

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
APLICADA E SUSTENTABILIDADE

IMPACTOS DO AQUECIMENTO DO SUBSTRATO NA
PRODUÇÃO DE MUDAS

Autor: Marcus Vinicius Mota Pinheiro da Costa
Orientador: Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira

RIO VERDE - GO
Agosto- 2022

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
APLICADA E SUSTENTABILIDADE

IMPACTOS DO AQUECIMENTO DO SUBSTRATO NA
PRODUÇÃO DE MUDAS

Autor: Marcus Vinicius Mota Pinheiro da Costa
Orientador: Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

RIO VERDE - GO
Agosto – 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

C837i Costa, Marcus Vinicius Mota Pinheiro da
Impactos do aquecimento do substrato na produção
de mudas / Marcus Vinicius Mota Pinheiro da Costa;
orientador Dr. Geraldo Andrade de Oliveira. -- Rio
Verde, 2022.
112 p.

Dissertação (Mestrado em Programa de pós-graduação
em engenharia aplicada e sustentabilidade) --
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2022.

1. Tecnologia. 2. Sistemas de Controle. 3.
Agricultura. 4. Fazenda Vertical. I. Oliveira, Dr.
Geraldo Andrade de, orient. II. Título.

Responsável: Johnathan Pereira Alves Diniz - Bibliotecário-Documentalista CRB-1 n°2376

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- Tese (doutorado) Artigo científico
 Dissertação (mestrado) Capítulo de livro
 Monografia (especialização) Livro
 TCC (graduação) Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Local

/ /

Data


Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 74/2022 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

| | | |
|-----------------------------------|---|---------------------------------|
| Unidade do IF Goiano: | Campus Rio Verde | |
| Programa de Pós-Graduação: | Engenharia Aplicada e Sustentabilidade | |
| Defesa de: | Dissertação | Defesa de número: 51 |
| Data: 26/08/2022 | Hora de início: 09:00h | Hora de encerramento: 12:00h |
| Matrícula do discente: | 2020102331440137 | |
| Nome do discente: | Marcus Vinicius Mota Pinheiro da Costa | |
| Título do trabalho: | IMPACTOS DO AQUECIMENTO DO SUBSTRATO NA PRODUÇÃO DE MUDAS | |
| Orientador: | Geraldo Andrade de Oliveira | |
| Área de concentração: | Engenharia Aplicada e Sustentabilidade | |
| Linha de Pesquisa: | Eficiência Energética e Sustentabilidade | |
| Projeto de pesquisa de vinculação | IMPACTOS DO AQUECIMENTO DO SUBSTRATO NA PRODUÇÃO DE MUDAS | |

| | |
|------------|--|
| Titulação: | Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade |
|------------|--|

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira (Avaliador Interno e Presidente da banca), Prof. Dr. Fernando Campello de Souza (Avaliador Externo), Prof. Dr. Josemar Alves dos Santos Junior (Avaliador Externo), Prof. Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares (Avaliador Externo) e Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior (Avaliador Interno) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada por vídeo conferência via Google Meet à distância, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de MARCUS VINICIUS MOTA PINHEIRO DA COSTA, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Geraldo Andrade de Oliveira, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções, e da submissão das publicações técnicas e científicas citadas na apresentação, validadas pelo Orientador Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa dissertação em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, com respectiva submissão dentro até **60** (sessenta) dias. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Fernando Campello de Souza**, Fernando Campello de Souza - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal Rural de Pernambuco (24416174000106), em 27/08/2022 11:21:47.
- **Joao Areis Ferreira Barbosa Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 26/08/2022 12:14:37.
- **Frederico Antonio Loureiro Soares**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 26/08/2022 12:13:28.
- **Josemar Alves dos Santos Junior**, Josemar Alves dos Santos Junior - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1), em 26/08/2022 12:13:11.
- **Geraldo Andrade de Oliveira**, Geraldo Andrade de Oliveira - Professor Colaborador - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1), em 26/08/2022 12:10:34.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 08/08/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 413684

Código de Autenticação: 926c0be1d8



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E
SUSTENTABILIDADE**

**IMPACTOS DO AQUECIMENTO DO SUBSTRATO NA PRODUÇÃO
DE MUDAS**

Autor: Marcus Vinicius Mota Pinheiro da Costa
Orientador: Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de
Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

APROVADO em 26 de agosto de 2022.

Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira
Presidente da Banca
IF Goiano - Rio Verde

Prof. Dr. Fernando Campello de Souza
Avaliador externo
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Josemar Alves dos Santos Junior
Avaliador externo
IF Goiano - IFG Itumbiara

Prof. Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares
Avaliador interno
IF Goiano - Rio Verde

Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior
Avaliador interno
IF Goiano - Rio Verde

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Nancy Claudina Mota, por me possibilitar chegar tão longe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Geraldo Andrade de Oliveira, que durante todo o processo mais do que um orientador, foi um amigo.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Marcus Vinicius Mota Pinheiro da Costa, nascido em 21 de novembro de 1985 em Goiânia, Goiás. Concluiu o ensino médio em 2003 pelo Instituto Presbiteriano de Educação, concluiu o curso técnico em mecatrônica em 2008 pelo SENAI, concluiu a graduação em Engenharia Elétrica em 2008 pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Atuou como engenheiro eletricitista nas empresas AJEL – Automação Industrial e Navarrete Engenharia. Atualmente servidor público pelo Instituto Federal Goiano – Campus Trindade.

RESUMO

COSTA, MARCUS VINICIUS MOTA PINHEIRO DA. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, agosto de 2022. **Impactos do aquecimento do substrato na produção de mudas.** Orientador: Dr. Geraldo Andrade de Oliveira.

Diante de um cenário em que a população mundial está em constante crescimento, faz-se necessário a busca por novas tecnologias para que seja possível aumentar a produção de alimentos a longo prazo. Portanto, tecnologias como fazendas verticais vêm se tornando cada vez mais relevantes dentro da agricultura. Estas tecnologias consistem em ambientes que variáveis como temperatura ambiente, umidade do solo, umidade do ar, iluminação natural e iluminação artificial são controladas com o objetivo de se otimizar o processo de produção. Dessa forma, este trabalho consistiu em avaliar os impactos do aquecimento do substrato na produção de mudas de hortaliças. Foi desenvolvido um sistema de controle de temperatura do substrato utilizando a técnica PID para que não houvesse oscilações de temperatura durante o plantio. A mesma técnica foi utilizada para controle de temperatura da água de irrigação para evitar o choque térmico e possível inviabilização da semente durante o processo de irrigação. Foi utilizado um sistema de controle de umidade do solo para garantir que os cultivares estivessem sempre na condição ideal. Diante disso, foi possível concluir que o aquecimento do substrato tem impactos positivos ou negativos na produção de mudas a depender da faixa de temperaturas a ser utilizada e da espécie utilizada.

PAVAVRAS-CHAVE: Tecnologia, Sistemas de Controle, Agricultura, Fazenda Vertical

ABSTRACT

COSTA, MARCUS VINICIUS MOTA PINHEIRO DA. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, agosto de 2022. **Impacts of substrate heating on seedling production.** Advisor: Dr. Geraldo Andrade de Oliveira.

Facing a scenario in which the world population is constantly growing, it is necessary to search new technologies so that it is possible to increase food production in the long term. Therefore, technologies such as vertical farms are becoming increasingly relevant within agriculture. These technologies consist of environments where variables such as ambient temperature, soil moisture, air humidity, natural lighting and artificial lighting are controlled to optimize the production process. Thus, this work consisted of evaluating the impacts of substrate heating on the vegetable seedlings production. A substrate temperature control system was developed using the PID technique so that there were no temperature fluctuations during planting. The same technique was used to control irrigation water temperature to avoid thermal shock, and possible seed impracticability during the irrigation process. A soil moisture control system was used to ensure that the cultivars were always in the ideal condition. In view of this, it was possible to conclude that the substrate heating has positive or negative impacts on seedlings production depending of the temperature range, and the species used.

