TRABALHO DE GRADUAÇÃO

CONTROLE DA TEMPERATURA NO CRESCIMENTO EM ESTUFA DEMONSTRATIVA DE MUDAS DE COUVE MANTEIGA

André de Lima e Silva Mariano

Brasília, Dezembro de 2020

ENGENHARIA
MECATRÔNICA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASILIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

CONTROLE DA TEMPERATURA NO CRESCIMENTO EM ESTUFA DEMONSTRATIVA DE MUDAS DE COUVE MANTEIGA

André de Lima e Silva Mariano

Relatório submetido como requisito parcial de obtenção de grau de Engenheiro de Controle e Automação

Banca Examinadora

Prof. Adolfo Bauchspiess, ENE/UnB _____
Orientador

Lélio Ribeiro Soares Júnior _____
Examinador interno

João Manoel Dias Pimenta _____
Examinador interno

Brasília, Dezembro de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

André L. S. Mariano
Controle da Temperatura no Crescimento em Estufa Demonstrativa de Mudas de Couve Manteiga,

[Distrito Federal] 2020.

viii, 149p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2020). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Controle 2.Cultivo protegido
3. Identificação de sistemas 4.Microcontrolador

I. Mecatrônica/FT/UnB II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

A. MARIANO (2020). Controle da Temperatura no Crescimento em Estufa Demonstrativa de Mudas de Couve Manteiga, Publicação FT.TG-$n°$08, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: André de Lima e Silva Mariano

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Controle da Temperatura no Crescimento em Estufa Demonstrativa de Mudas de Couve Manteiga.

GRAU: Engenheiro ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

André de Lima e Silva Mariano

SMPW Quadra 16 Conjunto 5 Lote 8 Casa 4

71741-605 Brasília – DF – Brasil.

RESUMO

O cultivo protegido é incapaz de atingir seu potencial máximo sem um controle adequado das variáveis climáticas. Nesse trabalho, o efeito do controle de temperatura sobre a velocidade de crescimento de mudas de couve-manteiga (*Brassica oleracea var. acephala*) foi estudado. Constatou-se uma relação positiva entre o aumento da temperatura de cultivo e a velocidade de crescimento das mudas, até um limite a partir do qual a relação se torna negativa. O valor exato do limite não foi encontrado mas é próximo de $30°C$. Considerações foram feitas sobre a causa da inversão dessa relação. Foi desenvolvida uma metodologia simples e acessível para modelagem do sistema térmico e projeto de controlador bom (erro $< 2.5\%$) em malha fechada de uma estufa pequena ($1.5m^3$).

Palavras-chave: controle, microcontrolador, identificação, estufa, cultivo protegido, germinação, crescimento de plantas.

ABSTRACT

SUMÁRIO

1 Introdução 1

2 Construção da Estufa 2

2.1 Projeto Mecânico 2

2.2 Projeto Elétrico 3

2.3 Projeto de *Software* 4

3 Instrumentação 7

3.1 Arduino Uno 7

3.2 LM35 8

3.3 DS18B20 10

3.4 DHT22 10

4 Controle 11

4.1 Modelagem e Identificação do Sistema 11

4.2 Projeto do Controlador 14

4.3 Resultados do Controlador 17

5 Métodos de Teste 18

5.1 Técnica de Plantio 19

5.1.1 Teste 1 20

5.1.2 Teste 2 21

5.1.3 Teste 3 21

6 Resultados e Discussão 23

6.1 Teste 1 24

6.2 Teste 2 24

6.3 Teste 3 25

7 Conclusões 28

7.1 Perspectivas Futuras 28

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 30

LISTA DE FIGURAS

2.1 Face frontal da estufa. 3
2.2 Entrada de ar da estufa. Resistor de 400W no centro, ventilador no fundo. 4
2.3 Encapsulamento de componentes eletrônicos da estufa. 5
2.4 Esquemático geral da estufa. 6

3.1 Leituras do LM35 sem filtro. 8
3.2 Esquemático do circuito de conexão com o sensor. 9
3.3 Leituras do LM35 com filtro. 9

4.1 Experimentos de identificação do sistema. 12
4.2 Resultado dos testes de identificação. 13
4.3 Caption 14
4.4 Controlador em malha aberta. 15
4.5 Controlador em malha fechada com termo integral. 16
4.6 Modelo do sistema controlado em diagrama de blocos. 16
4.7 17

5.1 Sementes usadas nos testes. 19
5.2 Sementes durante o processo de germinação. 20

6.1 Maior muda de couve coletada do teste 1. Detalhe de 10mm na imagem para comparação de tamanho. 25
6.2 Mudas de couve pequenas e queimadas do teste 2. 26
6.3 Mudas de couve do teste 3 no dia da coleta. 26

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

PWM	*Pulse width modulation*
PVC	*Polyvinyl chloride*
LED	*Light-Emitting Diode*
SSR	*Solid State Relay*
USB	*Universal serial bus*
IDE	*Integrated development environment*
RAM	*Random access memory*
PRBS	*Pseudo-random binary signal*
T'	Diferença entre temperatura interna e externa
DP	Desvio padrão

Capítulo 1

Introdução

A história de práticas agrícolas da humanidade moldou de muitos modos diferentes o desenvolvimento da agricultura moderna.[1] O plantio de grande parte dos alimentos vegetais no Brasil ainda é feito ao ar livre, sem nenhuma forma de controle das variáveis climáticas a que está submetido o crescimento das plantas. Muita energia, esforço e investimentos já foram destinados à pesquisa agrícola no nosso país e muita tecnologia já é usada para, por exemplo, aumentar a produtividade dos hectares plantados em até seis vezes em relação a meados do século passado e diminuir os efeitos ambientalmente degradantes do cultivo em larga escala.[2] No caso em que o foco do plantio é unicamente a rentabilidade, os níveis de qualidade atingidos por esse método são aceitáveis. Porém no caso em que o foco do plantio é a qualidade do produto final, e especialmente com as crescentes expectativas globais por métodos de plantio mais eficientes e com menos impacto ambiental, o dito cultivo protegido (sob camada de plástico ou vidro, em oposição a cultivo ao ar livre) se prova mais adequado.

O crescimento de uma planta a partir da semente ocorre em etapas. A primeira é chamada de germinação e é o processo que transforma uma semente em uma muda (também chamada de plântula). Ainda não se sabe exatamente qual evento fisiológico inicia ou finaliza a germinação.[3] Apesar disso a etapa de germinação já foi extensivamente estudada quantitativamente.[4] O papel que a germinação desempenha no desenvolvimento da planta é fundamental para o cultivo, e maximizar a taxa de sobrevivência de mudas deve ser um dos objetivos de um cultivador dedicado.

A taxa fotossintética é uma medida da velocidade do crescimento de plantas. Dos fatores que contribuem para o aumento consistente dessa taxa se destaca o controle sobre as variáveis climáticas (temperatura e umidade relativa do ar), que só é possível no ambiente fechado de uma estufa.[5][6] A taxa fotossintética se relaciona proporcionalmente com o crescimento, e portanto o tamanho da planta. A medição dela nesse trabalho é feita a partir do tamanho final das mudas, 28 dias após o fim da germinação.

Este estudo alveja quantificar o efeito da temperatura sobre a taxa fotossintética de mudas de Couve-Manteiga, crescidas dentro de uma estufa demonstrativa.

