

Como mostra a Figura 19, o fluxograma descreve o processo de aquisição e processamento de dados provenientes de um conversor analógico-digital, utilizado para medir e calcular a umidade a partir de um sinal analógico.



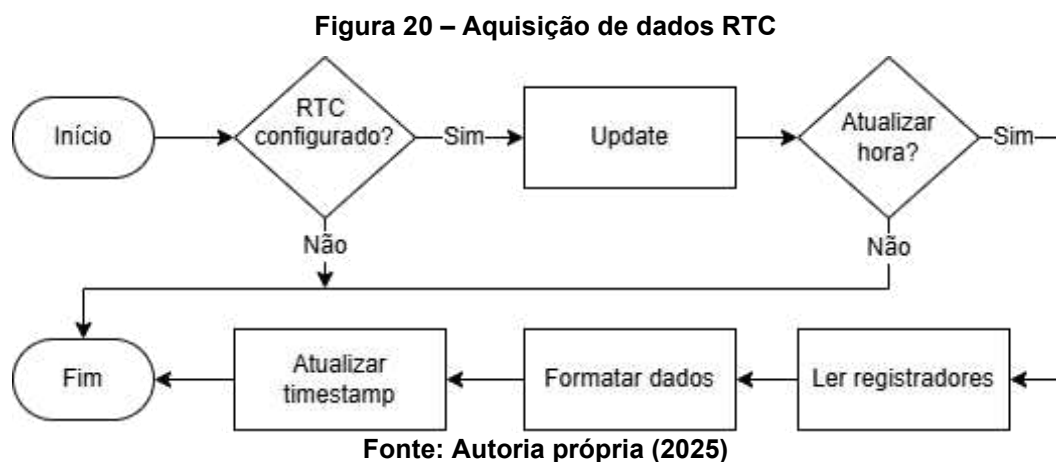
Inicialmente, o sistema verifica a configuração do ADC, assegurando que os parâmetros de amostragem, resolução e canal de entrada estejam corretamente definidos. Em seguida, é iniciada a conversão analógica-digital, que transforma o sinal analógico do sensor em um valor numérico. Após a conversão, o *firmware* lê o valor digitalizado e acessa os registros de calibração, que contêm coeficientes de correção específicos do sensor.

Na sequência, a calibração é aplicada ao valor obtido, compensando eventuais desvios de ganho ou *offset* do ADC para maior precisão nas medições. Após a atualização dos dados, o sistema marca os valores como válidos, tornando-os disponíveis para leitura por outras rotinas ou interfaces do sistema.

O bloco decisório “Ler dados?” controla o ciclo de aquisição, determinando se uma nova leitura deve ser realizada. Caso positivo, o processo se repete; caso contrário, o fluxo é encerrado até o próximo comando de atualização.

3.2.4.3 RTC

Na Figura 20, o fluxograma representa o processo de atualização e leitura do periférico RTC, responsável por manter e disponibilizar a informação temporal do sistema.



A rotina se inicia com a verificação do estado de configuração do RTC. Caso não configurado, o fluxo é interrompido até que essa etapa seja concluída. Quando o RTC está devidamente configurado, o sistema realiza a atualização dos parâmetros internos de tempo.

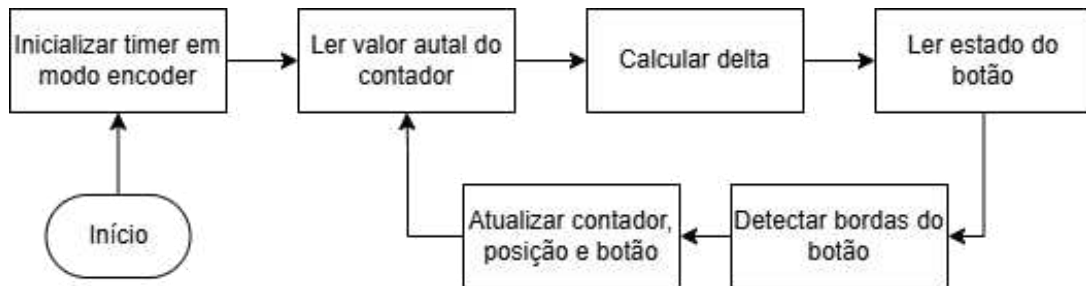
Em seguida, ocorre uma verificação para determinar se é necessário atualizar a hora. Caso essa atualização seja requisitada, o processo continua com a leitura dos registradores internos do RTC, de onde são extraídos os dados de horas, minutos e segundos atuais.

Após a leitura, o sistema formata os dados de acordo com o padrão utilizado na aplicação e, em seguida, ocorre a atualização do *timestamp*, etapa na qual a marca temporal é registrada para uso em *logs* e controle da iluminação.

3.2.4.4 Encoder rotativo

Na Figura 21, o fluxograma representa o processo de inicialização e leitura do *encoder* rotativo e do botão associado, cujo objetivo é converter os pulsos do sensor em informação de posição e eventos de atuação para o menu.

Figura 21 – Aquisição da rotação e clique do KY-040



Fonte: Autoria própria (2025)

A rotina inicia com a inicialização do timer em modo *encoder*, configurando o periférico para decodificar os sinais A/B do dispositivo. Esta etapa garante que a contagem quadratura seja realizada por hardware, reduzindo ruído e carga do processador, e que o registrador de contagem esteja pronto para leituras subsequentes.

Na sequência, o sistema lê o valor atual do contador do timer e calcula o delta em relação à leitura anterior. Esse delta representa a variação de pulsos desde a última amostragem.

Paralelamente, a rotina lê o estado do botão associado ao *encoder* e detecta bordas de transição (subida/descida) comparando o estado atual com o anterior. É importante aplicar *debounce* (tempo mínimo de estabilidade) para evitar detecções falsas devido ao rebote mecânico.

Por fim, o fluxo atualiza o contador/posição acumulada e o estado do botão: a posição é incrementada pelo delta calculado e as variáveis anteriores são atualizadas. Essa etapa também dispara eventos ou *flags* para o módulo de interface quando houver mudança.

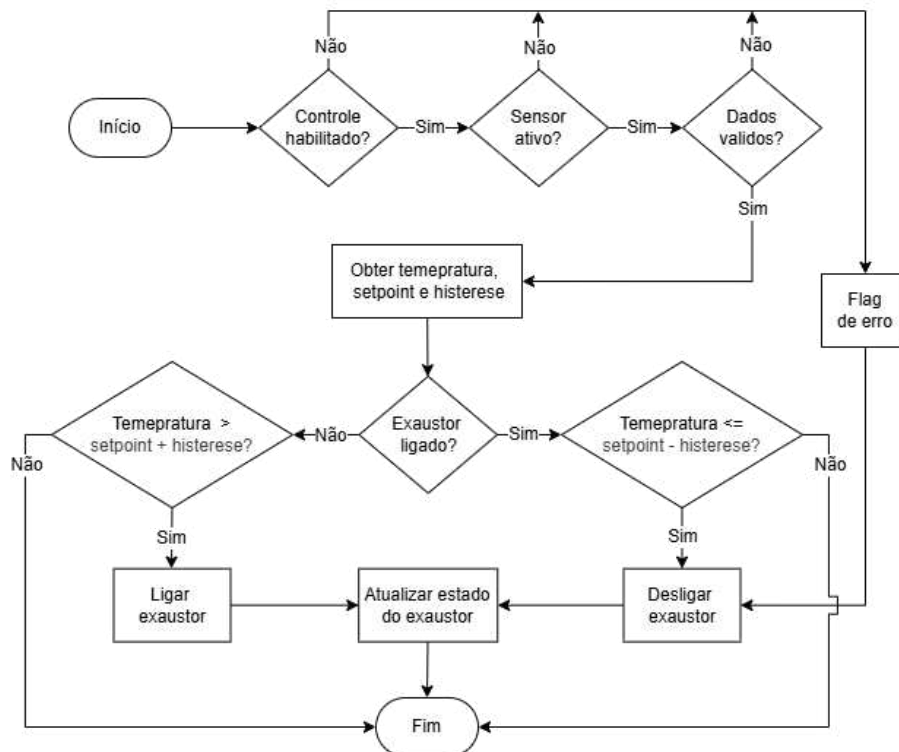
3.2.5 Sistemas de controle

Os sistemas de controle implementados operam de forma cíclica dentro do loop principal do firmware. Cada rotina é executada uma vez por ciclo, sem a necessidade de loops internos. Essa abordagem garante respostas rápidas às variações ambientais e mantém o funcionamento do sistema de forma não bloqueante.

3.2.5.1 Controle de temperatura e umidade

A Figura 22 mostra o fluxograma do controle de temperatura, no qual é possível observar o processo de decisão para habilitação do controle, verificação de falhas e acionamento do exaustor conforme os limites definidos pelo *setpoint* e pela faixa de histerese.

Figura 22 – Controle de temperatura com histerese



Fonte: Autoria própria (2025)

A rotina inicia verificando pré-condições essenciais para o controle: se o controle está habilitado, se o sensor de temperatura está ativo e se os dados lidos são válidos. Enquanto qualquer dessas condições não for satisfeita, a rotina não prossegue com decisões de atuação, garantindo que o exaustor só seja comandado quando o sistema estiver em condições confiáveis de operação.

Com as pré-condições atendidas, o sistema obtém os valores de temperatura atual, *setpoint* e histerese. A partir desses valores são aplicadas duas checagens simétricas de disparo: se a temperatura exceder o limiar superior (*setpoint* + histerese), o exaustor é ligado; se a temperatura ficar igual ou abaixo do limiar inferior (*setpoint* - histerese), o exaustor é desligado. Essa estratégia de histerese evita

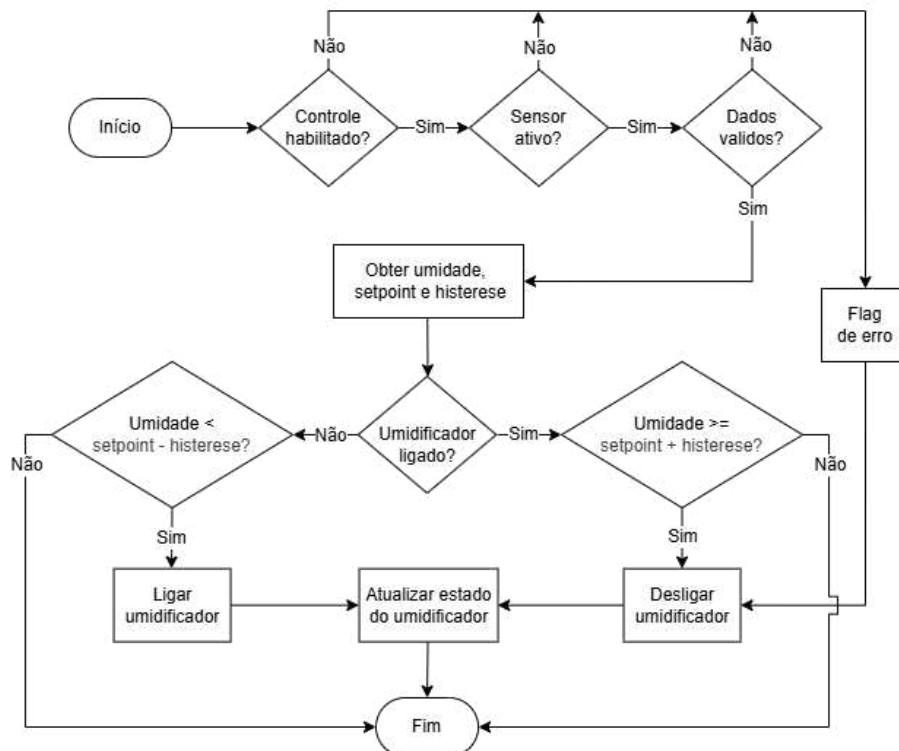
comutação frequente em torno do ponto de ajuste, mantendo estabilidade no acionamento.

É importante destacar que a verificação do estado do exaustor ocorre antes das condições de comutação do relé para evitar a sobrescrita do mesmo estado no pino do microcontrolador diversas vezes. Ao final da rotina, o estado do exaustor é atualizado para refletir a ação tomada, permitindo que outros módulos consultem o status atual.

O controle de umidade segue uma estrutura lógica equivalente à utilizada para o controle de temperatura, diferenciando-se apenas nos parâmetros monitorados e no atuador empregado.

A Figura 23 apresenta o fluxograma do controle de umidade, no qual o sistema avalia continuamente o valor medido em relação ao *setpoint* e à faixa de histerese definida. Com base nessa comparação, o controlador decide pelo acionamento ou desligamento do umidificador, garantindo a manutenção da umidade do ambiente dentro dos limites estabelecidos e evitando oscilações excessivas.