KEYWORDS: Technology, Control Systems, Agriculture, Vertical Farm

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabela 1 – Faixas de temperatura de produção de mudas. (EMBRAPA, 2016)</i> | <i>24</i> |
| <i>Tabela 2 – Configuração dos ciclos de plantio. (Elaborado pelo autor, 2022).....</i> | <i>69</i> |
| <i>Tabela 3 – Orçamento do projeto. (Elaborado pelo autor, 2022).....</i> | <i>74</i> |
| <i>Tabela 4 - Espécies utilizadas no 2º ciclo. (Dados fornecidos pelo fornecedor, 2022)</i> | <i>78</i> |
| <i>Tabela 5 – Resultados da bandeja a 30°C. (Elaborado pelo autor, 2022).....</i> | <i>85</i> |
| <i>Tabela 6 – Resultados da bandeja a 35°C. (Elaborado pelo autor, 2022).....</i> | <i>86</i> |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Quebra-vento de eucalipto (EMBRAPA, 2016) | 20 |
| Figura 2 – Estrutura da estufa (EMBRAPA, 2016)..... | 21 |
| Figura 3 – Bancadas de produção de mudas (EMBRAPA, 2016) | 22 |
| Figura 4 – Circuito do termopar. Extraído de (MOREIRA, 2022)..... | 28 |
| Figura 5 – Curvas de milivolts por temperatura. Extraído de (SOUZA, 2013)..... | 29 |
| Figura 6 – Sensor capacitivo de umidade de solo. Extraído de (DANIEL, 2020)..... | 30 |
| Figura 7 – Ebulidor elétrico. (Elaborado pelo autor, 2022) | 31 |
| Figura 8 – Sistema de controle de malha aberta (Adaptado de Nise, 2020)..... | 33 |
| Figura 9 – Sistema de controle de malha fechada (Adaptado de Nise, 2020)..... | 34 |
| Figura 10 – Sistema de controle On-Off. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 35 |
| Figura 11 – Sistema de controle PID. (Adaptado de Nise, 2020) | 36 |
| Figura 12 – Placa de arduino. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 38 |
| Figura 13 – Módulo de display de sete segmentos. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 39 |
| Figura 14 – Circuito de exemplo de um PWM. (Elaborado pelo autor, 2022) | 39 |
| Figura 15 – Ciclos de trabalhos de um PWM. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 40 |
| Figura 16 – Relê de estado sólido. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 41 |
| Figura 17 – Temperatura do substrato em Daniel (2020). Extraído de Daniel (2020) | 50 |
| Figura 18 – Tanque para aquecimento da água de irrigação. (Elaborado pelo autor, 2022) | 51 |
| Figura 19 – Sistema de controle de temperatura do substrato. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 52 |
| Figura 20 – Sistema de controle de temperatura da água de irrigação. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 53 |
| Figura 21 – Sistema de controle de umidade do substrato. (Elaborado pelo autor, 2022) | 54 |
| Figura 22 – Sistema de iluminação. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 54 |
| Figura 23 – Sensor de temperatura MAX6675. (Extraído de OLIVEIRA, 2022) | 55 |
| Figura 24 - Ligação do MAX6675. (SETYAWAN, 2022)..... | 56 |
| Figura 25 - Algoritmo de controle do Arduino. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 57 |
| Figura 26 – Sinal de temperatura sem filtro. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 57 |
| Figura 27 – Sinal de temperatura filtrado. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 58 |
| Figura 28 - Funcionamento do PID. (Adaptado de NISE, 2020) | 60 |
| Figura 29 – Correlação de PID e PWM. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 61 |
| Figura 30 – Temperatura em função do tempo. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 61 |
| Figura 31 – Diagrama da bandeja de cultivo. (Elaborado pelo autor, 2022) | 62 |
| Figura 32 – Preparação da bandeja de cultivo. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 63 |
| Figura 33 – Camada de argila expandida. (Elaborado pelo autor, 2022) | 64 |
| Figura 34 – Manta permeável. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 64 |
| Figura 35 – Cabos de calefação. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 65 |
| Figura 36 – Três sistemas completos. (Elaborado pelo autor, 2022) | 65 |
| Figura 37 – Sistema de gotejamento. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 66 |
| Figura 38 – Sistema de aquecimento individual. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 67 |
| Figura 39 – Cultivo com sistema individual de irrigação. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 68 |
| Figura 40 – Temperatura do substrato. (Elaborado pelo autor, 2022) | 70 |
| Figura 41 – Estabilidade do sistema durante o dia. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 71 |
| Figura 42 – Estabilidade do sistema durante a noite. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 72 |
| Figura 43 – Bandeja de 30°C dia 15/12/21. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 75 |
| Figura 44 – (a) Bandeja sem aquecimento dia 16/12/21. (b) Bandeja de 30°C dia 16/12/21 (Elaborado pelo autor, 2022) | 75 |
| Figura 45 – (a) Bandeja sem aquecimento dia 18/12/21. (b) Bandeja de 30°C dia 18/12/21 (Elaborado pelo autor, 2022) | 76 |