Capítulo 2

Construção da Estufa

2.1 Projeto Mecânico

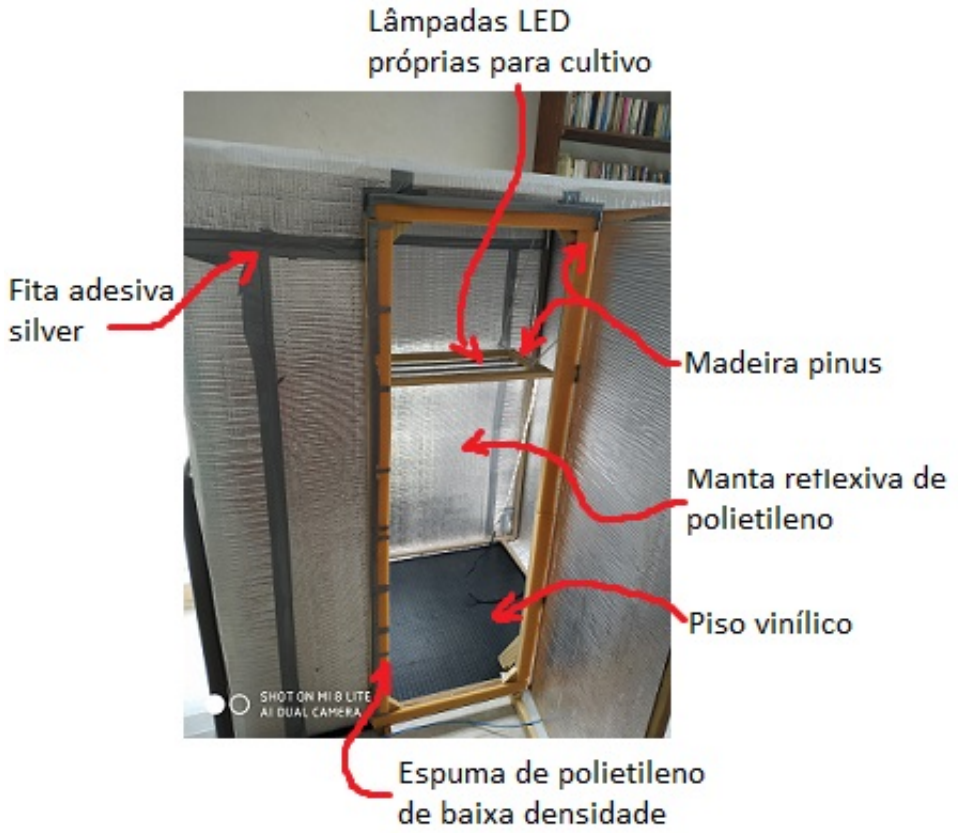
A estrutura de suporte físico (daqui em diante chamada de esqueleto) da estufa foi construída com canos de PVC de $25mm$ de diâmetro em formato paralelepipedal. Para as junções e curvas do cano, foram usados conectores de 90 graus e conectores T. Para garantir confiabilidade à estrutura, algumas das junções foram coladas usando cola especial para PVC. As junções com os canos que formam as arestas verticais do esqueleto não foram coladas a fim de permitir sua eventual desmontagem.

Esse esqueleto não precisa sustentar muito peso: apenas a manta térmica e as lâmpadas de LED. A baixa exigência de sustentação de peso sobre a estrutura e o baixo preço do PVC justificaram a escolha do material, que se provou extremamente adequado. A montagem pode ser vista na figura 2.1.

A cobertura do volume da estufa e isolamento térmico do resto do ambiente foram feitos usando manta de polietileno Protelhado da empresa Promaflex. Essa manta é revestida nas duas faces com papel alumínio, o que aumenta sua durabilidade e garante reflexividade à manta. Para a aplicação, reflexividade é uma característica essencial, visto que diminui a absorbância da luz por parte das paredes e aumenta a absorbância efetiva da luz por parte das plantas. O formato paralelepipedal da manta foi confeccionado unindo-se as faces da manta com fita adesiva tipo silvertape para garantir resistência mecânica. Além disso, foi usada cola silicone para garantir a vedação do ambiente interior.

A fim de tornar acessível o interior da estufa, foi construído um portal e uma porta, ambos em madeira Pinus. A vedação da conexão entre o portal e a manta foi feita com espuma de poliuretano de baixa densidade.

Figura 2.1: Face frontal da estufa.



2.2 Projeto Elétrico

O projeto elétrico se resume a três itens: aquecimento e iluminação, circulação de ar e sensoriamento. A separação desses itens é feita por potência: aquecimento e iluminação são circuitos de alta potência, alimentados diretamente pela rede elétrica de $220V$, circulação de ar é um circuito de média potência, alimentado por fonte chaveada de $12V$ e o sensoriamento é um circuito eletrônico de baixa potência que inclui os sensores, uma placa de alimentação e amplificação de sinal, o microcontrolador responsável por ler os dados dos sensores e um módulo de tempo real. Este circuito é alimentado por uma fonte de tensão contínua de $12V$ e $1A$. Mais detalhes sobre o circuito eletrônico podem ser encontrados na seção Instrumentação.

O aquecimento da estufa foi confeccionado com um resistor de forno de potência nominal de $400W$ e um ventilador estilo *cooler* de processador de computador de $12V$ e $9cm$ de diâmetro e $2900RPM$ nominais. A corrente que circula pelo resistor quando ligado diretamente à rede de $220V$ é de $1.82A$. Para conferir a capacidade de pequenos ajustes à potência de aquecimento, foi usada tecnologia PWM modulando a alimentação do resistor. Como essa tecnologia envolve chaveamento em frequência alta demais para um relé convencional ($490Hz$), foi usado um relé de estado sólido (SSR - *Solid State Relay*) G3BM-202P para aplicar o chaveamento. O ventilador também é responsável pela renovação do ar da estufa. Esse aquecedor pode ser visto na figura 2.2.

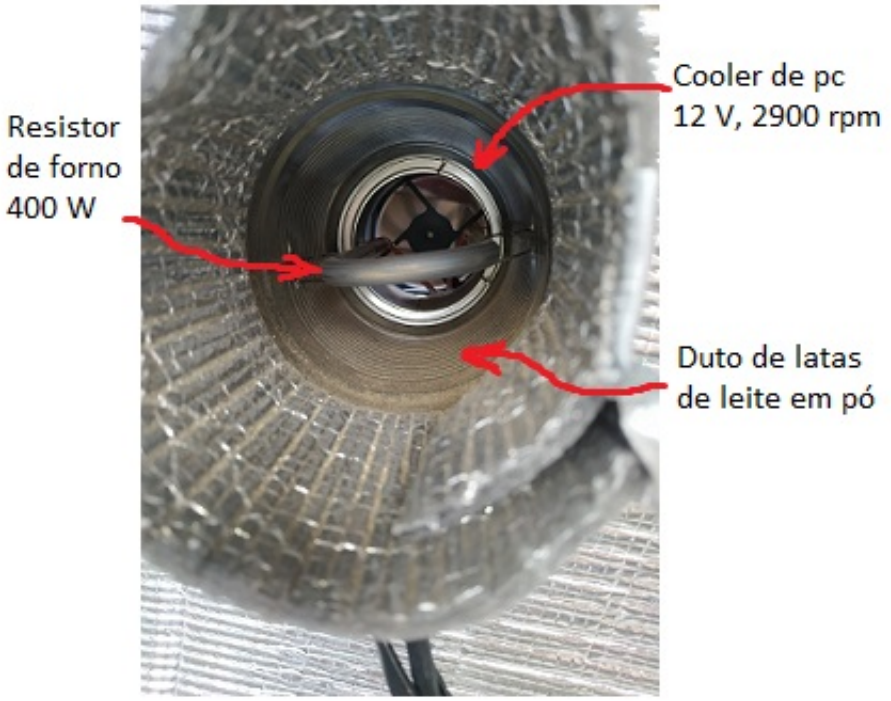


Figura 2.2: Entrada de ar da estufa. Resistor de 400W no centro, ventilador no fundo.

O esquemático elétrico que mostra todas as conexões feitas para o projeto da estufa pode ser visto na figura 2.4 e as conexões físicas podem ser vistas na figura 2.3.

2.3 Projeto de *Software*

O microcontrolador da estufa deve exercer todas as tarefas básicas necessárias para o funcionamento da estufa. São elas:

1. Coletar periodicamente dados elétricos dos sensores, filtrá-los, codificá-los e enviá-los através da porta serial para o computador onde são armazenados
2. Ligar e desligar as lâmpadas com horário preciso para cumprir a realização do fotoperíodo de 12h
3. Receber, interpretar e reagir a comandos enviados pelo computador através da porta serial
4. Guardar persistemente os parâmetros de funcionamento da estufa, como a temperatura de referência para o controlador e os horários de ligar e desligar as lâmpadas

O programa que roda no microcontrolador executa todas essas tarefas. Por causa disso, daqui em diante ele será chamado de sistema operacional.

Figura 2.3: Encapsulamento de componentes eletrônicos da estufa.

Além do sistema operacional, também foram desenvolvidos alguns *scripts* para fazer uma interface entre o computador a estufa. Esses *scripts* foram escritos em Python 3 e não contam com interface gráfica, apenas um terminal. Eles foram feitos para aplicar os testes térmicos de identificação de sistema e armazenar em disco rígido os dados gerados pela estufa. Uma linguagem simples de comandos foi implementada para permitir a verificação e configuração de alguns dos parâmetros de funcionamento da estufa, como a temperatura de referência para o controlador, os horários de ligar e desligar as lâmpadas e a potência de aquecimento. Outros parâmetros de funcionamento, como a largura da janela do filtro de mediana e o intervalo de amostragem só podem ser alterados pelo código e requisitam nova compilação e envio para o microprocessador.