Figura 23 – Controle de umidade com histerese



Fonte: Autoria própria (2025)

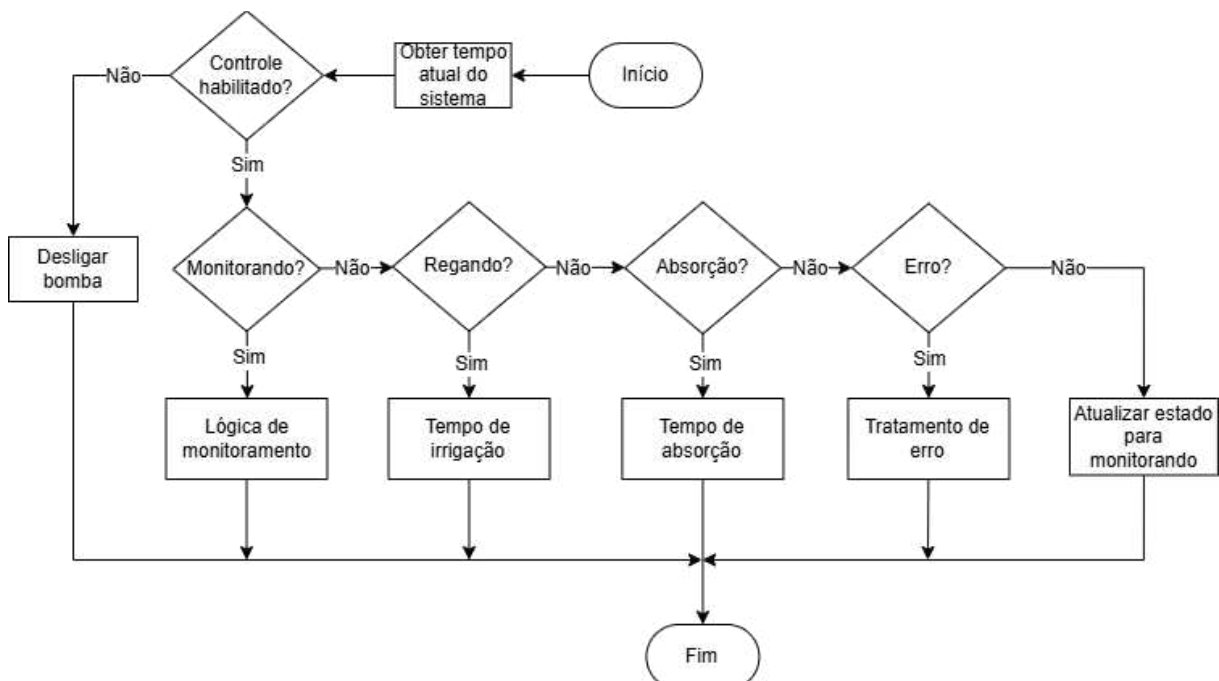
3.2.5.2 Controle de irrigação

O controle de umidade do solo se diferencia dos demais blocos do sistema por ser implementado com base em uma Máquina de Estados Finitos (FSM). Essa abordagem garante uma execução organizada do processo de irrigação, permitindo que o sistema alterne entre diferentes estados operacionais de acordo com condições específicas de tempo e leitura dos sensores.

A FSM é atualizada periodicamente e define o comportamento do sistema conforme o estado atual. Cada estado possui ações e condições de transição bem definidas, conforme descrito a seguir.

O fluxograma inicia com a obtenção do tempo atual do sistema, utilizado como referência para contagem dos períodos de irrigação e absorção. Em seguida, é verificado se o controle de irrigação está habilitado e se há um sensor de umidade configurado. Caso contrário, o sistema mantém a bomba desligada e o estado é definido como desativado. Quando o controle está ativo, o comportamento é determinado pelo estado atual da FSM, como mostra a Figura 24.

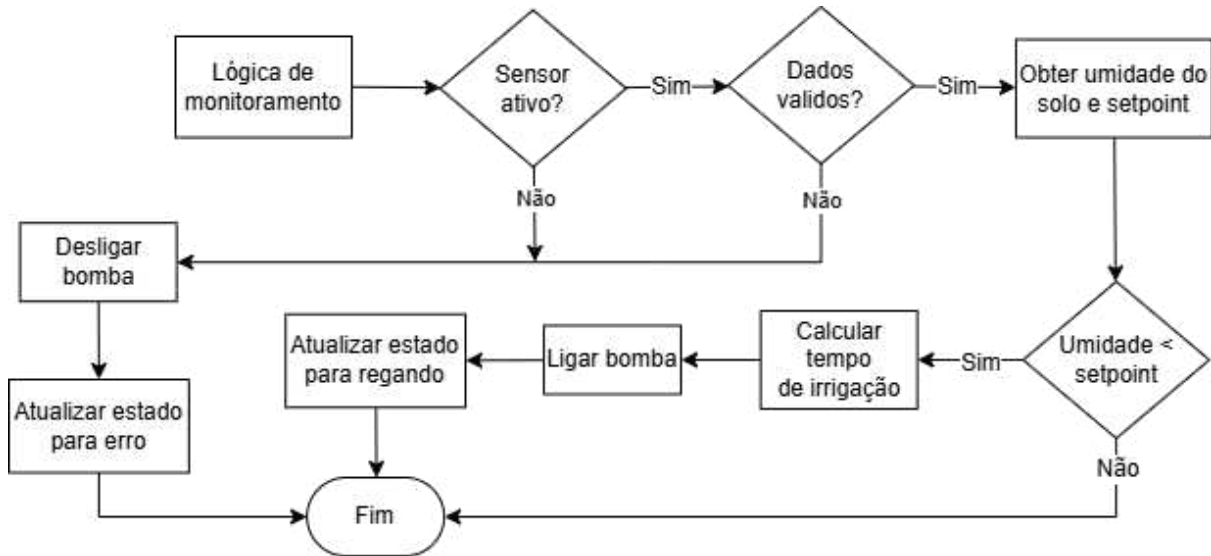
Figura 24 – FSM do controle de irrigação



Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 25 apresenta o fluxograma referente ao estado de monitoramento. Este estado é responsável por realizar a leitura do sensor e decidir se há necessidade de iniciar a irrigação.

Figura 25 – Lógica de monitoramento



Fonte: Autoria própria (2025)

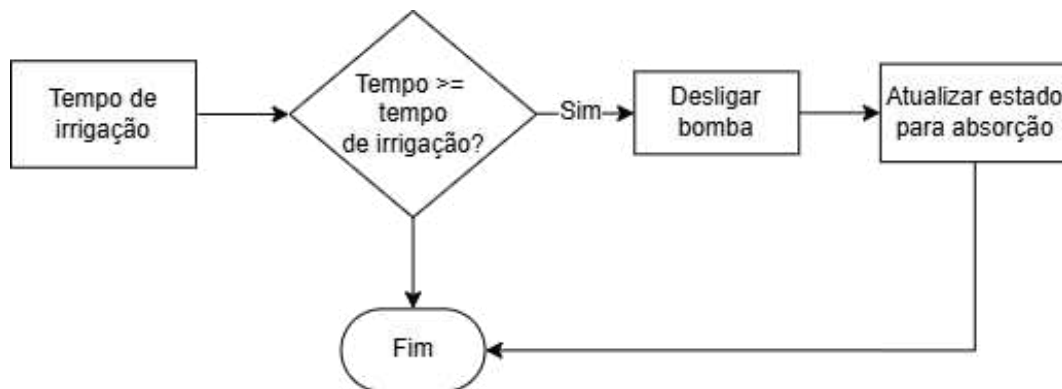
Durante o estado de monitoramento, o sistema realiza a leitura do sensor de umidade do solo apenas se o dispositivo estiver online e fornecendo dados válidos. Caso contrário, o sistema entra em estado de erro para evitar decisões incorretas. Quando os dados são válidos, a umidade medida é comparada com o valor de referência configurado pelo usuário no menu de *setpoints*.

Se a umidade estiver abaixo do limite estabelecido, o sistema calcula automaticamente o tempo necessário de irrigação, registra o instante de início e aciona a bomba de água, alterando o estado para irrigação. Caso a umidade do solo esteja dentro da faixa desejada, o sistema permanece apenas monitorando, sem acionar o atuador.

O tempo de irrigação é calculado com base em parâmetros fornecidos pelo usuário no menu de irrigação, os parâmetros são volume de água e vazão da bomba utilizada.

A Figura 26 apresenta o fluxograma correspondente ao estado de irrigação, onde a bomba é acionada e o sistema controla o tempo de funcionamento com base no valor calculado.

Figura 26 – Lógica do tempo de irrigação

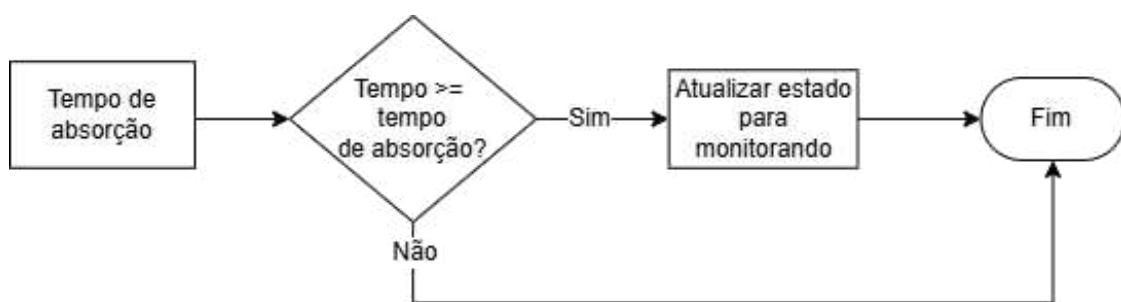


Fonte: Autoria própria (2025)

Durante o estado de irrigação, a bomba é mantida ligada durante o tempo calculado anteriormente, e o sistema monitora continuamente o tempo decorrido desde o início da rega. Quando o período de irrigação é atingido, a bomba é desligada e o sistema entra no estado de absorção, permitindo que a água aplicada se distribua adequadamente no solo. Caso o tempo ainda não tenha sido completado, o sistema permanece nesse estado, garantindo que o volume de água planejado seja aplicado integralmente.

A Figura 27 mostra o fluxograma referente ao estado de absorção, no qual o sistema aguarda o tempo necessário para que a água aplicada se infiltre no solo antes de retomar as medições.

Figura 27 – Lógica do tempo de absorção

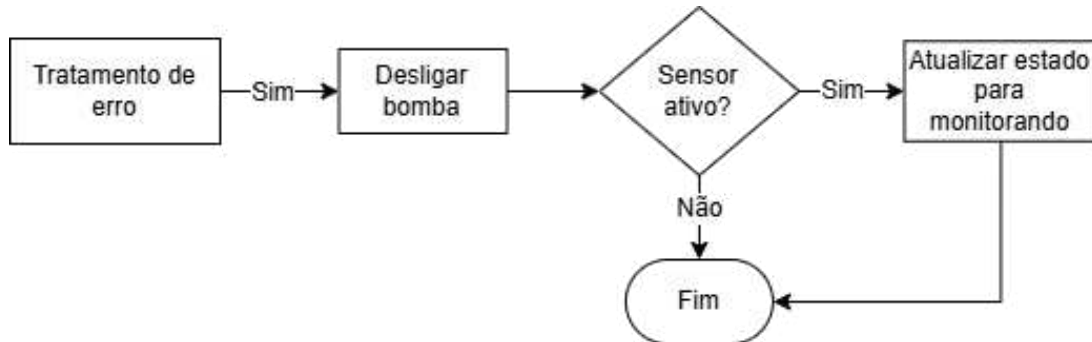


Fonte: Autoria própria (2025)

O estado de absorção representa o intervalo em que o solo está absorvendo a água recém-aplicada. Durante esse período, as leituras do sensor são intencionalmente ignoradas, uma vez que a umidade superficial pode resultar em valores temporariamente elevados e pouco representativos da umidade real. Ao final do tempo de absorção configurado, o sistema retorna automaticamente ao estado de monitoramento, retomando o ciclo de leitura e decisão.

A Figura 28 apresenta o fluxograma referente ao estado de erro, responsável por garantir a segurança do sistema diante de falhas no sensor ou condições anômalas de operação.

Figura 28 – Lógica de tratamento de erro



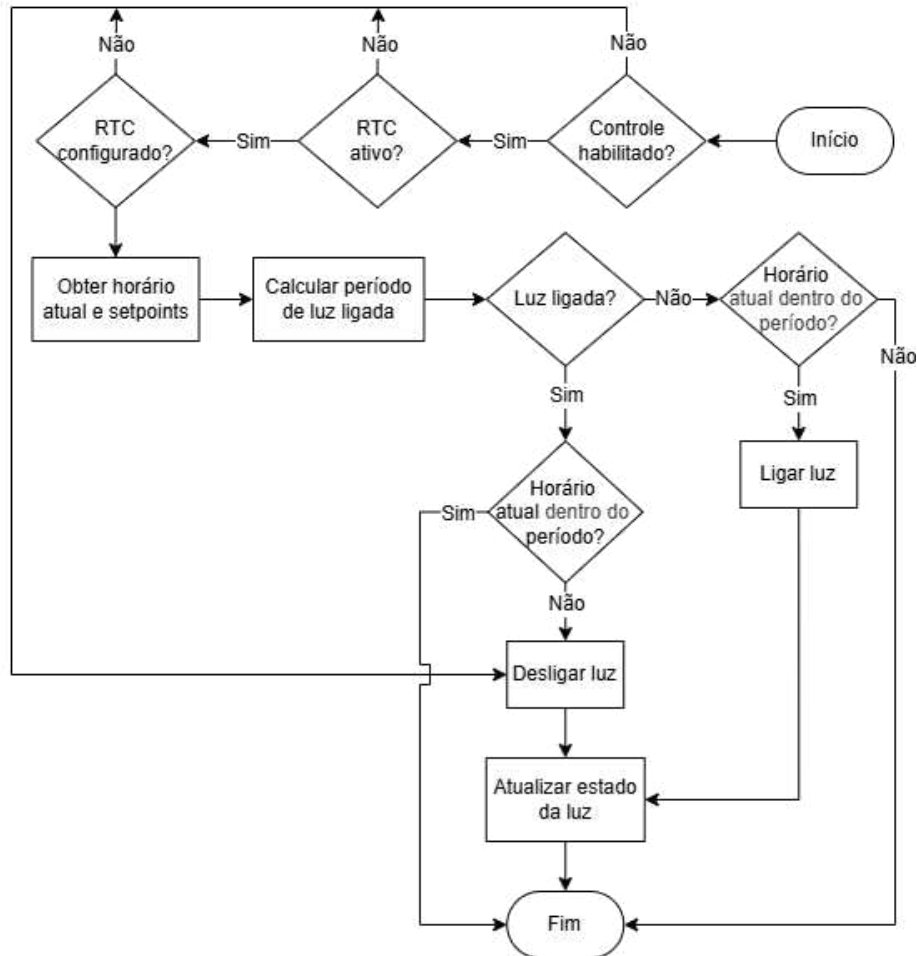
Fonte: Autoria própria (2025)

O estado de erro é ativado quando o sensor de umidade se encontra offline, apresenta falha de comunicação ou fornece dados inválidos. Nesse estado, a bomba é mantida desligada e o sistema realiza verificações periódicas para tentar recuperar a comunicação com o sensor. Se o sensor voltar a operar corretamente, o estado é restaurado para monitoramento, permitindo a retomada do funcionamento normal.