| | |
|--|----|
| Figura 46 – Tamanho máximo de cada cultivo. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 76 |
| Figura 47 – (a) Bandeja a 30°C. (b) Bandeja a 32,5°C. (c) Bandeja a 35°C. (d) Bandeja a temperatura ambiente. (Elaborado pelo autor, 2022) | 77 |
| Figura 48 – Mostarda em bandeja de 35°C. (Elaborado pelo autor, 2022) | 79 |
| Figura 49 – Desempenho da alface crespa. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 80 |
| Figura 50 – Desempenho da alface simpson. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 81 |
| Figura 51 – Desempenho da chicória. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 81 |
| Figura 52 – Desempenho da couve. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 82 |
| Figura 53 – Desempenho da mostarda. (Elaborado pelo autor, 2022) | 83 |
| Figura 54 – Desempenho da pimenta-malagueta. (Elaborado pelo autor, 2022) | 83 |
| Figura 55 – Desempenho do repolho. (Elaborado pelo autor, 2022) | 84 |
| Figura 56 – Desempenho da rúcula. (Elaborado pelo autor, 2022) | 84 |
| Figura 57 – Desempenho do tomate gaúcho. (Elaborado pelo autor, 2022) | 85 |
| Figura 58 – Marcação dos pontos de plantio. (Elaborado pelo autor, 2022) | 87 |
| Figura 59 – Bandeja interna a 27°C. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 88 |
| Figura 60 – Bandeja interna a 33°C. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 88 |
| Figura 61 – Bandeja externa a 30°C. (Elaborado pelo autor, 2022) | 89 |
| Figura 62 – Bandeja em temperatura ambiente. (Elaborado pelo autor, 2022) | 90 |
| Figura 63 – Bandeja interna a 27°C. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 91 |
| Figura 64 – Bandeja interna a 33°C. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 91 |
| Figura 65 – Bandeja externa a 30°C. (Elaborado pelo autor, 2022) | 92 |
| Figura 66 – Bandeja externa a temperatura ambiente. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 93 |
| Figura 67 – Bandeja interna a 26°C. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 95 |
| Figura 68 – Bandeja interna a 28°C. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 95 |
| Figura 69 – Bandeja externa a 26°C. (Elaborado pelo autor, 2022) | 95 |
| Figura 70 – Bandeja externa a temperatura ambiente. (Elaborado pelo autor, 2022)..... | 96 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IPTU - Imposto Predial E Territorial Urbano.

LED - Light Emitting Diode

PID – Proporcional Integral Derivativo

PPGEAS - Programa de pós-graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

PVC - Policloreto De Vinila

PWM - Pulse Width Modulation

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| DEDICATÓRIA | 4 |
| AGRADECIMENTOS..... | 5 |
| BIOGRAFIA DO AUTOR..... | 6 |
| RESUMO | 7 |
| ABSTRACT | 8 |
| LISTA DE TABELAS | 9 |
| LISTA DE FIGURAS | 10 |
| LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES | 12 |
| SUMÁRIO..... | 13 |
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 2. REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 2.1. AGRICULTURA VERTICAL | 16 |
| 2.1.1. Conceito | 16 |
| 2.1.2. Agricultura vertical no mundo | 17 |
| 2.1.3. A Agricultura Vertical No Brasil | 17 |
| 2.2. PRODUÇÃO DE MUDAS..... | 18 |
| 2.2.1. Introdução | 18 |
| 2.2.2. Aspectos Econômicos | 19 |
| 2.2.3. Estado Da Arte De Cultivo | 20 |
| 2.3. INFLUÊNCIA DOS FATORES AMBIENTAIS NO CULTIVO | 23 |
| 2.3.1. Influência Da Temperatura Ambiente | 23 |
| 2.3.2. Influência Da Temperatura Do Solo..... | 24 |
| 2.3.3. Influência Da Umidade Do Solo | 26 |
| 2.3.4. Influência Da Luz | 26 |
| 2.4. TECNOLOGIAS APLICADAS EM CASAS DE VEGETAÇÃO | 27 |
| 2.4.1. Casas de vegetação | 27 |
| 2.4.2. Sensores | 27 |
| 2.4.3. Atuadores | 30 |
| 2.4.4. Controladores | 32 |
| 2.4.5. Microcontroladores..... | 37 |
| 2.4.6. Sistemas De Indicação | 38 |
| 2.4.7. Pwm | 39 |
| 2.4.8. Relê de estado sólido | 40 |
| 2.5. REFERÊNCIAS | 42 |