Todos os códigos desenvolvidos estão disponíveis em:

https://github.com/Magnotta/Estufa

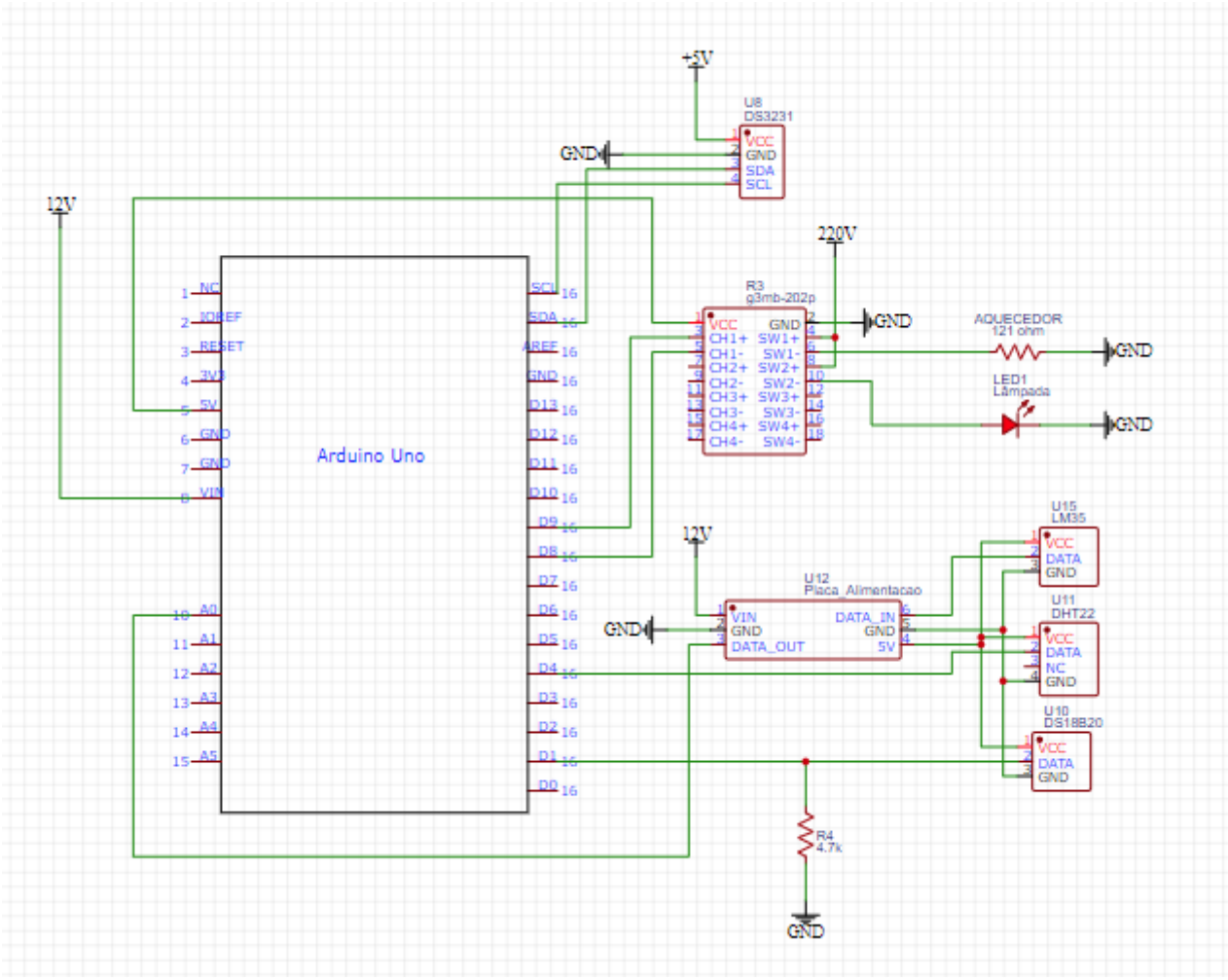


Figura 2.4: Esquemático geral da estufa.

Capítulo 3

Instrumentação

O projeto eletrônico foi iniciado pela escolha de uma placa Arduino Uno para desempenhar o papel de microcontrolador da estufa. Ele é o dispositivo responsável pelas funções de ler os dados dos sensores, calcular a potência necessária para o resistor de aquecimento, controlar o chaveamento no resistor, ligar e desligar as lâmpadas para cumprir o fotoperíodo e realizar a comunicação com o usuário.

Para o cálculo da potência do resistor de aquecimento, são utilizados dois pontos de medição de temperatura: um interno à estufa e outro externo. Essas informações sobre a temperatura interna e externa são úteis para determinar a quantidade de calor dissipada pela manta, mas outro ponto de medição interno (na saída de ar) é útil para avaliar o gradiente vertical de temperatura na estufa. Esse gradiente de temperatura é fortemente afetado pelo aquecimento proveniente da lâmpada quando esta está ligada.

Os sensores usados para pedir a temperatura nos três pontos foram um DS18B20, DHT22 e LM35, na parte de fora da estufa, na parte interna e na saída de ar, respectivamente. A escolha destes dispositivos foi motivada pela experimentação de modelos diferentes de sensores para desenvolver conhecimento acerca de suas funcionalidades e capacidades. A conexão elétrica com os sensores foi feita com cabo de rede *ethernet*, que não tem nenhuma forma de proteção para o sinal contra interferência eletromagnética.

3.1 Arduino Uno

Arduino é uma plataforma eletrônica *open-source* pautada principalmente na facilidade de uso. É importante ressaltar que dois produtos diferentes recebem o mesmo nome Arduino: a placa de circuito impresso e a *IDE*. Todo o código usado no *firmware* desse projeto foi escrito, testado e carregado para a placa usando a IDE Arduino. Quanto à placa física, existem vários modelos vendidos. Nesse projeto, foi usado o modelo Arduino Uno.

Existem muitas diferenças entre os modelos de placas Arduino, como a quantidade de pinos e de interfaces seriais, tamanho dos blocos de memória RAM e de código e dimensões físicas. As

características da placa Uno relevantes para esse projeto são discutidas no parágrafo seguinte.

A placa Arduino Uno conta com 14 pinos digitais de uso geral (dos quais 6 podem gerar sinais PWM a 490Hz), 6 conversores analógico-digital de 10 bits, 1 interface I^2C padrão, 1 soquete USB e 1 plugue P4 de entrada de energia.

3.2 LM35

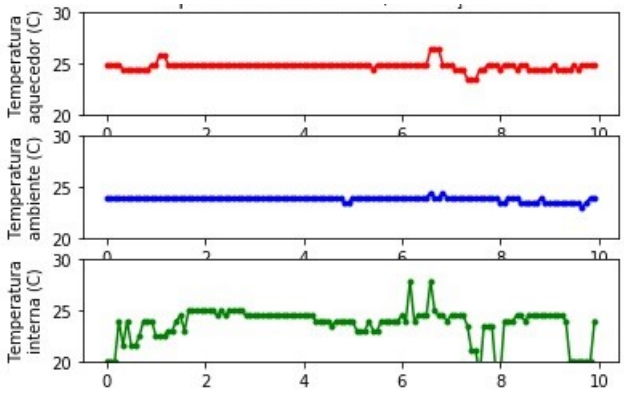


Figura 3.1: Leituras do LM35 sem filtro.

O sensor de temperatura LM35 é particularmente pequeno, simples de usar e barato. Ele é produzido num encapsulamento TO-92, só tem três pinos (Vin, Data, Gnd) e custa algo entre 7 e 15 reais. Esse sensor tem precisão de temperatura de $0.5°C$.

Porém, esse sensor tem algumas desvantagens operacionais. Primeiramente, ele é um sensor analógico, o que significa que sua transmissão de dados pode ser afetada por interferência eletromagnetica, a depender da distância cabeada do sensor até o microcontrolador. Pode-se ver essa relação na figura 3.1, que mostra 3 curvas de leituras de 3 sensores LM35 conectados por diferentes comprimentos de cabo. As curvas foram tomadas com as seguintes distâncias do microcontrolador:

- Curva vermelha: aproximadamente 35cm
- Curva azul: aproximadamente 5cm
- Curva verde: aproximadamente 2m

Como o ventilador do aquecedor é alimentado por uma fonte de $12V$ chaveada e é conectado por aproximadamente $1M$ de cabo, as leituras do sensor eram muito ruidosas. Além disso, a saída de dados do sensor é uma tensão elétrica que varia linearmente com a temperatura do encapsulamento, com coeficiente angular de 10mV/°C. Os pinos de entrada analógica do arduino possuem limite de tensão de leitura de $5V$ e conversão digital de 10 bits, o que resulta em 1023 valores possíveis. Assim, a mínima variação que o arduino é capaz de representar digitalmente é de $5/1023 \approx 4.887mV$. Desta forma, as leituras de temperatura são quantizadas em múltiplos de $0.4887°C$, um valor grande que acarreta num erro de quantização alto.