3.2.5.3 Controle de iluminação

O fluxograma apresentado na Figura 29 ilustra o funcionamento do sistema responsável pelo controle automático da iluminação do ambiente de cultivo. Esse subsistema atua com base nos horários configurados pelo usuário no menu de interface e no horário atual fornecido pelo módulo RTC. O objetivo é simular o ciclo de luz ideal para o desenvolvimento das plantas, garantindo que o sistema acione e desligue o conjunto de lâmpadas de acordo com os períodos definidos.

Figura 29 – Controle de iluminação



Fonte: Autoria própria (2025)

O funcionamento inicia com a leitura do horário atual obtido pelo RTC. Em seguida, o sistema realiza a comparação entre o horário corrente e os valores de início e fim do período de iluminação configurados pelo usuário.

Caso o horário atual esteja dentro do intervalo programado, o microcontrolador envia um sinal de acionamento ao módulo de relés, energizando as lâmpadas do sistema. Caso contrário, o relé é desativado, interrompendo o fornecimento de energia ao circuito de iluminação. Esse processo é continuamente repetido dentro do laço principal do *firmware*, assegurando o funcionamento autônomo e sincronizado com o relógio interno, sem necessidade de intervenção manual.

Para determinar se o sistema deve manter a iluminação ativada ou desligada, o software embarcado realiza uma verificação baseada na comparação entre o horário atual e os horários programados de início e término do ciclo de luz.

Inicialmente, todos os horários são convertidos em minutos decorridos desde a meia-noite, o que simplifica a comparação temporal. Dessa forma, tanto o horário

atual quanto os horários configurados para ligar e desligar as lâmpadas são transformados em um formato numérico contínuo, expresso em minutos do dia.

Em seguida, o algoritmo avalia duas situações possíveis. Na primeira, quando o horário de desligamento ocorre após o de acionamento, ou seja, dentro do mesmo dia, o sistema mantém a iluminação ligada sempre que o horário atual estiver entre os limites configurados. Na segunda situação, quando o período de iluminação atravessa a meia-noite (por exemplo, início às 20h e término às 6h do dia seguinte), a lógica é ajustada para considerar a faixa que se estende entre o horário de acionamento e o fim do dia, somando-se ao intervalo que começa na meia-noite até o horário de desligamento.

Dessa forma, o controle garante que a iluminação permaneça ativa durante todo o período programado, independentemente de o ciclo atravessar ou não a transição entre dias.

3.2.6 Interface com o usuário

O sistema de menu foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar uma interface prática e intuitiva para a configuração e o monitoramento das variáveis controladas pelo sistema de cultivo. Por meio do *encoder* rotativo KY-040 e do display OLED SSD1306, o usuário pode ajustar os parâmetros de temperatura, umidade do ar, umidade do solo e horário de iluminação, além de visualizar em tempo real as medições obtidas pelos sensores.

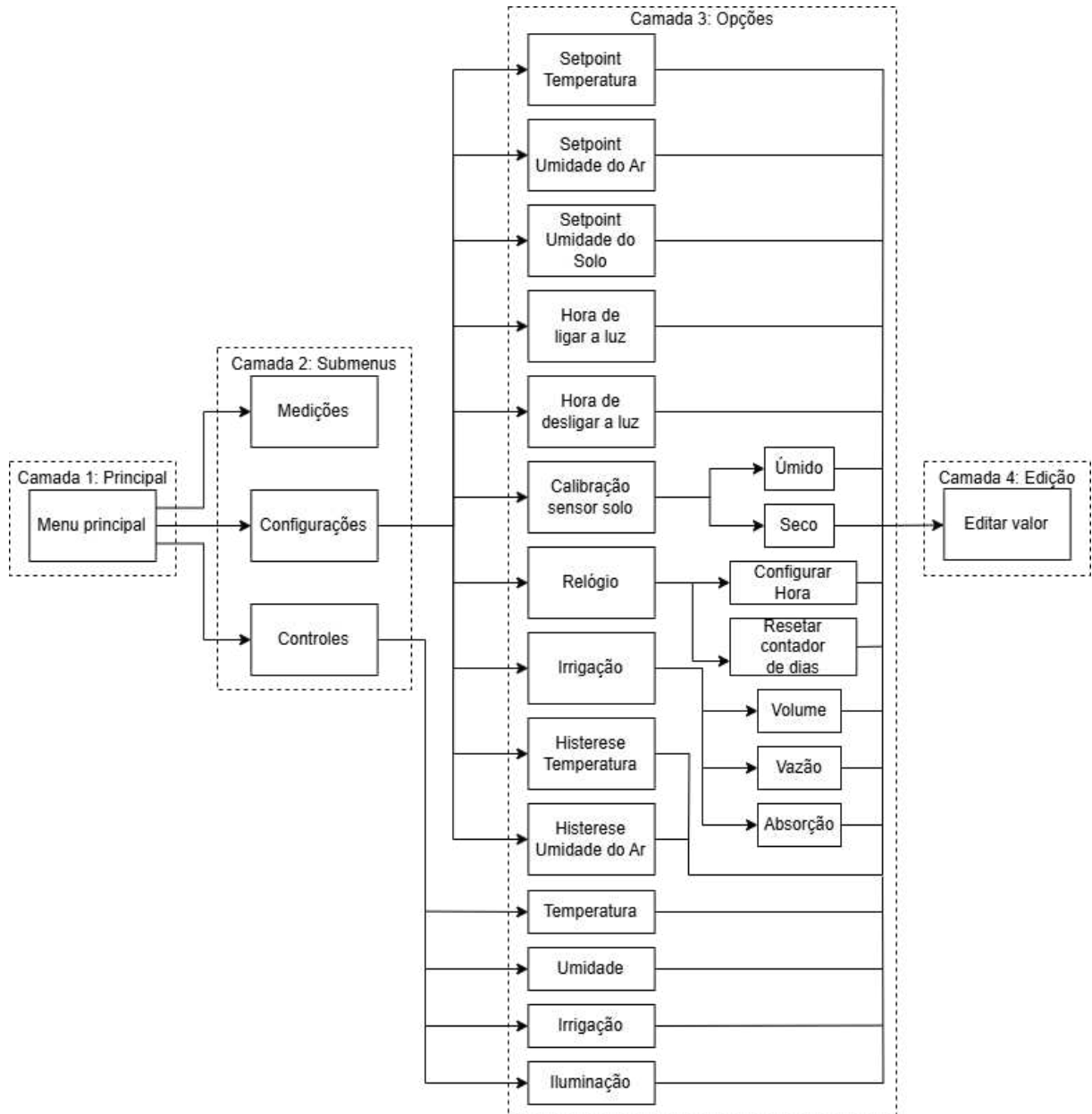
A navegação é estruturada em três seções principais, organizadas de forma hierárquica para simplificar a interação e reduzir o número de etapas necessárias para acessar cada parâmetro. Essa abordagem permite uma operação direta, garantindo ao sistema maior autonomia e facilidade de uso sem a necessidade de conexão constante com um computador.

3.2.6.1 Camadas do menu

A Figura 30 apresenta a estrutura das camadas do menu implementado no sistema. O diagrama evidencia a organização hierárquica das opções disponíveis na interface, partindo do menu principal até os subníveis de configuração. Essa estrutura foi projetada para garantir uma navegação intuitiva, permitindo ao usuário acessar

medições, realizar ajustes e modificar parâmetros operacionais de forma direta e organizada.

Figura 30 – Estrutura das camadas do menu



Fonte: Autoria própria (2025)

O menu principal constitui o ponto de entrada da interface do sistema, oferecendo três categorias principais: Medições, Configurações e Controles. A primeira categoria, Medições, reúne os parâmetros monitorados em tempo real, como temperatura, umidade do ar, VPD calculado e umidade do solo, permitindo ao usuário acompanhar o estado atual das variáveis ambientais.

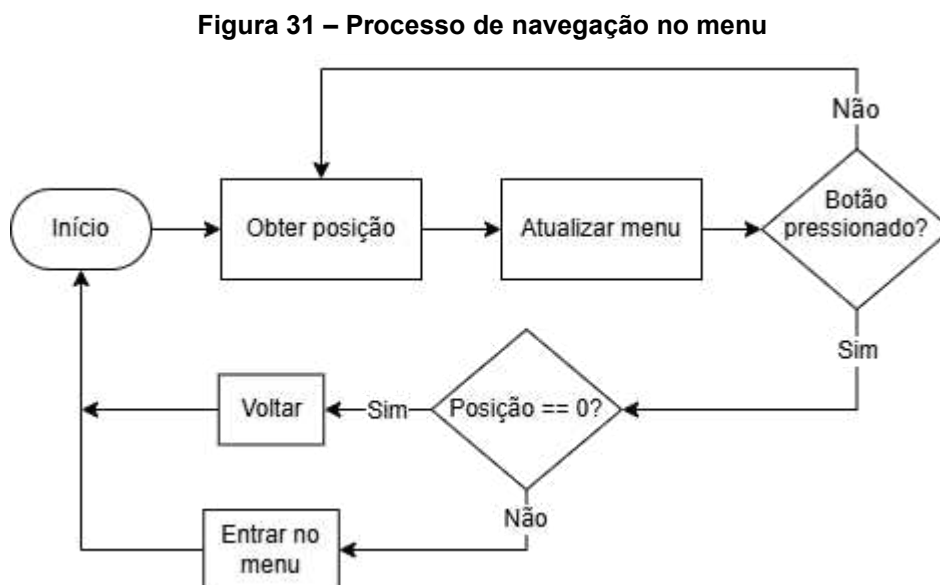
Na categoria Configurações, o usuário pode ajustar os principais parâmetros de operação do sistema. Essa camada inclui a definição de *setpoints* de temperatura, umidade do ar e umidade do solo, além da configuração dos horários de acionamento da iluminação. Também estão disponíveis funções auxiliares, como a calibração do sensor de umidade do solo, o ajuste do relógio interno, parâmetros para o controle de irrigação e as histereses de temperatura e umidade.

A camada de Controles concentra as opções relacionadas à habilitação dos controles automáticos, sendo possível ativar ou desativar qualquer um dos controles individualmente.

Cada uma dessas opções pode ser acessada individualmente, levando o usuário a uma tela de edição de valores, representada no fluxograma como a etapa “Editar valor”.

3.2.6.2 Navegação

A Figura 31 apresenta o fluxograma responsável pela navegação entre as opções do menu da interface do usuário. Esse processo define a forma como o sistema interpreta os comandos do *encoder* rotativo e do botão de seleção, permitindo ao operador se deslocar entre as opções disponíveis, retornar ao nível anterior ou confirmar a entrada em um submenu.



Fonte: Autoria própria (2025)

O funcionamento inicia com a leitura da posição atual do *encoder*, responsável por determinar o deslocamento do cursor no menu. Em seguida, o sistema atualiza a exibição no display conforme a nova posição selecionada.

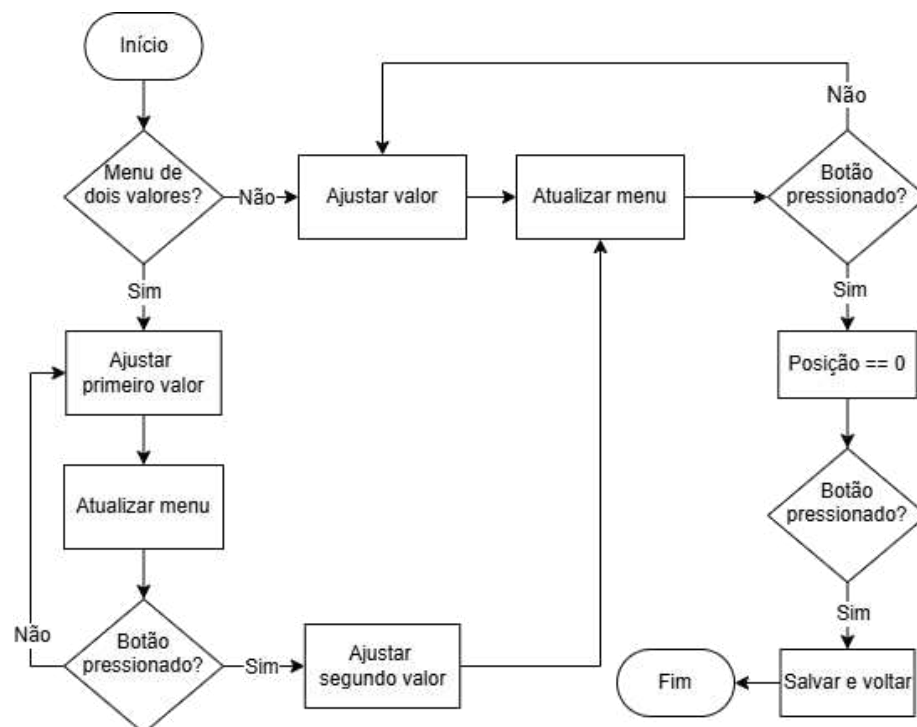
Após a atualização visual, ocorre a verificação do estado do botão, caso nenhum pressionamento seja detectado, o sistema retorna ao início do ciclo, aguardando novas interações do usuário. Por outro lado, se o botão for acionado, é avaliado o valor da variável de posição.

Se a posição for igual a zero o sistema retorna à camada de menu anterior. Caso contrário, o sistema interpreta o comando como a seleção de uma opção válida e acessa o submenu correspondente.

3.2.6.3 Menu de edição

A Figura 32 apresenta o fluxograma que descreve o processo de edição dos parâmetros configuráveis do sistema, permitindo ao usuário ajustar valores como *setpoints*, histereses, horários e controles habilitados. Esse fluxo é acionado a partir da seleção de uma opção editável no menu e define o comportamento da interface durante a modificação dos valores exibidos no display.