| | | |
|------|--|-----|
| 3. | LINHA DE PESQUISA E ENQUADRAMENTO NOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA CAPES..... | 47 |
| 4. | OBJETIVOS | 48 |
| 4.1. | GERAL | 48 |
| 4.2. | ESPECÍFICOS | 48 |
| 5. | INTRODUÇÃO | 49 |
| 6. | METODOLOGIA | 50 |
| 6.1. | MÉTODO PROPOSTO..... | 50 |
| 6.2. | PROJETO | 52 |
| 6.3. | DETALHAMENTO DO PROJETO | 55 |
| 6.4. | METODOLOGIA PARA VALIDAÇÃO DO DISPOSITIVO | 68 |
| 7. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 70 |
| 7.1. | ESTABILIDADE DO SISTEMA | 70 |
| 7.2. | INVESTIMENTO DO PROJETO | 73 |
| 7.3. | RESULTADOS DO 1º CICLO..... | 74 |
| 7.4. | RESULTADOS DO 2º CICLO..... | 78 |
| 7.5. | RESULTADOS DO 3º CICLO..... | 86 |
| 7.6. | RESULTADOS DO 4º CICLO..... | 93 |
| 8. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 97 |
| 8.1. | SÍNTESE DOS RESULTADOS | 97 |
| 8.2. | LIMITAÇÕES DA PESQUISA..... | 97 |
| 8.3. | PROPOSIÇÃO PARA ESTUDOS FUTUROS | 98 |
| 9. | REFERÊNCIAS | 99 |
| 10. | ANEXO | 101 |

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que até 2050 a população mundial atingirá a marca de aproximadamente 9 bilhões de pessoas. Diante dessa perspectiva é imperativo a busca por tecnologias de produção de alimentos mais eficientes e menos impactantes no meio ambiente (BAULCOMBE *et al.*, 2021; SAHOUR *et al.*, 2021).

A agricultura atualmente já emprega muita tecnologia em seus processos de produção. Contudo, essa tecnologia não é suficiente para atender a futura demanda mundial de alimentos, pois alguns fatores como pragas, doenças e condições climáticas, não são possíveis de se controlar. (ALPAY; ERDEM, 2018). Neste contexto, a tecnologia está aumentando cada dia mais sua participação nos processos agrícolas, com o objetivo de otimizar a produção. (VISHWAKARMA *et al.*, 2020)

Novas tecnologias como estufas de alta tecnologia e fazendas verticais estão crescendo em número a cada dia mais em escala mundial. Nestes ambientes é possível controlar variáveis como: aquecimento, ventilação, resfriamento, umidade relativa, umidade do solo, luz natural ou artificial e fertilização (LA NOTTE *et al.* 2020).

Dessa forma, a utilização destas tecnologias irá propiciar aumento de produção de alimentos próximos aos grandes centros urbanos, ou seja, alimentos mais frescos, empregando apenas as quantidades necessárias de recursos como água e energia elétrica para isso. (ZHANG *et al.* 2021)

Portanto, dentro desse contexto, este trabalho tem como objetivo principal avaliar os impactos do aquecimento do substrato na produção de mudas. O desenvolvimento desta tecnologia pode ser agregado às estufas de alta tecnologias e às fazendas verticais tornando o processo de produção ainda mais eficaz.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. AGRICULTURA VERTICAL

2.1.1. Conceito

A agricultura ao longo da história desempenhou papel fundamental no desenvolvimento das civilizações, permitindo a consolidação humana de maneira efetiva em regiões férteis abandonando sua vida nômade (GEBAUER e PRICE, 1992). Ao longo dos séculos, novas técnicas agrícolas surgiram e mudaram completamente a forma de produção de alimentos. Atualmente, vive-se um momento em que uma nova técnica está cada dia mais ganhando força e adeptos. Esta técnica é chamada de agricultura vertical.

A agricultura vertical é a prática do cultivo em camadas empilhadas verticalmente. Geralmente incorpora agricultura de ambiente controlado, que visa otimizar o crescimento das plantas e técnicas de cultivo sem solo, como hidroponia, aquaponia e aeroponia (BIRKBY, 2016). Algumas opções comuns de estruturas para abrigar sistemas de agricultura vertical incluem edifícios, contêineres, túneis subterrâneos e poços de minas abandonados.