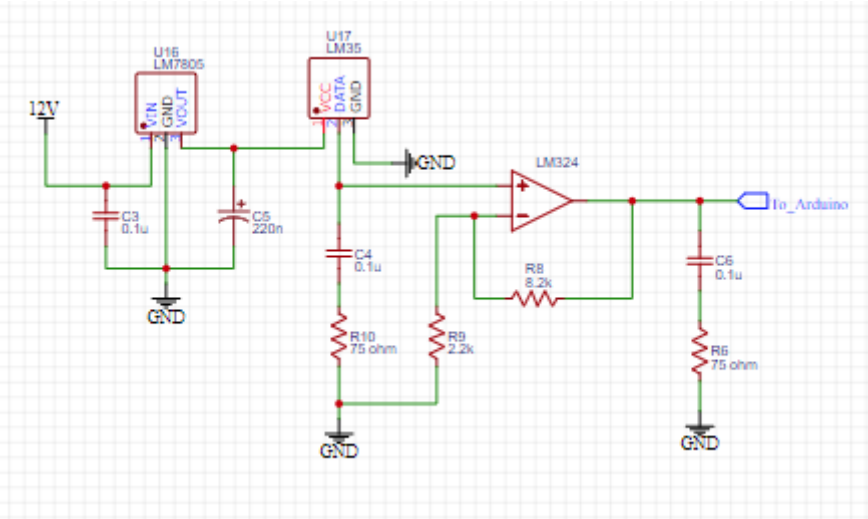


Figura 3.2: Esquemático do circuito de conexão com o sensor.

Para solucionar estes dois problemas, foi projetado e montado um circuito elétrico para conectar o sensor ao arduino. Este circuito conta com regulação ativa de tensão para a alimentação dos sensores (LM7805), além de um filtro RC passa-baixas (recomendado pelo fabricante do sensor) e também um circuito multiplicador de tensão para a saída de dados do sensor. O projeto desse circuito foi baseado parcialmente nos estudos do livro Microeletrônica [7]. O circuito pode ser visto na figura 3.2. O ganho usado no multiplicador foi de 4.73, o que resulta numa quantização de temperatura de $0.4887/4.73 \approx 0.1033°C$. Além desse filtro RC elétrico, também é usado um filtro de mediana de largura de 5 leituras para fazer uma filtragem por *software* de todas as leituras do LM35.

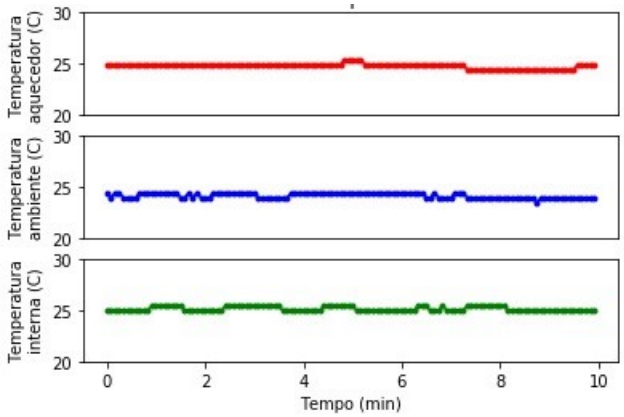


Figura 3.3: Leituras do LM35 com filtro.

A figura 3.3 mostra curvas de leituras dos mesmos sensores às mesmas distâncias da figura 3.1 mas com o filtro passa-baixas elétrico. Pode-se ver uma grande redução do ruído causada pela incorporação do filtro.

Esse sensor foi posicionado no interior da saída de ar da estufa.

3.3 DS18B20

O sensor de temperatura DS18B20 tem muitas similaridades com o LM35: ambos sensores só necessitam de três fios, têm mesma precisão e faixa de funcionamento e custam menos de 20 reais.

Uma diferença fundamental entre o LM35 e o DS18B20 é que este sensor é digital, e portanto não é afetado por interferência eletromagnética. Com a experiência do sensor discutido anteriormente era de se esperar que a natureza digital deste sensor resultasse em leituras menos ruidosas. Porém esse não foi o caso. As leituras ficaram quase tão ruidosas quanto as do LM35 e mesmo sendo filtradas por *software* ainda variavam bastante.

Esse sensor foi posicionado no exterior da entrada de ar da estufa.

3.4 DHT22

O sensor digital de temperatura e umidade relativa do ar DHT22 é o componente eletrônico mais caro da estufa. As leituras de temperatura capturadas por ele só apresentaram ruído no bit menos significativo, o que é um desempenho muito superior aos outros sensores mesmo após filtragem. As leituras de umidade relativa são usadas na discussão deste trabalho apenas qualitativamente e não foram verificadas com outros sensores calibrados. Assim como os outros sensores, a precisão de temperatura é de $0.5°C$.

Esse sensor foi posicionado no interior da estufa, na altura das plantas.

Capítulo 4

Controle

O controle da temperatura do ar no ambiente de crescimento das plantas é a hipótese central desse estudo. O projeto do controlador recebe muita atenção nesse relatório, e seus resultados são detalhadamente estudados.

A modelagem matemática do sistema térmico da estufa foi o primeiro passo tomado no projeto do controlador. Ele consiste de buscar equações físicas que descrevam o comportamento da estufa e, principalmente, descrevam a forma com que a temperatura interna varia de acordo com a atuação do aquecedor.

A implementação do controlador foi feita em linguagem Arduino. O cálculo da ação de controle é feito pela função *tempController* do código do sistema operacional.

4.1 Modelagem e Identificação do Sistema

A primeira tentativa de se alcançar um modelo matemático para representar o sistema térmico da estufa foi por uma identificação de função de transferência no domínio da frequência. Essa tentativa acabou se provando falha e não gerou resultados práticos, mas será discutida aqui pela experiência.

A estratégia consistiu de aplicar um sinal PRBS à potência de aquecimento durante horas e usar o formato da resposta do sistema para aproximar uma função de transferência. Foram feitos dois experimentos com sinal PRBS em dois dias diferentes, ambos com mais de 10 horas de duração. A análise dos resultados e cálculo do modelo foram feitos no programa Matlab, usando a *System Identification toolbox*. O resultado de um dos experimentos foi usado para aproximar a função de transferência e resultado do outro foi usado para validá-la.

O modelo alcançado por esta estratégia não representou o sistema muito bem e foi descartado antes de passar por teste prático. A maior taxa de adesão (*fit to data*) aos dados experimentais alcançada foi de apenas 58%.

A segunda tentativa se baseou no balanceamento do fluxo de calor da estufa. Essa estratégia parte do princípio de conservação da energia e numa equação da termodinâmica e foi usada no

projeto final do controlador. Ela é explicada abaixo.

O fluxo de calor pela manta da estufa entre o volume de ar interno à estufa e o externo é função de poucos parâmetros: a condutividade térmica, área superficial e espessura do material e a diferença de temperatura entre esses volumes. A equação simplificada de fluxo de calor da termodinâmica é:

$$\frac{dQ}{dt} = K(Ti - Te)$$

O motivo pelo qual podemos usar a versão simplificada dessa equação é a presunção de homogeneidade da temperatura de todo o volume interno de ar. Por causa do volume pequeno de ar ($1.536m^3$) e presença do ventilador constantemente circulando o ar dentro da estufa e dados os resultados favoráveis do controlador, pode-se considerar que essa hipótese é válida.