Figura 32 – Processo de edição de valores



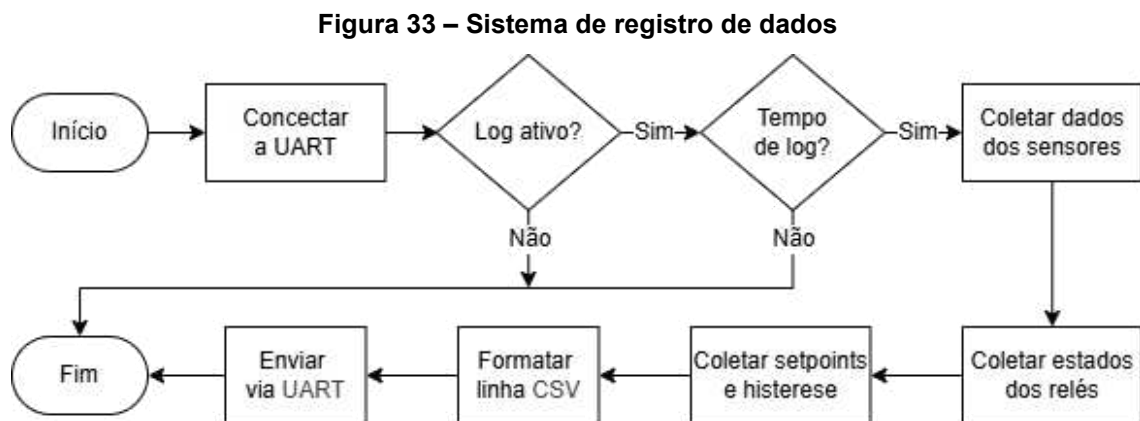
Fonte: Autoria própria (2025)

O processo inicia com a verificação do tipo de parâmetro selecionado, identificando se o menu em questão requer a configuração de um ou dois valores. Caso seja um menu simples, o sistema entra diretamente no modo de ajuste, permitindo a modificação do valor por meio do *encoder* rotativo. Após cada incremento no valor ajustado, a interface é atualizada para refletir a nova configuração, assegurando ao usuário o feedback visual imediato da alteração realizada.

Quando o parâmetro exige a definição de dois valores, como ocorre nos ajustes de intervalos de tempo, o sistema inicia o processo de edição do primeiro valor, atualiza a exibição e aguarda o acionamento do botão de confirmação. Após a confirmação, a rotina prossegue para o ajuste do segundo valor, mantendo o mesmo comportamento de atualização e validação. Ao término da edição, após o segundo valor ser ajustado, o cursor é automaticamente posicionado sobre a opção de retorno. Ao pressionar o botão novamente, o sistema salva as configurações realizadas e retorna ao menu anterior, concluindo o ciclo de ajuste.

3.2.7 Registro de dados

A Figura 33 apresenta o fluxograma do sistema de registro de dados, responsável pela coleta e envio periódico das variáveis medidas e dos estados do sistema.



O processo se inicia com o estabelecimento da comunicação UART entre o microcontrolador e o computador, garantindo o canal de transmissão dos dados. Em seguida, o sistema verifica se o registro de dados está habilitado. Caso o *log* esteja ativo, o algoritmo monitora o intervalo de tempo definido para a coleta, controlado por uma rotina de temporização interna. Quando o tempo configurado é atingido, o

sistema realiza a leitura das informações provenientes dos sensores, coleta o estado atual dos relés e obtém os valores de *setpoint* e histerese configurados pelo usuário.

Esses dados são então organizados e formatados em uma linha no padrão CSV (*Comma-Separated Values*), estrutura que facilita o armazenamento e posterior tratamento dos dados em aplicações externas, como scripts de análise. Por fim, o pacote formatado é transmitido via UART ao computador, encerrando o ciclo de registro. Caso o *log* não esteja ativo ou o intervalo de tempo ainda não tenha sido atingido, o sistema apenas mantém a verificação contínua até a próxima coleta programada.

3.3 Procedimentos de teste e validação

Com o sistema devidamente projetado e implementado, esta etapa tem como objetivo descrever os procedimentos adotados para a realização dos testes e a validação do funcionamento do protótipo desenvolvido.

3.3.1 Ambiente de teste

Os testes experimentais foram realizados em uma estufa real construída para a validação prática do sistema desenvolvido. A montagem dos componentes seguiu exatamente o esquema elétrico e os procedimentos descritos nas seções anteriores, garantindo que o ambiente de teste reproduzisse as condições de operação previstas no projeto final.

Durante os testes, foram conectadas cargas reais aos relés (exaustor, iluminação por LED, bomba de irrigação e umidificador) representando um cenário típico de controle ambiental em sistemas de cultivo *indoor*. É importante destacar que os tipos de dispositivos acionados podem variar conforme a aplicação final do sistema, uma vez que o controlador foi projetado para ser flexível e compatível com diferentes cargas, dentro dos limites dos relés.

3.3.2 Comunicação e registro de dados

A comunicação entre o microcontrolador e o computador foi realizada por meio de um conversor USB-Serial FT232RL, utilizando a interface UART do STM32. A coleta de dados foi implementada através de um script em linguagem Python,

responsável por ler as informações enviadas pela UART, processá-las e armazená-las em arquivos no formato CSV.

O intervalo de amostragem adotado foi de 1 segundo, o que permite acompanhar em tempo real as variações das variáveis monitoradas e os estados dos atuadores. As informações registradas incluem temperatura e umidade do ar, umidade do solo, estados dos relés, valores de *setpoint* e histerese, além do horário interno do sistema obtido pelo RTC.

Os dados armazenados são utilizados posteriormente para a geração de gráficos, possibilitando a análise do comportamento dinâmico das variáveis ambientais e a verificação da estabilidade dos controladores implementados.

3.3.3 Validação dos controles

A validação do sistema foi conduzida a partir de testes controlados de operação, nos quais o sistema foi configurado com diferentes valores de *setpoint* e histerese para cada variável ambiental através do menu. O protótipo foi colocado em funcionamento contínuo durante pelo menos um ciclo completo de iluminação, permitindo observar a atuação dos dispositivos de saída em resposta às variações medidas pelos sensores.

Durante os experimentos, o sistema registrou continuamente os dados adquiridos e os estados dos atuadores, possibilitando a avaliação posterior do comportamento de cada controle em relação às faixas de operação configuradas pelo usuário.

Esse procedimento possibilita verificar a correção da lógica de controle e a funcionalidade do sistema embarcado, assegurando que os acionamentos ocorram dentro dos limites definidos.

3.3.4 Análise dos dados obtidos

Os dados obtidos nos testes foram exportados para planilhas e analisados a partir dos arquivos CSV gerados pelo script Python. Com base nessas informações, serão elaborados gráficos de comportamento que relacionam as variáveis medidas com o estado dos relés correspondentes.

Esses gráficos serão apresentados e discutidos na seção de resultados, permitindo visualizar a resposta temporal do sistema diante das condições impostas

e a eficiência dos controles implementados. O procedimento adotado visa não apenas validar o correto funcionamento do sistema, mas também comprovar sua estabilidade operacional durante longos períodos de execução.

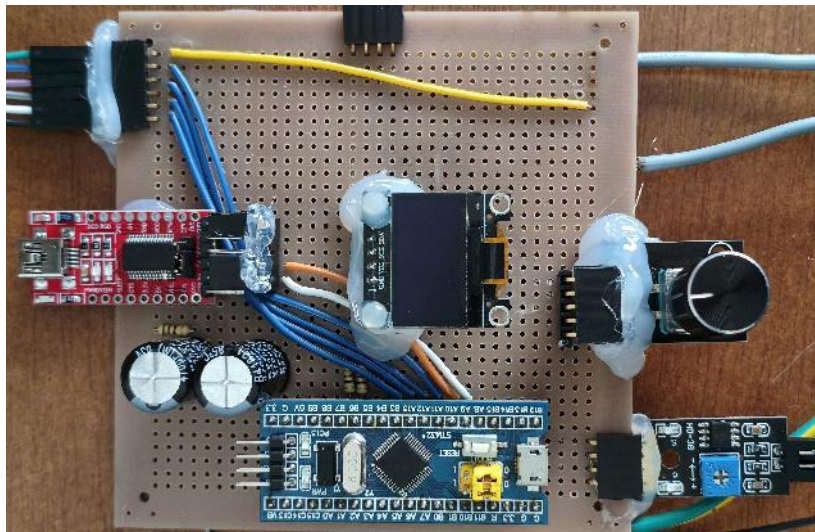
4 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o desenvolvimento e testes do sistema proposto, contemplando o hardware, a análise do funcionamento do *firmware* e o desempenho dos algoritmos de controle implementados. São também discutidos os dados coletados durante os experimentos e o comportamento geral do sistema.

4.1 Protótipo e ambiente de teste

A Figura 34 apresenta o protótipo desenvolvido, contendo os principais módulos eletrônicos do sistema, incluindo o microcontrolador STM32F103C8T6, o display OLED SSD1306, o *encoder* KY-040, o sensor de umidade do solo HD-38 e o módulo conversor USB-Serial FT232RL, todos montados sobre uma placa perfurada.

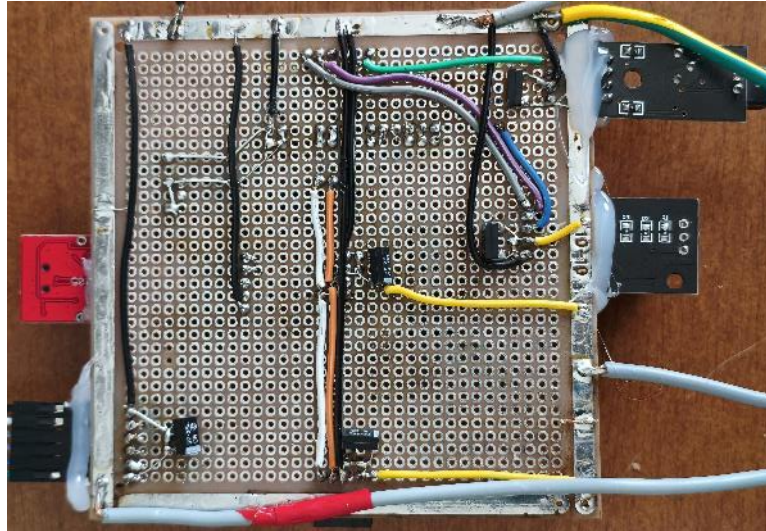
Figura 34 – Vista superior do protótipo eletrônico desenvolvido



Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 35 mostra a parte inferior da placa, onde podem ser observadas as ligações elétricas, filtros de alimentação e os pontos de solda que interconectam os componentes do sistema. As trilhas foram montadas manualmente, garantindo isolamento adequado entre as linhas de alimentação e sinal.

Figura 35 – Parte inferior da placa com interligações e pontos de solda



Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 36 mostra a estufa utilizada como ambiente de testes, confeccionada em estrutura de PVC (polímero policloreto de vinila) e revestida com lona dupla face preta e branca. O conjunto proporciona isolamento para o sistema, permitindo a realização de experimentos para validação do sistema.

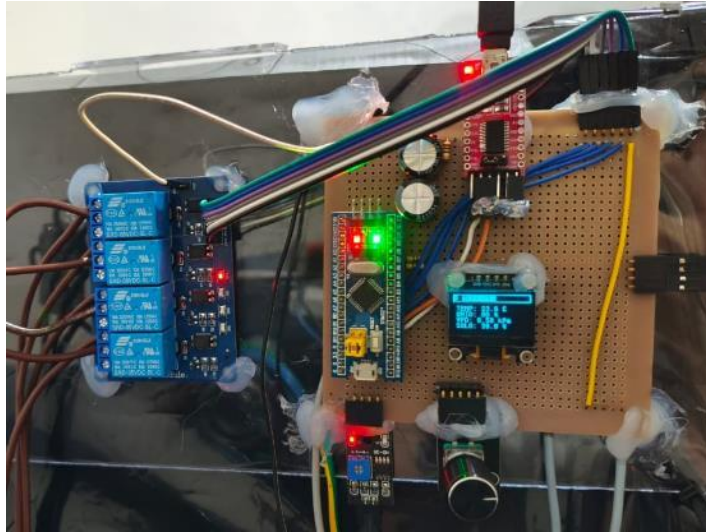
Figura 36 – Estufa utilizada como ambiente de teste



Fonte: Autoria própria (2025)

Por fim, a Figura 37 apresenta o sistema montado sobre a estrutura da estufa, evidenciando a integração entre o circuito de controle e o módulo de relés de quatro canais, responsável pelo acionamento dos atuadores (exaustor, umidificador, bomba e iluminação). O display OLED exibe em tempo real as variáveis medidas permitindo o monitoramento direto das condições internas do ambiente controlado.

Figura 37 – Sistema completo acoplado à estufa



Fonte: Autoria própria (2025)

4.2 Interface com o usuário

A interface com o usuário foi desenvolvida para permitir a visualização das variáveis ambientais, a configuração dos parâmetros de controle e a navegação entre os menus de forma intuitiva.

4.2.1 Menu principal

A Figura 38 mostra o menu principal que é a tela inicial do sistema e apresenta as opções de acesso aos diferentes submenus, permitindo a navegação entre as medições, configurações e controles.

Figura 38 – Menu principal do sistema



Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.2 Tela de medições

A tela de medições, evidenciada na Figura 39, exibe as variáveis medidas pelos sensores (temperatura, umidade do ar e umidade do solo), bem como o VPD calculado, todas atualizadas em tempo real. Essa tela permite o monitoramento direto das condições ambientais dentro da estufa.

Figura 39 – Tela de medições



Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.3 Menus de configuração

A Figura 40 apresenta as telas que compõem o menu de configurações do sistema. Essa interface foi projetada para permitir o ajuste dos principais parâmetros de operação da estufa, como temperatura, umidade do ar, umidade do solo, calibração de sensor, controle de iluminação, sistema de irrigação e faixas de histerese utilizadas nos algoritmos de controle.

Figura 40 – Opções no menu de configurações



Fonte: Autoria própria (2025)

Cada menu possui características específicas de acordo com a função configurada. Alguns apresentam apenas um valor ajustável, enquanto outros dispõem de dois ou mais parâmetros. Quando há mais de um valor associado a uma mesma configuração o sistema abre submenus dedicados, nos quais é possível definir individualmente cada variável.

Em todas as opções de ajuste, os valores de entrada são limitados por faixas pré-definidas no *firmware* e exibidas durante a configuração, evitando erros de

configurações e garantindo que as condições operacionais permaneçam dentro dos limites estabelecidos para o sistema.

A Figura 41 reúne os menus com apenas um parâmetro configurável, esses são os menus de configurações dos *setpoints* e histerese. No caso dos menus de configurações das referências de horários para controle da iluminação, mesmo que em um menu individual, primeiro deve ser configurado as horas e depois os minutos, indicados pelas setas.

Figura 41 – Configurações individuais



Fonte: Autoria própria (2025)

Diferentemente dos menus apresentados anteriormente, os menus a seguir possuem mais de uma variável configurável, todas relacionadas a uma mesma função do sistema. A Figura 42 apresenta o submenu de calibração do sensor de umidade do solo, no qual estão disponíveis duas variáveis de ajuste correspondentes aos limites mínimo e máximo de referência. Além disso, o menu exibe, em tempo real, a leitura atual do sensor, tanto em valor decimal quanto em porcentagem, facilitando o processo de calibração.

Figura 42 – Menu de calibração do sensor HD-38



Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 43 mostra o submenu de irrigação onde o usuário deve inserir os dados relacionados ao sistema de rega quando for utilizar deste controle, esses dados serão utilizados para cálculo do tempo de irrigação e tempo de absorção já descritos anteriormente.

Figura 43 – Menu de configurações da irrigação



Fonte: Autoria própria (2025)

O menu de configuração do relógio de tempo real (RTC) permite ao usuário ajustar e monitorar o horário interno do sistema, essencial para o funcionamento temporizado da rotina de iluminação. Como ilustrado na Figura 44, a interface apresenta as opções “Config Hora” e “Reset Dia”, permitindo respectivamente a definição manual da hora atual e a reinicialização do contador diário. O status de configuração é exibido em tempo real, indicando se o RTC está sincronizado ou em processo de ajuste.

Figura 44 – Menu de configuração do RTC



Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.4 Menu de controle

O sistema conta com um menu de controle dedicado à habilitação dos módulos de automação, permitindo ao usuário definir quais controles estarão ativos durante a operação. Por meio da interface exibida na Figura 45 é possível ativar ou desativar individualmente os controles de temperatura, umidade do ar, irrigação e iluminação, de acordo com a necessidade.

Figura 45 – Menu de controles



Fonte: Autoria própria (2025)

Essa funcionalidade oferece flexibilidade operacional, permitindo operar o sistema em modo parcial. A seleção é realizada utilizando o *encoder* rotativo, e o estado de cada controle é exibido no display, garantindo clareza na configuração.

4.3 Sistemas de controle

Esta seção apresenta os resultados obtidos nos testes do controle realizados na estufa automatizada. Os ensaios tiveram como objetivo verificar o comportamento do sistema, avaliando o desempenho do algoritmo de controle.

As medições foram adquiridas através do registro de dados em intervalos de amostragem constantes de um segundo, com registro contínuo das variáveis medida, estado dos atuadores, valores de histerese e tempo de referência fornecido pelo RTC interno do microcontrolador. Após o registro foram utilizados scripts em Python para análise dos dados e plotagem dos gráficos.

4.3.1 Controle de temperatura e umidade relativa do ar

Antes da execução dos testes, foram definidos os valores de referência e a faixa de histerese para o controle de temperatura e umidade do ar, conforme apresentado na Tabela 1. Esses parâmetros foram ajustados por meio da interface de configuração descrita anteriormente.

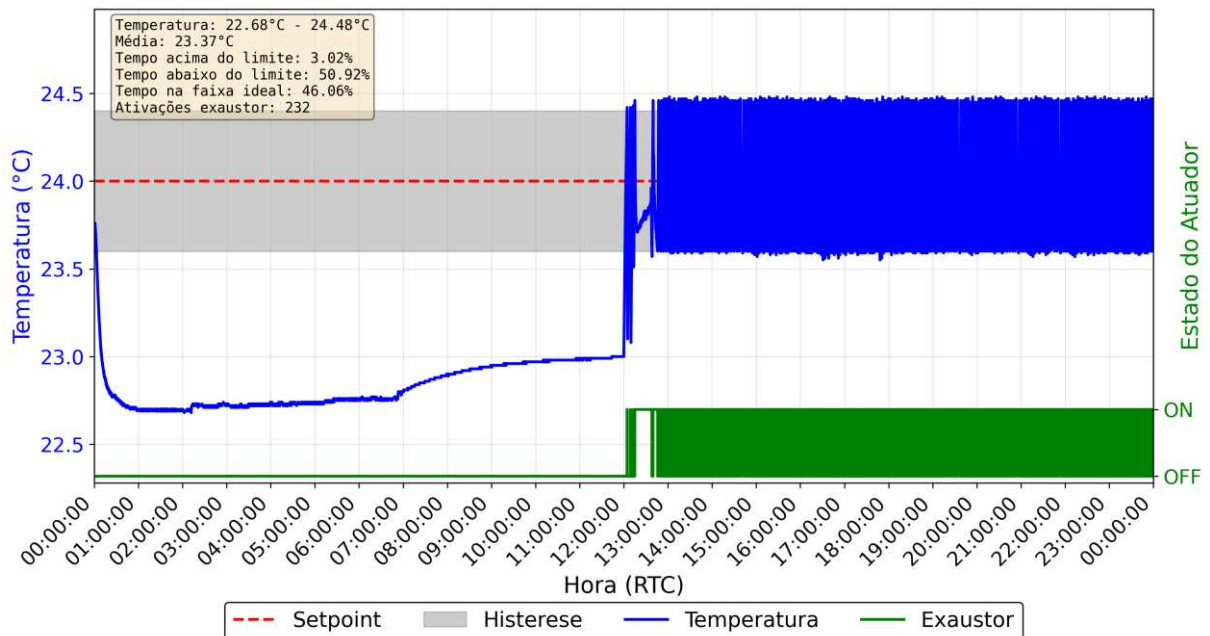
Tabela 1 – Parâmetros relacionados ao controle de temperatura e umidade do ar

Parâmetro	Valor configurado	Unidade
Temperatura de referência	24	°C
Histerese de temperatura	±0,4	°C
Umidade de referência	80	%
Histerese de umidade	±2	%

Fonte: Autoria própria (2025)

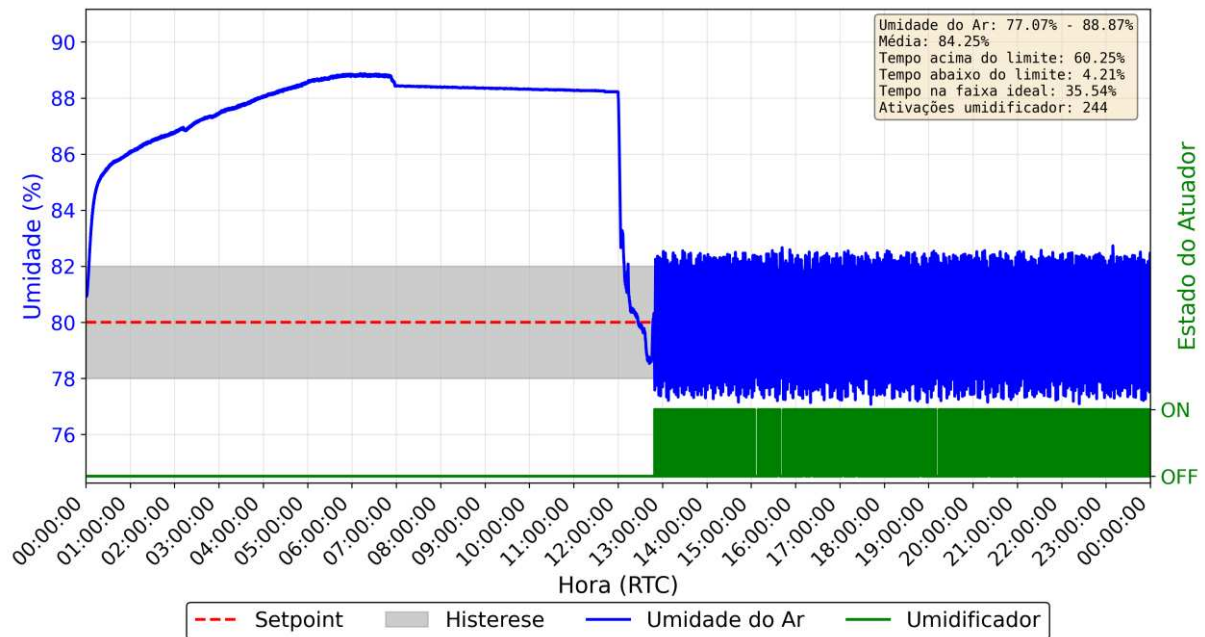
4.3.1.1 Controle diário completo

A Figura 46 e Figura 47 apresentam o comportamento da temperatura e umidade do ar, respectivamente, ao longo de um ciclo completo de 24 horas de operação do sistema. É possível observar que, durante o período diurno, o aumento da temperatura e redução da umidade provocado pelo calor proveniente do sistema de iluminação leva à atuação do controle garantindo que a variável permaneça próxima a faixa configurada.

Figura 46 – Temperatura ao longo de 24 horas de operação do sistema

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 47 – Umidade relativa do ar ao longo de 24 horas de operação do sistema



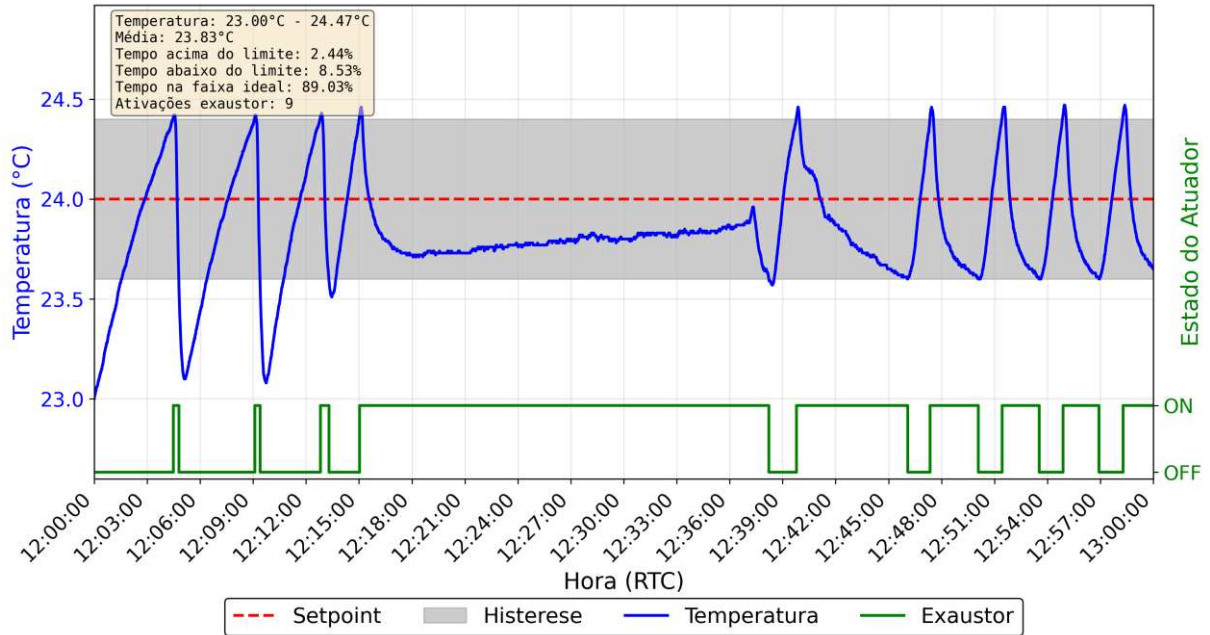
Durante o período noturno a temperatura ambiente permaneceu abaixo do valor de referência e a umidade acima, e consequentemente não houve atuação do sistema de controle. Esse comportamento ocorre devido à ausência de calor proveniente da iluminação e à inexistência de elementos de aquecimento e desumidificação dedicados no protótipo. Dessa forma, o controlador permanece inativo, pois não há meios físicos para elevar a temperatura. A condição descrita evidencia uma limitação estrutural do sistema, e não uma falha no algoritmo de controle.

4.3.1.2 Controle em períodos parciais

Na Figura 48, observa-se um comportamento inicial menos estável da temperatura, caracterizado por oscilações mais amplas em torno do valor de referência.

O comportamento observado está associado a umidade acumulada no ambiente durante a noite e ao momento de transição em que o sistema começa a reagir ao acionamento da iluminação, que introduz uma nova fonte de calor no interior da estufa. Durante esse período, o controlador ainda busca compensar a variação térmica causada pela luz, ajustando o ciclo de atuação do exaustor até que o ambiente alcance o equilíbrio térmico. Essa resposta é típica de um sistema em fase de estabilização após uma perturbação significativa.

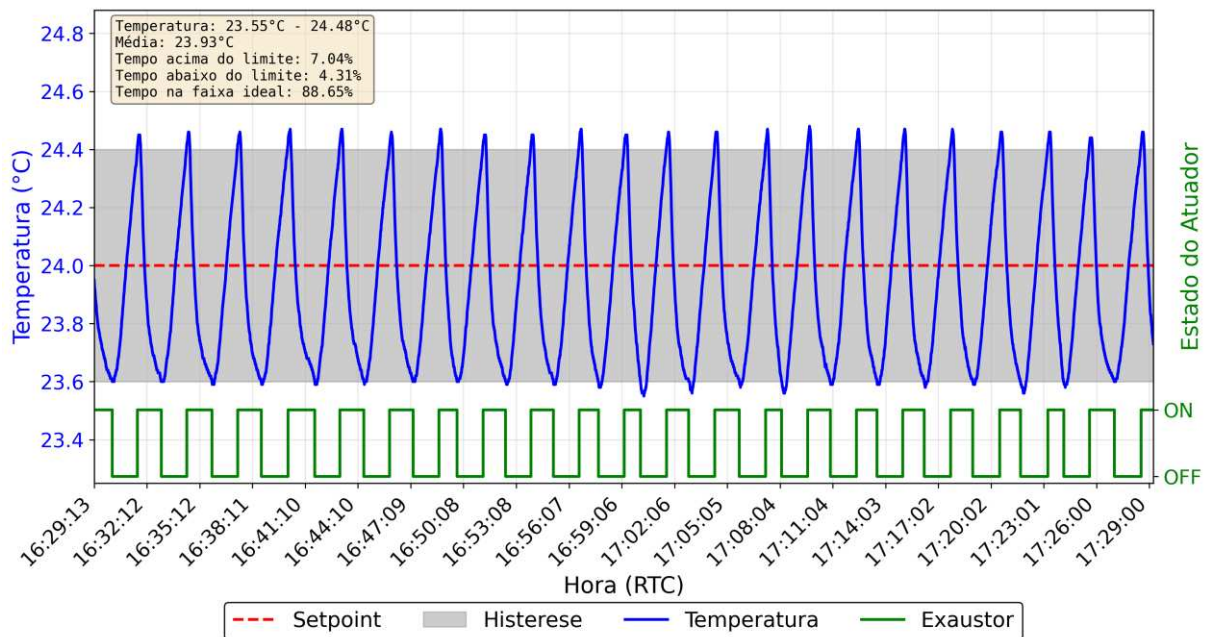
Figura 48 – Período de estabilização da temperatura após o acionamento da iluminação



Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 49, o sistema já se encontra em regime permanente, apresentando um comportamento mais estável. As variações de temperatura ocorrem próximas aos limites definidos pela zona de histerese, nesses intervalos, o exaustor atua de forma periódica e previsível.