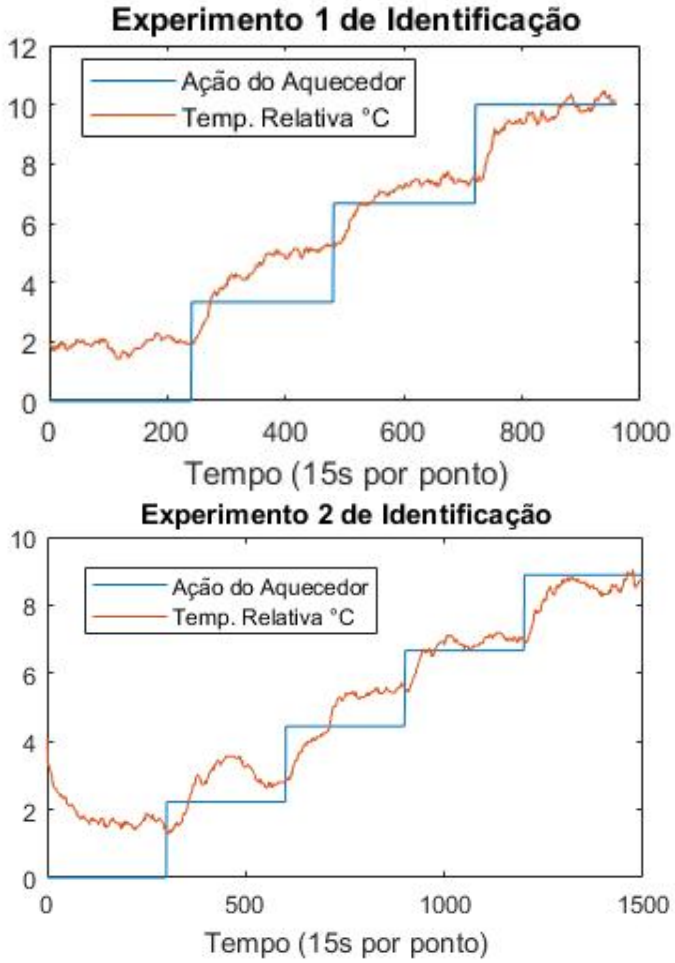


Figura 4.1: Experimentos de identificação do sistema.

Os sensores usados nos testes vieram calibrados de fábrica de acordo com seus respectivos *datasheets*.

Na figura 4.1 é possível ver que a aproximação linear da relação entre fluxo de calor e diferença de temperatura é satisfatória. Então, estimando-se o valor de K pode-se calcular a perda de

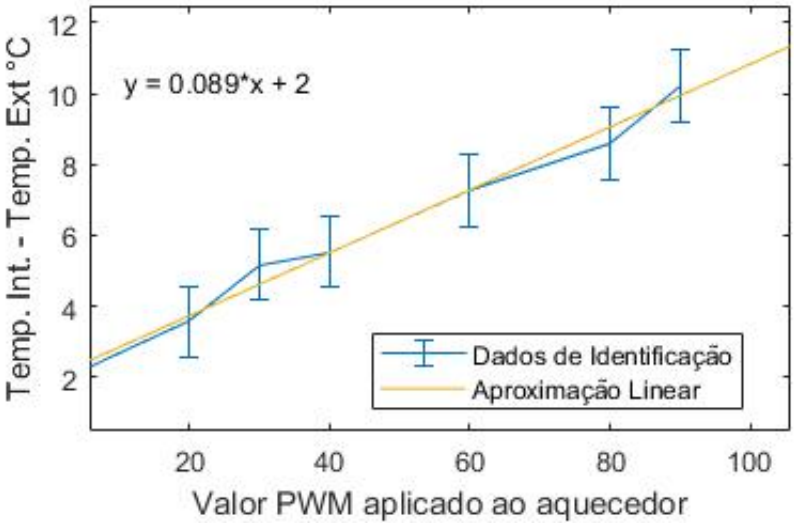


Figura 4.2: Resultado dos testes de identificação.

calor pela manta associada com uma diferença de temperatura entre o interior e o exterior da estufa (daqui em diante, essa diferença será chamada de T'). Invertendo a lógica, também pode-se calcular a variação de T' causada por um fluxo de calor injetado na estufa pelo aquecedor. Com isso, tem-se as fórmulas abaixo:

$$K = \frac{1}{0.089} = 11.236$$

$$A = 11.236(Tref - Te)$$

O resultado A é a quantidade de calor que fluiria pela manta caso a temperatura interna fosse a de referência, e injetando na estufa essa quantidade de calor pode-se forçar a temperatura interna a se aproximar da referência. Como a estufa só possui um aquecedor, e não um resfriador, só é considerado o caso em que a temperatura interna é inferior à externa e há perda de calor para o ambiente.

Dessa forma, o experimento de identificação do sistema consistiu de aplicar alguns degraus de potência ao aquecedor e medir a temperatura de estabilização da estufa para construir um gráfico de T' vs Potência. A aplicação desse teste pode ser vista na figura 4.1 e o gráfico resultante na figura 4.2.

Então, tem-se a equação de balanceamento de fluxo de calor da estufa. Existe ainda uma segunda equação física que relaciona calor e temperatura que é importante para essa modelagem:

$$Q = mc\Delta T$$

Em que Q é a quantidade de calor fornecida, m é a massa sendo aquecida, c é o calor específico do material e ΔT é a variação de temperatura causada pela adição do calor. Os parágrafos abaixo explicam a obtenção do valor de cada uma dessas variáveis.

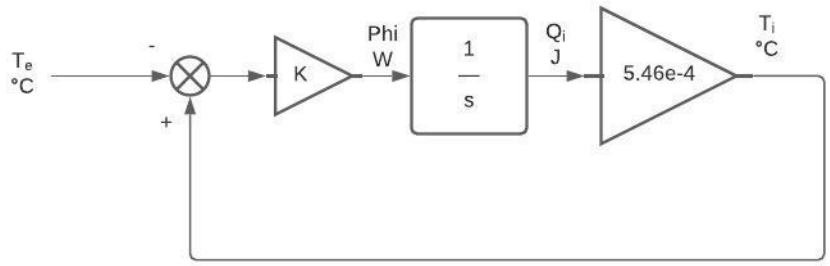


Figura 4.3: Caption

A massa do ar da estufa será calculado pela multiplicação do volume do ar pela sua densidade. O volume da estufa é de $1.536m^3$. A densidade do ar, de acordo com [8], pode ser aproximada por $1.018kg/m^3$. Essa aproximação se sustenta no fato de que a temperatura do ar da estufa varia pouco, ficando sempre próxima de $25°C$.

O calor específico do ar úmido, novamente de acordo com [8], pode ser aproximado por $1010J/kg°C$.

Multiplicando os valores e invertendo os membros, a equação se torna:

$$\Delta T = 0.000564Q$$

Com isso, e considerando a estufa um sistema linear de primeira ordem, o modelo matemático da estufa fica da forma representada na figura 4.3.

4.2 Projeto do Controlador

Mesmo com o gráfico resultante dos experimentos de identificação, é necessário entender os parâmetros da equação. A abordagem do sistema de controle foi feita com os princípios ensinados por Nise em seu livro [9].

Primeiramente, o coeficiente angular da reta de $0.089°C/PWM$ relaciona a potência de aquecimento (eixo x) com T' (eixo y). Vale ressaltar que isso é o inverso do K da equação da termodinâmica. Então para encontrar a constante que multiplica um valor de T' para encontrar a potência necessária para atingir esse valor é $\frac{1}{0.089} \approx 11.24PWM/°C$. Com isso, pela lógica explicada para o controle de temperatura, pode-se aplicar um controle em malha aberta (também chamado de comando numérico) apenas com medições da temperatura externa. Um teste desse controlador pode ser visto na figura 4.4.

Segundamente, a reta de regressão possui um deslocamento vertical de $2°C$. Isso significa que mesmo com o aquecedor desligado, a temperatura interna fica $2°C$ acima da externa, consistentemente entre os 2 experimentos. É necessário entender esse deslocamento para tratá-lo. Ele não é causado pelo ligamento da lâmpada porque ambos os testes foram feitos inteiramente no período

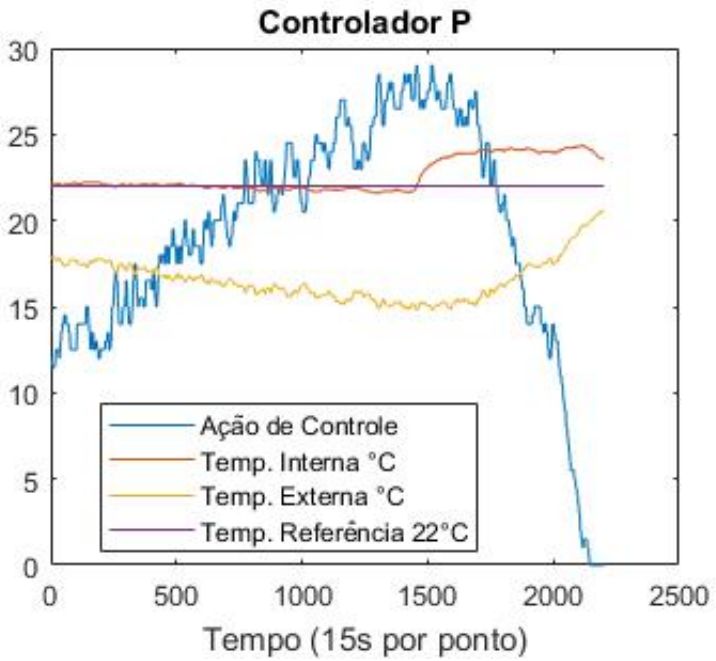


Figura 4.4: Controlador em malha aberta.

noturno a fim de evitar essa interferência. Porém os testes foram feitos enquanto havia plantas crescendo dentro da estufa, a fim de tornar o experimento mais verossímil com o regime de operação. A suposição é que esse deslocamento foi causado pelo metabolismo das plantas. Dessa forma, essa interferência de aquecimento precisa ser também subtraída da temperatura de referência no cálculo da ação de controle.