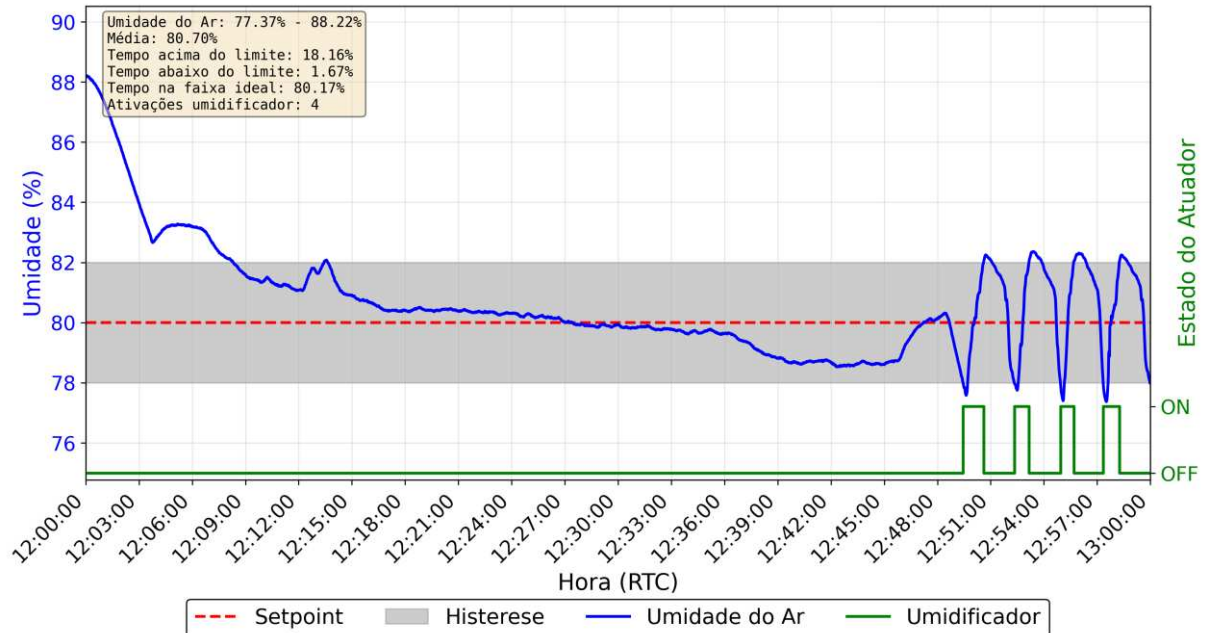
Figura 49 – Controle de temperatura em regime estável



Fonte: Autoria própria (2025)

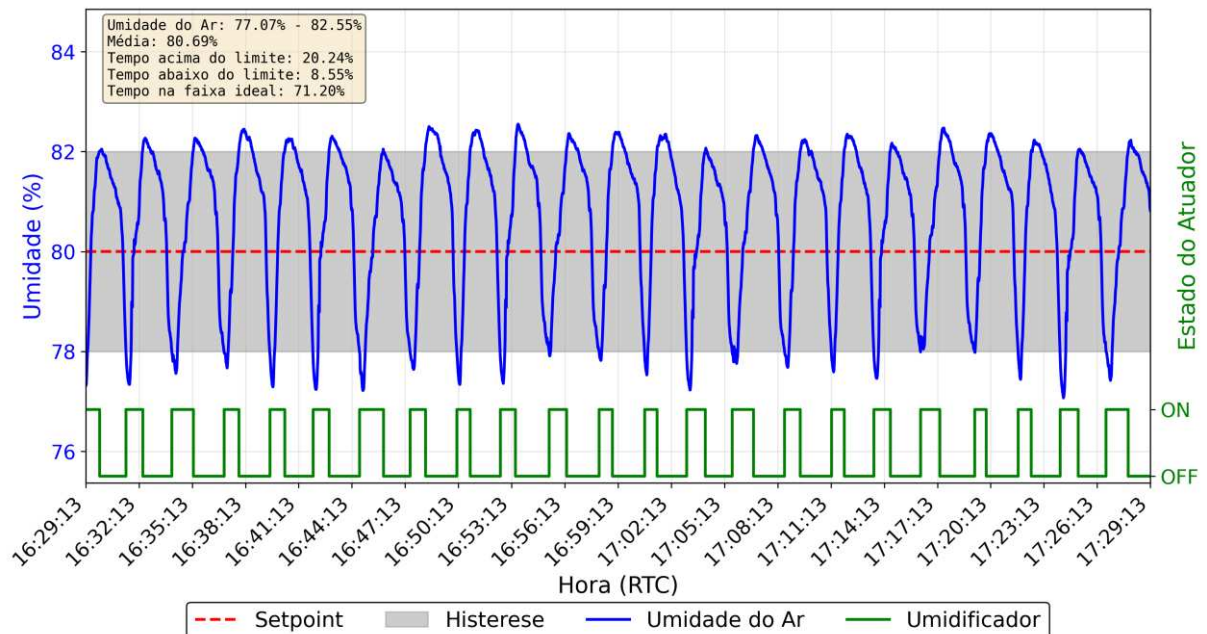
Um comportamento semelhante ao da temperatura pode ser observado para o controle de umidade do ar na Figura 50 e Figura 51.

Figura 50 – Período de estabilização da umidade após o acionamento da iluminação



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 51 – Controle de umidade em regime estável



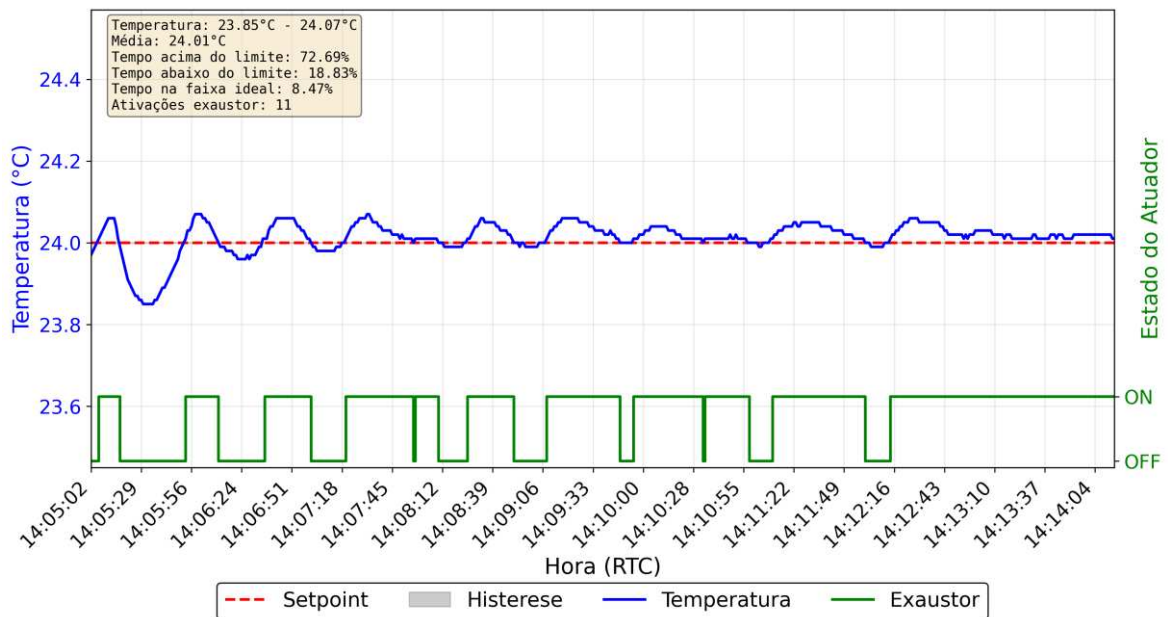
Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.1.3 Comparação entre controle com e sem histerese

A Figura 52 e Figura 53 apresentam o resultado obtido durante 10 minutos de operação do sistema sem a aplicação de histerese. Nesse caso, por mais que as

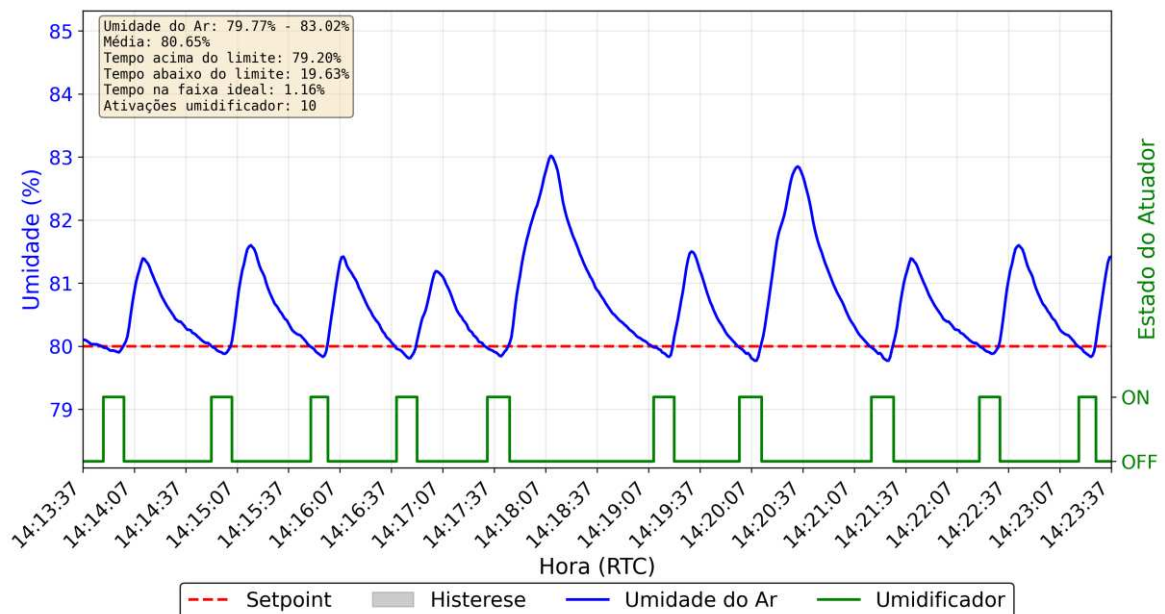
variáveis se mantiveram próximas ao valor de referência, observou-se um comportamento oscilatório intenso com relação ao atuador, com onze acionamentos sucessivos do exaustor, incluindo dois eventos de comutação quase instantânea, e dez do umidificador. Esse fenômeno, conhecido como *chattering*, é típico de sistemas sem zona morta no controle e resulta em maior desgaste dos componentes eletromecânicos.

Figura 52 – Resposta da temperatura ao sistema sem histerese



Fonte: Autoria própria (2025)

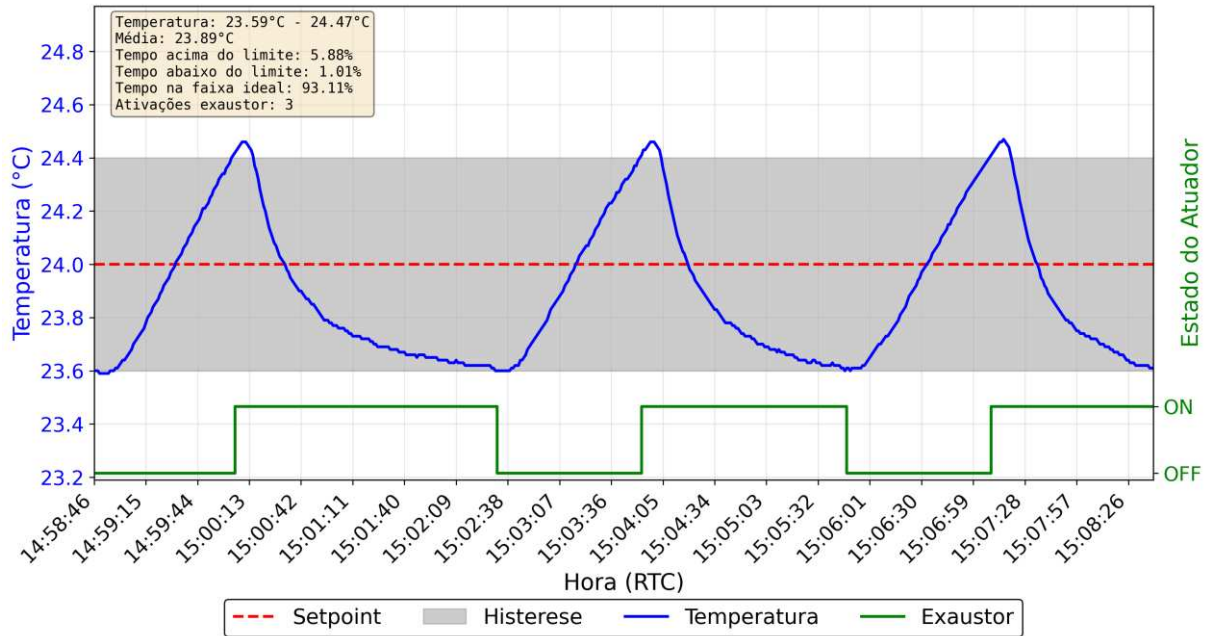
Figura 53 – Resposta da umidade ao sistema sem histerese



Fonte: Autoria própria (2025)

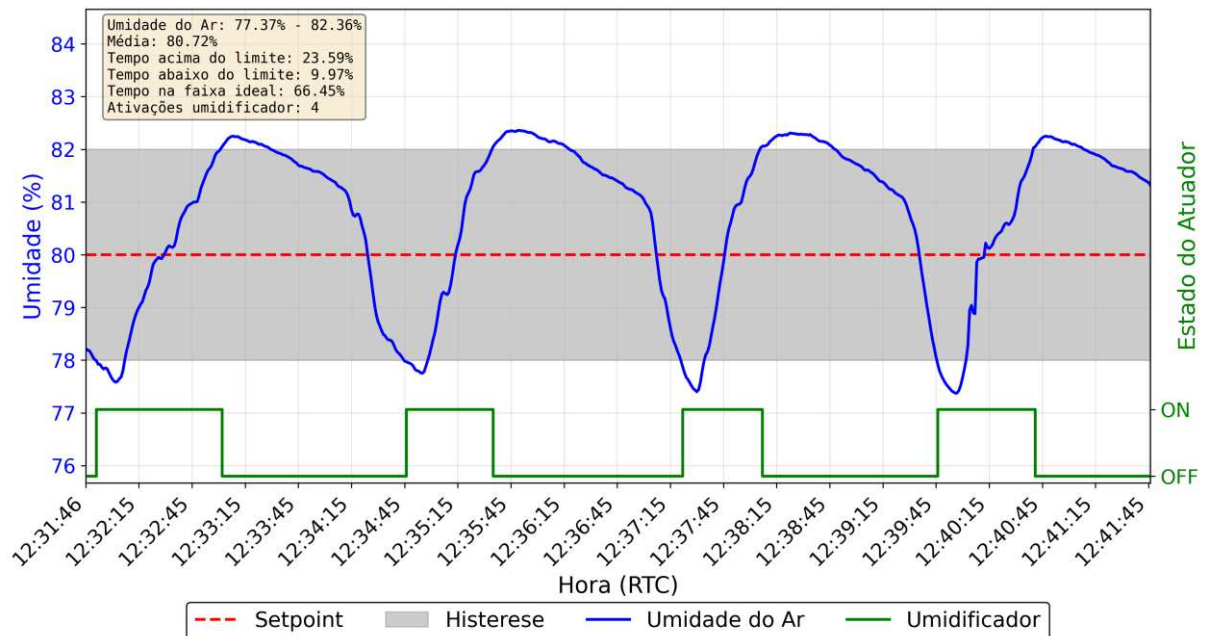
A Figura 54 e Figura 55 mostram o mesmo ensaio realizado com a histerese ativada, mantendo os mesmos parâmetros de referência.

Figura 54 – Resposta da temperatura ao sistema com histerese



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 55 – Resposta da umidade ao sistema com histerese



Fonte: Autoria própria (2025)

Neste caso, o número de comutações foi reduzido para apenas três acionamentos do exaustor e quatro do umidificador ao longo do período observado, com intervalos regulares e comportamento estável. As variáveis permaneceram

próximas da faixa delimitada pela histerese e suas médias próximas ao valor de *setpoint*, comprovando que a aplicação dessa técnica resulta na redução das comutações e na melhoria da estabilidade do sistema.

4.3.2 Controle de irrigação

A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados para o teste do controle de irrigação, configurados por meio da interface do sistema. O objetivo foi avaliar o comportamento do sistema de bombeamento e a resposta do sensor HD-38 durante os ciclos de irrigação.

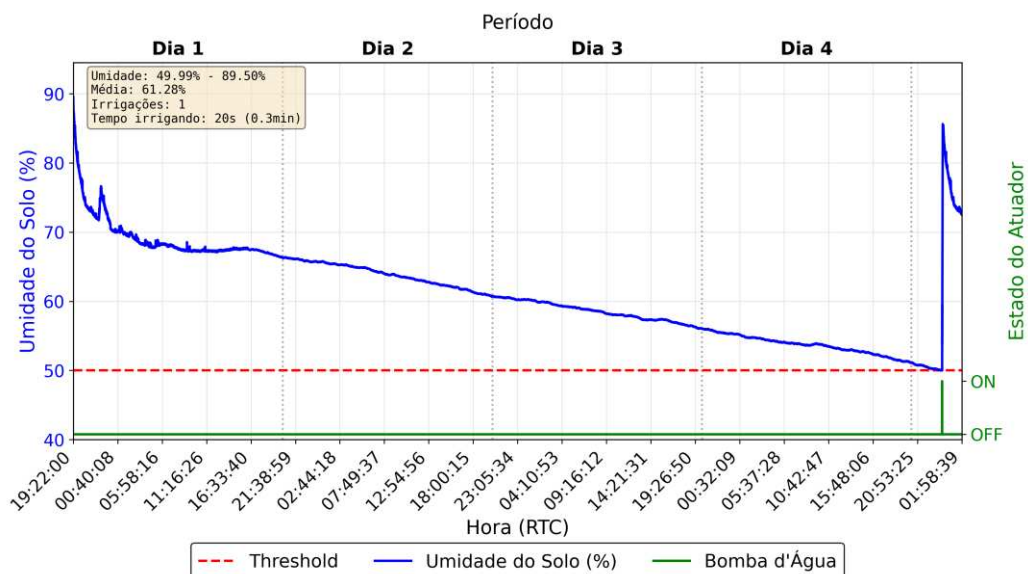
Tabela 2 – Parâmetros relacionados ao controle de irrigação

Parâmetro	Valor configurado	Unidade
Umidade do solo de referência	50	%
Calibração solo seco	3885	-
Calibração solo úmido	200	-
Volume de água	1	L
Vazão da bomba	3	L/min
Tempo de absorção	24	Horas

Fonte: Autoria própria (2025)

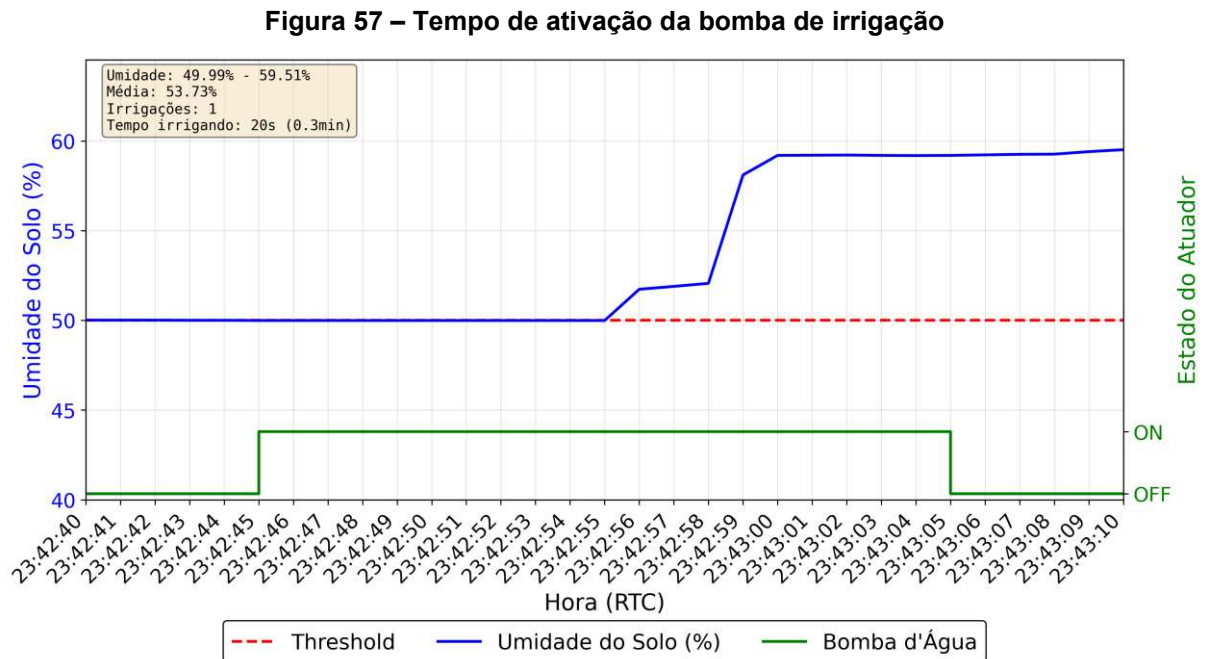
A Figura 56 apresenta o comportamento da umidade do solo ao longo de um ciclo completo de irrigação. Observa-se que o sistema é acionado automaticamente quando o valor lido atinge o limite configurado de 50%. Esse comportamento demonstra o correto funcionamento do controle, que atua somente quando necessário, evitando excesso de umidade no solo.

Figura 56 – Variação da umidade do solo durante um ciclo de irrigação



Fonte: Autoria própria (2025)

Para melhor visualização do tempo de irrigação, a Figura 57 mostra apenas o momento em que a bomba de irrigação é ligada e desligada, evidenciando o tempo calculado pelo controle de irrigação com base nos parâmetros configurados pelo usuário.



Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.3 Controle de iluminação

O controle de iluminação da estufa tem como finalidade simular o ciclo de luz natural, fornecendo iluminação artificial durante o período diurno e desligando automaticamente no período noturno. Os valores configurados para o sistema de iluminação estão dispostos na Tabela 3.

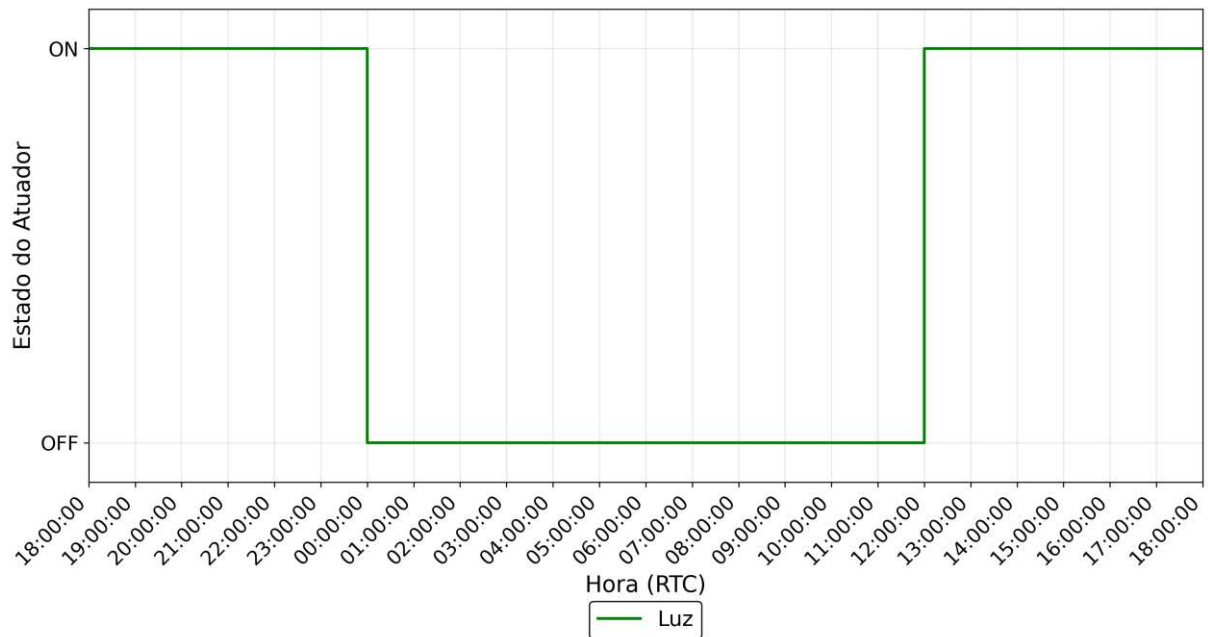
Tabela 3 – Parâmetros relacionados ao controle de iluminação

Parâmetro	Valor configurado
Horário para ligar o LED	12:00
Horário para desligar o LED	00:00

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 58 apresenta o comportamento do sistema de iluminação ao longo de um ciclo completo de 24 horas. Observa-se que o LED permanece ligado durante o intervalo definido. Durante o período noturno, o sistema é automaticamente desligado.