O comando numérico, em malha aberta, atingiu um resultado bom de regulação da temperatura interna pelos primeiros dois terços do teste. O grande erro do controlador no ponto $x = 1500$ foi causado pelo ligamento da lâmpada dentro da estufa. Como não existe realimentação, o erro criado pelo ligamento da lâmpada não gera nenhum efeito na ação de controle.

Para consertar esse problema, foi introduzido no código do controlador uma condição para reduzir a ação de controle quando a lâmpada estiver ligada. Além disso, também foi fechada a malha de controle usando como realimentação um termo integral do erro. O ganho do termo integral foi ajustado e testado ao longo de alguns dias, com testes intermediários que não estão listados nesse relatório. O ganho final escolhido foi de 0.3, e um teste do controlador resultante pode ser visto na figura 4.5.

A queda súbita na ação de controle no ponto $x = 1500$ representa a reação do controlador ao ligamento da lâmpada. Dessa forma, o modelo matemático do sistema controlado pode ser visto na figura 4.6

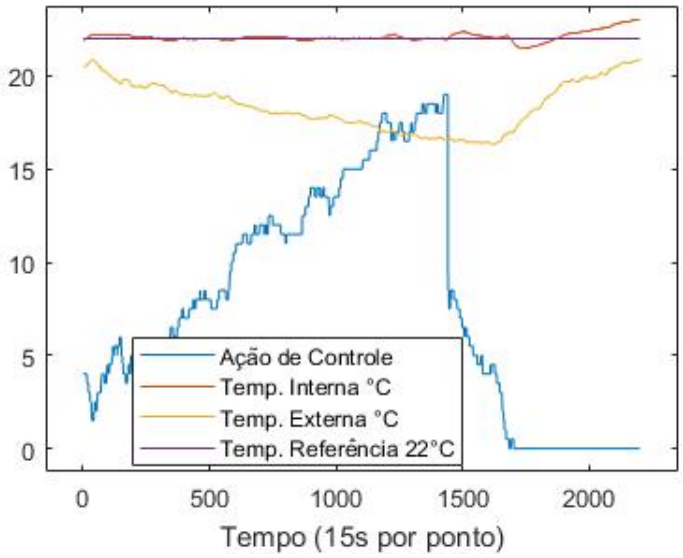


Figura 4.5: Controlador em malha fechada com termo integral.

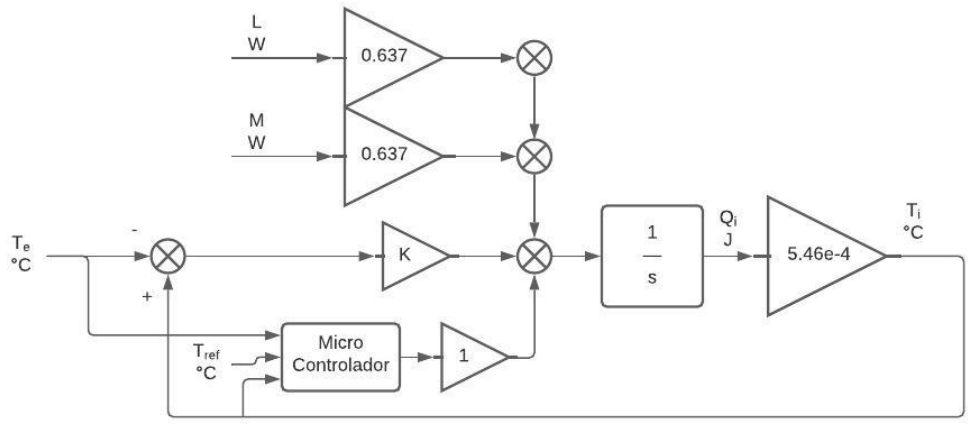


Figura 4.6: Modelo do sistema controlado em diagrama de blocos.

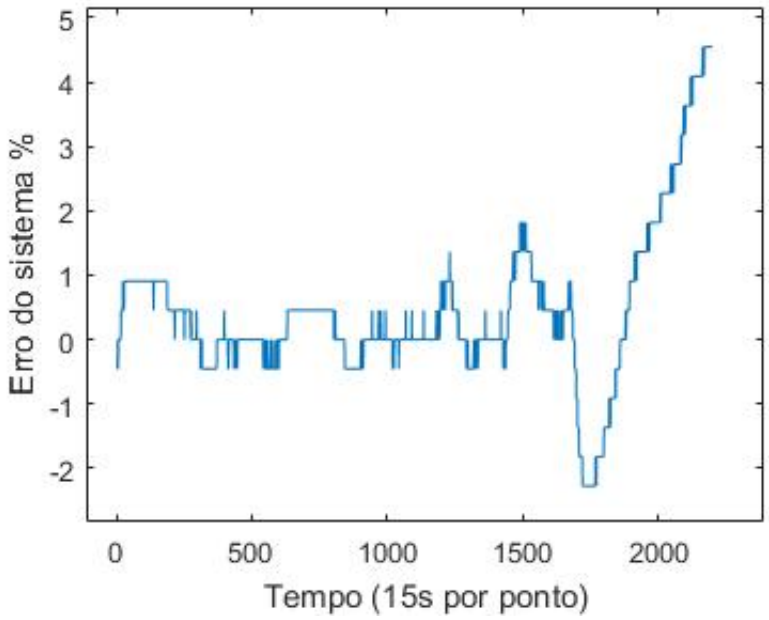


Figura 4.7:

4.3 Resultados do Controlador

O gráfico de erro do sistema alcançado pelo controlador (figura 4.7) diz muito sobre o funcionamento. Primeiramente, pode-se ver que sem a interferência de aquecimento da lâmpada, o erro do sistema ficou menor do que 1%. Após o ligamento da lâmpada, a temperatura oscilou um pouco e atingiu um erro máximo de aproximadamente 2.5%. Vale relembrar que, ao final do teste, quando a temperatura começa a subir, o erro não deve ser contabilizado visto que ele é causado pela subida natural da temperatura externa. O atuador térmico do sistema não é capaz de abaixar a temperatura interna relativa à externa, então esse erro deve ser descartado da análise.

Outra informação importante que deve ser relembrada é que os sensores de temperatura usados no projeto todos têm precisão de $0.5°C$, o que significa que um erro de até 2.27% é inerente ao processo de medição e o controlador fisicamente não poderia gerar um resultado melhor do que isso. Como um erro de magnitude próxima a essa só foi atingido com interferência da lâmpada, podemos dizer que o controlador ficou excelente.

Capítulo 5

Métodos de Teste

Foram feitos três testes de validação da estufa, todos com sementes comerciais de couve-manteiga Isla. Cada um dos testes durou 28 dias após a germinação das sementes e os resultados medidos foram a área superficial e quantidade das folhas e o comprimento do radículo. A área superficial das folhas foi estimada usando a fórmula:

$$A = \frac{(x+y)^2}{4} * \pi$$

Onde x e y são comprimento e largura de cada folha, respectivamente. Essa fórmula pode parecer confusa a princípio mas ela é simplesmente a fórmula da área de um círculo em que o raio do círculo é a média aritmética entre o comprimento e a largura da folha.

Os experimentos foram divididos em dois testes repetidos com regulação de temperatura em torno do ponto de $22°C$ e um teste de controle, sem regulação de temperatura.

O controle da temperatura foi feito apenas no período noturno do fotoperíodo, quando a temperatura exterior à estufa era baixa o suficiente para o aquecedor ter que ser ativado. Durante o período diurno, a temperatura foi regulada naturalmente pelo clima local de Park Way, Brasília. As temperaturas diurnas e noturnas foram medidas em dias aleatórios ao longo de cada teste. A diferenciação entre período noturno e diurno para o propósito desse trabalho se dá pelo ligamento/desligamento das lâmpadas (ligadas às 6h, desligadas às 18h).

Durante todos os testes, a umidade relativa do ar foi monitorada pelo sensor DHT22 mas não foi ativamente controlada. O monitoramento confirmou um dos resultados mais bem-estabelecidos da psicrometria: o aumento da temperatura do ar reduz a umidade relativa. Mesmo assim, a umidade em momento nenhum caiu abaixo de 70%. Durante o período diurno, a umidade ficou sempre acima de 90%. A rega diária e a transpiração das plantas unidas ao pequeno volume de ar contido pela manta foram suficientes para manter esse valor.

Figura 5.1: Sementes usadas nos testes.

5.1 Técnica de Plantio

Os plantios de teste da estufa foram feitos em quatro potes de feltro sintético. O substrato usado para o enraizamento das mudas dos dois últimos testes foi uma mistura de quatro partes de mistura inerte (50% turfa de sphagnum, 50% casca de coco) e 1 parte de perlita expandida.

As sementes usadas para o plantio podem ser vistas na figura 5.1. A taxa de sobrevivência dessas sementes durante o processo de germinação foi de mais de 90%.

A germinação das sementes foi feita envolvendo-as em papel toalha umidecido e fechado em vasilha plástica. Foram adicionadas gotas de percloreto de sódio para evitar infestações fungais no interior da vasilha. Esse processo pode ser visto na figura 5.2.

Todos os nutrientes que alimentaram as plantas foram adicionados através da água de rega, através do uso de fertilizante mineral comercial. A água de rega foi preparada usando água de poço e sua pureza foi medida com sensor de sólidos totais dissolvidos (TDS, do inglês *Total Dissolved*

Figura 5.2: Sementes durante o processo de germinação.

Solids), resultando num valor de $10 \pm 2ppm$. Essa água não é tão pura quanto seria alcançado com um purificador do tipo osmose reversa ou destilador, mas é pura o suficiente para ser comparada com boa parte das operações de cultivo. O pH da água foi medido usando fita medidora de pH, resultando num valor de aproximadamente 7 (barra de erro difícil de estabelecer dada a natureza colorimétrica da leitura da fita medidora).

A preparação da água de rega foi feita adicionando-se $2.5mL$ de fertilizante Remo's Grow e $2.5mL$ de fertilizante Remo's Micro para cada litro de água. Essas quantidades são as indicadas pelo fabricante do fertilizante e essas duas partes (Grow e Micro) possuem todos os nutrientes necessários para o desenvolvimento da planta. Dessa forma, foi possível garantir que as plantas de testes diferentes todas tiveram a mesma disponibilidade de nutrientes durante o crescimento.

A iluminação das plantas foi feita com a lâmpada discutida anteriormente posicionada a $40cm$ de distância do nível do substrato. Essa distância e o fotoperíodo idêntico garantiu a mesma disponibilidade de energia luminosa para as plantas entre os testes.

5.1.1 Teste 1

No teste inicial, realizado dos dias 17 de Agosto a 14 de Setembro, apenas 4 mudas (1 por pote) foram plantadas. Isso foi feito para ter uma estimativa do tamanho final das mudas após os 28 dias de experimento. Como esse tamanho acabou sendo muito menor do que os potes, nos testes subsequentes foram plantadas mais mudas por pote. Além disso, o substrato usado no teste 1 consistiu de apenas a mistura de turfa e casca de coco. Esse substrato demonstrou alta retenção de água. Presume-se que essa característica acabou estrangulando a disponibilidade de oxigênio para as raízes das plantas, porque a adição da perlita nos testes subsequentes melhorou não só a drenagem do substrato como também, supostamente, a velocidade do crescimento das plantas. Uma das mudas morreu durante o experimento. A temperatura de referência do controlador

foi de $22°C$, e esse valor foi mantido durante o período noturno. Durante o diurno, leituras de temperatura em dias aleatórios indicaram uma média de $24°C$, valor consistente com os dados meteorológicos da região. Resultados desse teste na tabela 5.1.1.

Tabela 5.1.1: Resultados do teste 1.

	Qnt. de Folhas	Maior folha	2° maior folha	3° maior folha	Comprimento do radículo
Planta 1	6	27.34	18.10	2.99	11.3
Planta 2	4	12.57	9.62	8.55	5.0
Planta 3	5	4.15	3.14	0.86	3.6
Média	5	14.69	10.29	4.13	6.63
DP	1	11.74	7.50	3.97	4.10
Unidades	-	cm^2	cm^2	cm^2	cm

Por causa do baixo número de indivíduos nesse teste, a análise dos dados ficou restrita.

5.1.2 Teste 2

O segundo teste foi realizado nos dias 23 de Setembro a 21 de Outubro. Ele consistiu do plantio de 16 mudas (4 por pote). Nele foi mantida a temperatura de referência de $22°C$, mas isso se provou um erro. A temperatura ambiente local no período foi alta, atingindo a máxima do ano na semana do dia 29 de Setembro. [10] As temperaturas durante todos os 28 dias do experimento foram altas e o controle de temperatura só ativou o aquecedor durante uma parte muito pequena do tempo. As leituras de temperatura diurnas indicaram uma média de $26°C$, com máxima temperatura interna registrada de $33°C$.

Esse recorde de temperaturas acabou matando muitas das mudas plantadas, e a maioria das que não morreram foram severamente queimadas e se tornaram quebradiças, impossibilitando a medição do seu comprimento real. Por causa disso, do ponto de vista desse trabalho, analisar quantitativamente os resultados desse teste seria um erro. Ao invés disso, esse resultado trágico levanta uma das principais conclusões do trabalho, discutidas na última seção.

5.1.3 Teste 3

O terceiro teste foi realizado nos dias 13 de Novembro a 11 de Dezembro. Como esse teste serviu de controle, o aquecedor foi desligado. A regulação da temperatura foi feita naturalmente pelo clima local. Nesse teste foram plantadas 12 mudas (3 por pote). As temperaturas diurnas medidas resultaram numa média de $25°C$. Os resultados desse teste podem ser vistos na tabela 5.1.3.

Tabela 5.1.2: Resultados do teste 2.

	Qnt. de Folhas	Maior folha	2° maior folha	3° maior folha	Comprimento do radículo
Planta 1	6	11.34	7.07	5.11	9.5
Planta 2	5	11.64	11.04	4.71	5.2
Planta 3	6	4.52	2.41	1.77	5.9
Planta 4	4	2.14	1.89	0.33	7.3
Planta 5	6	6.38	4.16	3.14	4.7
Planta 6	5	3.46	3.30	1.89	5.1
Planta 7	4	7.31	2.99	2.55	5.6
Planta 8	5	2.27	1.13	1.04	5.9
Planta 9	5	6.61	6.16	5.31	9.1
Planta 10	5	1.23	0.64	0.44	5.1
Planta 11	5	0.79	0.57	0.39	3.0
Planta 12	4	5.31	0.33	2.41	5.5
Média	5.08	5.25	3.47	2.42	5.99
DP	0.67	3.61	3.21	1.82	1.83
Unidades	-	cm^2	cm^2	cm^2	cm

Capítulo 6

Resultados e Discussão

O crescimento das plantas visto e medido nesse trabalho está discutivelmente de acordo com o esperado: o aumento da temperatura noturna afetou positivamente, de forma geral, o crescimento das plantas. Apesar disso, todas as mudas cultivadas sofreram algum nível de queimadura. Isso impactou negativamente o desenvolvimento das plantas e levou a uma das observações mais importantes desse trabalho: para o controle de temperatura de estufas num clima como o de Brasília, o resfriamento é tão importante quanto, se não mais, do que o aquecimento.

A conclusão da importância do resfriamento acarreta outra informação valiosa para esse estudo: a capacidade de dimensionar os sistemas de aquecimento e resfriamento de uma estufa similar. Usando o modelo encontrado para o sistema térmico da estufa, pode-se calcular a potência necessária para o controle de temperatura.

A temperatura interna da estufa mais alta vista no período de testes foi de $33°C$, atingida no dia 4 de Outubro. Como é desejado um controle de temperatura em $22°C$, são necessários:

$$(33 - 22) * 11.236 * 1.569 = 194W$$

para o resfriamento adequado da estufa. Na equação acima, o termo 1.569 é necessário para a conversão de unidades de valor PWM aplicado ao aquecedor para Watts. Ele é necessário porque todos os testes de identificação foram feitos usando o sinal PWM aplicado ao aquecedor como unidade de potência. Porém, tem-se que sinal PWM 255 equivale a 100% de *duty cycle*‘, o que equivale a 400 W de dissipação de calor no resistor. Logo: $400/255 = 1.569$ é o fator que converte de uma unidade para a outra.