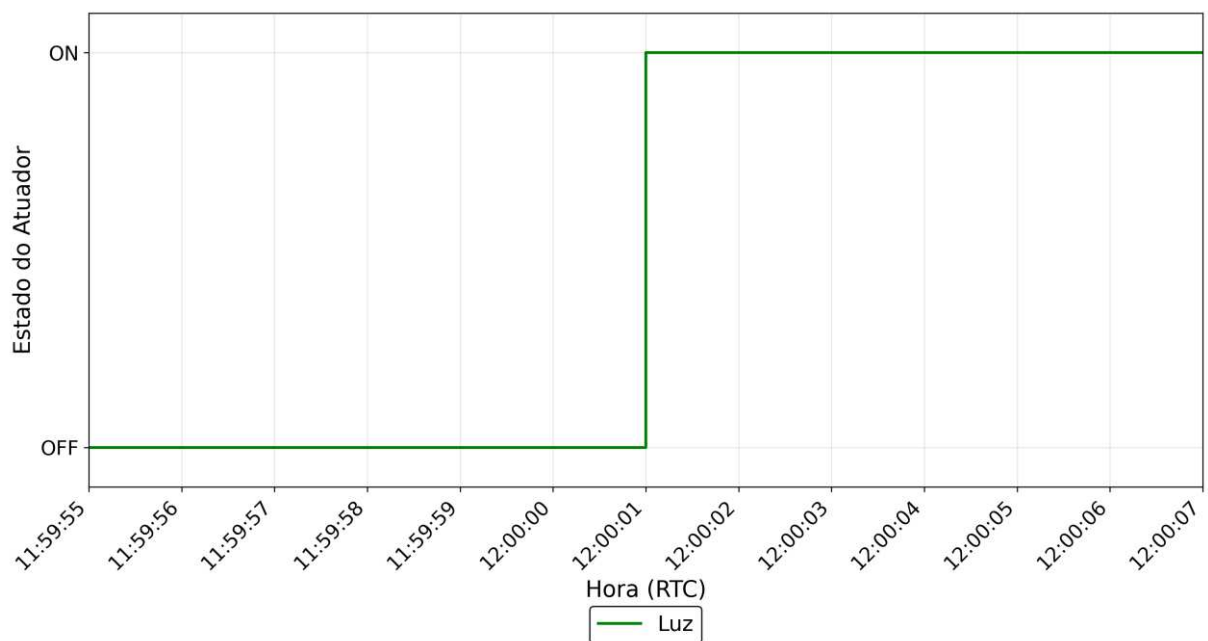
Figura 58 – Ciclo completo do sistema de iluminação durante 24 horas



Fonte: Autoria própria (2025)

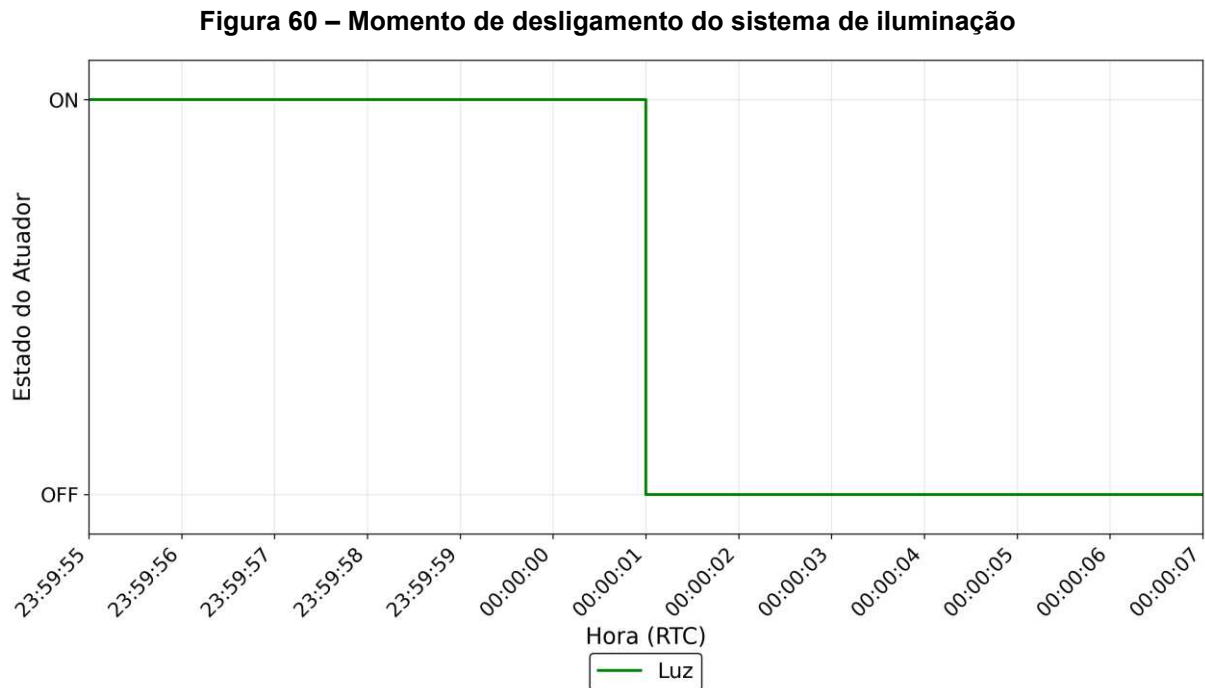
A Figura 59 detalha o instante de acionamento do sistema de iluminação, correspondente ao início do período diurno. Nota-se que o relé responsável pela comutação é ativado precisamente no horário configurado, demonstrando a precisão do controle temporal implementado via RTC interno do microcontrolador.

Figura 59 – Momento de acionamento do sistema de iluminação



Fonte: Autoria própria (2025)

Já a Figura 60 apresenta o momento de desligamento da iluminação, correspondente ao início do período noturno. Assim como na ativação, a transição ocorre exatamente no horário programado. Esse comportamento confirma o correto funcionamento da rotina de temporização.



Fonte: Autoria própria (2025)

De modo geral, os resultados comprovam o funcionamento adequado do controle de iluminação, tanto no ciclo diário completo quanto nas transições específicas de acionamento e desligamento. O sistema apresentou comutação precisa e sincronizada com o tempo real, assegurando previsibilidade ao ambiente de cultivo e coerência no funcionamento dos demais controles automáticos.

4.4 Análise geral dos resultados

De modo geral, os resultados experimentais obtidos comprovam o correto funcionamento dos controles implementados no sistema. Cada controle respondeu de forma coerente aos parâmetros configurados, apresentando estabilidade durante os testes.

A estratégia de controle baseada em histerese mostrou-se eficaz em todas as variáveis analisadas, reduzindo o número de comutações dos atuadores, o que contribui para aumentar a vida útil dos componentes e reduzir o consumo de energia.

Verificou-se também a interdependência entre os sistemas, especialmente entre iluminação, temperatura e umidade, uma vez que a luz atua como fonte térmica primária. A ausência de um elemento de aquecimento e desumidificador nos períodos noturnos limita o controle ambiental, o que representa uma oportunidade de melhoria em versões futuras do projeto.

Portanto, o sistema desenvolvido demonstrou uma interface simples e intuitiva, desempenho satisfatório, estabilidade operacional e viabilidade de aplicação em ambientes controlados de pequeno porte, apresentando uma base sólida para futuras expansões e aprimoramentos.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do sistema automatizado de monitoramento e controle ambiental para estufas demonstrou resultados satisfatórios, tanto em nível de hardware quanto de software, validando a proposta inicial do projeto. A arquitetura implementada, mostrou-se adequada para a integração dos diferentes módulos de sensores, atuadores e interface com o usuário, permitindo o monitoramento, controle autônomo de temperatura, umidade, iluminação e irrigação, além da aquisição de dados para validação.

Os testes realizados evidenciaram o funcionamento estável do sistema e a efetividade dos algoritmos de controle com histerese, que reduziram significativamente o número de comutações dos atuadores. A comparação entre os modos com e sem histerese confirmou a importância dessa abordagem, especialmente para minimizar o desgaste dos dispositivos.

O controle de temperatura apresentou comportamento consistente durante todo o ciclo de operação, mantendo a variável próxima ao ponto de ajuste, mesmo diante de variações naturais do ambiente. Situações de instabilidade observadas em momentos específicos foram atribuídas às limitações físicas do sistema, como a ausência de um elemento de aquecimento ativo, e não a falhas no algoritmo implementado. De modo semelhante, o controle de umidade demonstrou bom desempenho dentro das condições experimentais, reforçando a adequação da estratégia adotada.

Além dos resultados obtidos para o controle térmico e de umidade do ar, o controle de iluminação mostrou-se preciso e estável, executando as transições de ligar e desligar exatamente nos horários configurados pelo usuário, o que confirma a confiabilidade do RTC e da lógica de agendamento implementada. A análise dos registros de operação evidencia que o atuador responde sem atrasos perceptíveis e mantém o fotoperíodo programado de forma rigorosa, garantindo as condições configuradas para o desenvolvimento das plantas.

No que diz respeito à irrigação, o sistema respondeu corretamente aos limiares de umidade definidos, ativando a bomba somente quando o sensor indicou valores inferiores ao limite de solo configurado. O módulo demonstrou estabilidade e ao evitar acionamentos desnecessários e ao assegurar que a irrigação ocorresse exclusivamente nos momentos de real demanda.

A interface com o usuário, composta pelo display OLED e *encoder* rotativo, mostrou-se funcional e intuitiva, permitindo o ajuste rápido dos parâmetros de operação e a visualização em tempo real das variáveis monitoradas. A comunicação serial via FT232RL possibilitou o registro de dados e a análise posterior do desempenho do sistema, contribuindo para a validação do controle e identificação de possíveis aprimoramentos.

Como principais contribuições, destacam-se a implementação de uma arquitetura modular e de fácil expansão, o uso de recursos de temporização e comunicação adequados, e a integração de sensores ambientais em um sistema embarcado de baixo custo.

Para trabalhos futuros, sugere-se a inclusão de um módulo de aquecimento para atuação em baixas temperaturas, um desumidificador para períodos de alta concentração de umidade no ar, a ampliação do número de variáveis monitoradas, como luminosidade e concentração de CO₂, e a integração de um sistema de supervisão remota via rede, possibilitando a configuração, controle e registro em tempo real através de uma interface web ou aplicativo móvel.

Assim, conclui-se que o sistema desenvolvido atingiu plenamente os objetivos propostos, apresentando desempenho satisfatório, operação estável e potencial de aplicação prática em ambientes de cultivo controlado, além de servir como base para futuras pesquisas e aprimoramentos em sistemas de automação agrícola.

REFERÊNCIAS

- AMPIM, Peter A. Y.; OBENG, Eric; OLVERA-GONZALEZ, Ernesto. Indoor Vegetable Production: An Alternative Approach to Increasing Cultivation. *Plants*, v. 11, n. 21, 2022.
- BAZANELLA, Alexandre Sanfelice; DA SILVA JUNIOR, João Manoel Gomes. **Sistemas de Controle: princípios e métodos de projeto**. UFRGS, 2005.
- BENKE, Kurt; TOMKINS, Bruce. Future Food-Production Systems: Vertical Farming and Controlled-Environment Agriculture. **Sustainability: Science, Practice and Policy** 13, no. 1, 13–26, 2018.
- BORGES, Ibsen Beserra. **Protótipo de sensor de umidade do solo**. 2024.
- BOSCH SENSORTEC. **BME280 – Combined humidity and pressure sensor: Datasheet**. Version 1.24. Reutlingen: Bosch Sensortec GmbH, 2024. 60 p. Disponível em: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>. Acesso em: 20 maio 2024.
- BUSKE, Taise Cristine. **Comportamento da umidade do solo determinada por métodos expeditos**. 2013. 67f. 2013. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2013.
- Eletrogate. **Display OLED 128x64 0.96” I2C**, 2024. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/display-oled-0-96-i2c-azul>. Acesso em: 22 maio 2024.
- Eletrogate. **Módulo Relé 4 Canais 5V com Optoacoplador**, 2024. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/modulo-rele-4-canais-5v>. Acesso em 22 maio 2024.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **The future of food and agriculture – Trends and challenges**. Rome, 2017.
- FTDI. **FT232R USB UART IC Datasheet**. Version 2.16, 2020. Disponível em: https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/08/DS_FT232R.pdf. Acesso em: 01 dez. 2025.
- JAVAID, Mohd; HALEEM, Abid; RAB, Shanay; SINGH, Ravi Pratap; SUMAN, Rajiv. Sensors for daily life: A review. **Sensors International**, v. 2, 2021.
- Joy-it. **Rotary Encoder KY-040 Datasheet**, 2017. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1648739/JOY-IT/KY-040.html>. Acesso em: 22 maio 2024.
- KATSUHIKO, Ogata. Engenharia de controle moderno. **KATSUHIKO Ogata, 5th Ed. 801p**, 2011.
- LAMB, Frank. **Industrial automation: hands-on**. McGraw-Hill Education, 2013.

LILIANE, Tandzi Ngoune; CHARLES, Mutengwa Shelton. Factors Affecting Yield of Crops. **Agronomy - Climate Change and Food Security**, 2020.

MAKERHERO®. **Placa FTDI FT232RL Conversor USB Serial**. [S. l.]: MakerHero, 2025. Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/placa-ftdi-ft232rl-conversor-usb-serial>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ROCHA, Luís Augusto Gomes; DA SILVA, Barbara Aparecida Romão; COSTA, Daryelen Inês. Comparação de desempenho de sensores de baixo custo com sensores comerciais para a coleta de dados ambientais. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 15, n. 4, 2019.

ROMANINI, Carlos EB; GARCIA, Angel P; ALVARADO, Leonardo M; CAPPELLI, Nelson L; UMEZU, Claudio K. Desenvolvimento e simulação de um sistema avançado de controle ambiental em cultivo protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 1194-1201, 2010.

SILVA, Márcio Albuquerque Moreira da. **Rede de sensores para aplicação em agricultura: um estudo de caso**. 2009.

SmartKits. **Módulo sensor de Pressão Temperatura e Umidade GY-BME280 5V**, 2024. Disponível em: <https://www.smartkits.com.br/sensor-de-pessao-temperatura-e-umidade-gy-bme280-5v>. Acesso em: 22 maio 2024.

SOLOMON SYSTECH LIMITED. **SSD1306: 128×64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller**. Rev. 1.1. Hong Kong: Solomon Systech Limited, abr. 2008. Disponível em: https://soldered.com/productdata/2022/03/Soldered_SSD1306_datasheet.pdf. Acesso em: 20 maio 2024.

STM32-base. **Blue Pill – STM32F103C8T6**. Disponível em: <https://stm32-base.org/boards/STM32F103C8T6-Blue-Pill.html>. Acesso em: 31 out. 2025.

STMICROELECTRONICS. **STM32F103x8 Datasheet – Medium-density performance line ARM®-based 32-bit MCU**. Geneva: STMicroelectronics, 2025. 113 p. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>. Acesso em: 20 set. 2025.

TANENBAUM, A. S. **Organização Estruturada De Computadores**. 5. ed. [S.l.]: Pearson - Addison Wesley, 2006.

TrolMaster. **Controlador Hydro-X HCS-1**, 2019. Disponível em: <https://www.trolmaster.com/Products/Details/HCS-1>. Acesso em: 20 maio 2024.

Usinainfo. **Sensor de umidade do solo HD-38**, 2024. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-solo/sensor-de-umidade-do-solo-arduino-hd-38-5475.html>. Acesso em: 22 maio 2024.

Vivosun. **Controlador GrowHub E42A**, 2023. Disponível em: https://vivosun.com/vivosun-growhub-controller-all-in-one-platform-for-controlling-monitoring-improving-indoor-growing-dynamic-temperature-humidity-scheduling-p90271565918111668-v90271565918111658?_lf=nav. Acesso em: 20 maio 2024.