Vale ressaltar que esse máximo de temperatura interna ($33°C$) foi atingido enquanto a lâmpada estava ligada, então se o aquecimento proveniente da lâmpada puder ser mitigado, a potência necessária para resfriamento diminui proporcionalmente à mitigação.

É possível seguir uma lógica similar para se calcular a potência necessária de aquecimento. A temperatura interna mais baixa vista no período de testes foi de $17°C$, atingida no dia 11 de Junho. Vale relembrar que o metabolismo das plantas desempenha um papel similar ao do aquecedor, e tende a aumentar a temperatura do ambiente da estufa. Então, para controlar a

temperatura interna em $22°C$, são necessários:

$$(22 - 16) * 11.236 * 1.569 = 105W$$

para o aquecimento do volume.

Esses dois valores são linearmente dependentes da constante de fluxo de calor da estufa (K). A determinação dessa constante é um dos pilares desse trabalho, e algumas considerações encontradas durante a construção da estufa devem ser discutidas aqui.

A condutância térmica e espessura do material usado para isolar o volume interno da estufa do externo são duas variáveis que entram no cálculo do fluxo de calor pela equação da termodinâmica. Esses valores provavelmente têm um efeito direto sobre o valor de K, mas como esse trabalho só testou um material e de espessura constante, não é possível quantificar esse efeito com os resultados encontrados.

Porém um outro fator que afeta K e foi testado é a vedação. Durante a construção da estufa, inicialmente a qualidade da vedação do volume interno foi um fator secundário. Os primeiros testes de aquecimento em potência máxima atingiram um valor de T' de apenas $7°C$. Após melhoria da vedação através de aplicação de cola silicone nas juntas da manta e de espuma no fechamento da porta, um teste de aquecimento em potência máxima atingiu T' de $32°C$, uma melhoria de impressionantes 357%.

Essa melhoria inevitavelmente leva ao questionamento: se a vedação desempenha um papel tão importante no valor de K, qual o impacto causado pelos 2 furos (entrada e saída de ar) na manta? Essa pergunta merece um estudo próprio para ser respondida e cabe na seção de perspectivas futuras desse trabalho.

6.1 Teste 1

Por causa do baixo número de indivíduos e da mudança de substrato no teste 1 comparado aos outros dois, os resultados encontrados devem ser interpretados com baixo grau de confiabilidade.

Com isso dito, esse teste representou uma melhoria média de crescimento das folhas de 120% em relação ao teste de controle. Devido ao alto desvio padrão, a barra de erro desse valor é de pelo menos 150%. Apesar da enorme barra de erro, o aumento do crescimento causado pelas altas temperaturas reguladas durante o período noturno é condizente com o experimento feito por K. Kanno et al em [11].

Uma das plantas coletadas no teste 1 pode ser vista na figura 6.1.

6.2 Teste 2

Como o teste 2 não gerou resultados quantitativos, a discussão aqui se limita a aspectos qualitativos do teste. Pode-se ver o quão ruim foi o crescimento das mudas de couve na figura 6.2.

Figura 6.1: Maior muda de couve coletada do teste 1. Detalhe de 10mm na imagem para comparação de tamanho.

Por mais que isso signifique que apenas 2 dos testes geraram resultados quantitativos, o teste 2 gerou uma das mais importantes conclusões do trabalho: para uma estufa no clima de Brasília, é necessária uma forma de refrigeração da temperatura interna para evitar extremos climáticos como o que assolou esse teste.

6.3 Teste 3

Apesar de servir apenas como controle, esse teste obteve ótimos resultados de crescimento das mudas de couve. Esse fato é muito indicativo da importância da temperatura nessa etapa do crescimento, especialmente quando comparado aos resultados do teste 2. As temperaturas no período do teste 3 foram mais baixas e amenas, o que resultou em mudas muito mais saudáveis, como pode ser visto na figura 6.3.

Figura 6.2: Mudas de couve pequenas e queimadas do teste 2.

Figura 6.3: Mudas de couve do teste 3 no dia da coleta.

As mudas desse teste foram as menos afetadas por queimaduras no geral, apesar de que as temperaturas diurna e noturna médias foram superiores às do teste 1. Esse fato isolado levanta

mistério acerca da causa da queimadura das mudas de couve.

Capítulo 7

Conclusões

A temperatura desempenha um papel fundamental no crescimento de mudas de couve-manteiga no ambiente da estufa. Foi atestado que o aumento da temperatura afeta positivamente a velocidade do crescimento, até um limite em que a temperatura passa a queimar as mudas e passa a afetar negativamente o crescimento. O valor exato de temperatura desse limite não foi determinado, mas um teste em que a temperatura nunca ultrapassou $30°C$ resultou em notavelmente menos queimadura do que os testes que ultrapassaram esse valor.

Foi possível alcançar um modelo matemático simples para representar o sistema, e um controlador PI implementado baseado nesse modelo atingiu ótimos resultados (erro sem interferência $< 1\%$). A metodologia usada para projetar o controlador é simples e acessível, e permite dimensionar tanto um aquecedor quanto um resfriador para controle de temperatura de estufas de até pelo menos $1.5m^3$ de volume interno. O projeto de controlador térmico para estufas maiores do que isso talvez seja possível com a metodologia desenvolvida mas não foi testado nesse trabalho.

7.1 Perspectivas Futuras

O estudo desenvolvido nesse trabalho levantou algumas questões importantes e que merecem estudos próprios para serem devidamente analisadas. Essas questões foram discutidas ao longo do relatório mas serão resumidas e listadas aqui.

O modelo matemático usado no projeto do controlador só tem 1 constante para ser determinada: K. A determinação dessa constante é feita através dos testes práticos com aquecedor e seu valor depende de algumas variáveis discutidas. Porém, uma das dependências é muito significativa no valor de K e saber mais sobre seu impacto talvez seja interessante para o projeto da estufa. Estamos falando da troca de ar intencional entre o ambiente interior e exterior da estufa, pela entrada e saída de ar. A área desses furos e a velocidade do ar que entra e sai por eles são dois parâmetros que provavelmente afetam muito o valor final de K.

Outra questão é a queimadura experimentada pelas mudas. Foi identificado algum nível de queimadura em todas as mudas plantadas nesse trabalho, mas sem um método confiável de medir

essa queimadura seu efeito acabou sendo apenas qualitativo na discussão. Foi atestado que existe outra variável (além da disponibilidade de água e nutrientes, energia luminosa e temperatura do ar) que determina o quanto uma muda queima. De acordo com [6], a velocidade e umidade relativa do ar são boas candidatas de variáveis para estudar esse processo de queimação.

Também seria interessante tentar aplicar o mesmo modelo encontrado nesse trabalho a uma estufa convencional, em que a iluminação das plantas é fornecida pelo Sol. Esse seria um caso mais complexo, já que a perturbação de calor causada pela iluminação não seria constante. Mesmo assim, os procedimentos daqui provavelmente podem ser aplicados numa estufa dessas com resultados promissores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] THRALL, J. D. B. P. H.; BURDON, J. J. Evolutionary change in agriculture: the past, present and future. *ncbi*, 2010. Https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00155.x.

[2] EMBRAPA. Trajetória da agricultura brasileira. 1960 – 2017. Https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira.

[3] NONOGAKI, G. W. B. H.; BEWLEY, J. D. Germination—still a mystery. 2010. Https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.02.010.

[4] SANTANA, M. A. R. e Denise Garcia de. Como e por que medir o processo de germinação? 2006. Http://dx.doi.org/10.1590/S0100-84042006000100002.

[5] MEINEN J. CAMPEN, C. S. A. E. E.; GELDER, A. de. The photosynthesis response of tomato to air circulation. 2007. Https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.761.8.

[6] THONGBAI, T. K. P.; OHYAMA, K. Co2 and air circulation effects on photosynthesis and transpiration of tomato seedlings. 2010. Https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.07.018.

[7] SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microelectronic Circuits Revised Edition*. [S.l.: s.n.], 2007. Https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/1537213.

[8] BOUKHRISS, K. Z. M.; GHRIBI, R. Study of thermophysical properties of a solar desalination system using solar energy. 2012. Https://doi.org/10.1080/19443994.2012.714925.

[9] NISE, N. S. *Control Systems Engineering*. [S.l.: s.n.], 2000. Https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/519085.

[10] CLIMATEMPO, R. Novo recorde de calor em brasília. 2020. Https://www.climatempo.com.br/noticia/2020/09/29/novo-recorde-de-calor-em-goiania-e-em-brasilia-5955.

[11] KANNO, T. M. K.; MAKINO, A. High night temperature stimulates photosynthesis, biomass production and growth during the vegetative stage of rice plants. 2010. Https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2008.00343.x.