Estes ambientes são controlados visando aumentar o rendimento das culturas ou estender a estação de crescimento. São tipicamente hospedados em estruturas fechadas, como estufas ou edifícios, e o controle pode ser imposto a fatores ambientais, incluindo ar, temperatura, luz, água, umidade, dióxido de carbono e nutrição de plantas. (JENSEN, 2002)

Dessa maneira, é possível vislumbrar um horizonte em que a agricultura do futuro não estará mais restrita ao campo, mas sim dentro das grandes metrópoles, fornecendo alimentos de qualidade nunca imaginada, em tempo mínimo, livre de pesticidas e agrotóxicos e com total controle de todas as variáveis do processo pela integração computacional do sistema.

Portanto, a agricultura vertical é uma atividade bastante promissora do ponto de vista logístico e ecológico visto que essa pode ser desenvolvida dentro de grandes centros urbanos. Ou seja, é possível obter alimentos cultivados em condições ótimas, livre de pragas, com redução de tempo de cultivo, com aproveitamento máximo da água e demais insumos e próximo do consumidor, permitindo que tenha um produto mais fresco e de qualidade superior.

2.1.2. Agricultura vertical no mundo

Alta demanda global por comida está prevista nos próximos 50 anos. (BANERJEE e ADENAEUER, 2014). A previsão é de que em 2050 a população mundial chegue a 9 bilhões de pessoas e que as cidades serão as responsáveis por abrigar 80% da população. (DESPOMMIER ET AL., 2013) Atualmente, existem 800 milhões de hectares destinados à produção agrícola no mundo, e representa a cerca de 38% de toda a área global. Além disso, 80% de toda terra arável do globo já está em uso (ELLINGSEN & DESPOMMIER, 2008). Devido ao crescimento de demanda por alimentos em detrimento do crescimento populacional, surge grande pressão para novas terras aráveis. Essa pressão aumenta a necessidade de desenvolvimento de novas técnicas de cultivo, sendo a principal a agricultura vertical. (DESPOMMIER, 2011; GLASER, 2012). Contudo, existe pouquíssimos estudos acerca da agricultura vertical e a sua integração com o ambiente urbano.

Teoricamente, a agricultura vertical pode ser aplicada a diversos tipos de edificações e em ambientes construídos especificamente para este fim, utilizando técnicas e tecnologias de casas de estufa de última geração, com o objetivo de se obter um sistema com temperatura, umidade, iluminação controlados. (ABEL, 2010; BANERJEE e ADENAEUER, 2014 DESPOMMIER, 2011)

Recentemente a produção sustentável de alimentos vem ganhando maior visibilidade pela comunidade acadêmica e pelos produtores. Apesar da limitação da informação e dos problemas técnicos ainda existentes, a agricultura vertical vem ganhando cada vez mais espaço em países como China, Holanda, Coreia do Sul, Japão, Canadá, Itália, Estados Unidos, Singapura, Emirados Árabes Unidos, e Inglaterra (SIVAMANI, BAE, e CHO, 2013).

De maneira geral, os locais encontram soluções diferentes para a implementação das fazendas verticais. Alguns utilizam instalações abandonadas, prédios em desuso e até instalações completamente novas, criadas para este propósito. De maneira semelhante, a produção de alimento não é unanime devido as peculiaridades de cada região e bem como de cada mercado consumidor dos produtos. Porém, nota-se a grande preferência de produção de frutas, verduras e hortaliças que serão consumidas pela comunidade próxima à produção.

2.1.3. Agricultura Vertical No Brasil

No Brasil, o transporte e manuseio de hortaliças é responsável por 50% das perdas na produção. (CENCI, 1997). Além disso a agricultura tradicional representa 70% do consumo de água potável e 30% do gás carbônico produzido. (ONU, 2016). Esses dados demonstram a

importância do assunto aqui abordado nesta pesquisa, pois uma das principais propostas da agricultura vertical é a facilidade de acesso a produção de alimentos e a redução e otimização de utilização dos recursos naturais, sendo o principal deles a água.

A produção agrícola horizontal urbana é a aplicação do método convencional, com a utilização do solo em vazios urbanos, espaços públicos ou privados, coberturas de edifícios, ao tempo ou em estufas. Países como Venezuela, Cuba e Chile são exemplos relevantes na América Latina de produção horizontal urbana. No Brasil, especificamente na cidade de São Paulo, nota-se aumento considerável da produção urbana horizontal. Atualmente, São Paulo conta com 441 unidades produtivas, com 1271 pessoas trabalhando diretamente na produção. Essa atividade é incentivada pelo Programa de Agricultura Urbana e Periurbana, apresentada na Lei no 13.727, de 2004, e no Decreto no 51.801, de 2010, os quais estabelecem uma série de benefícios para o produtor agrícola em meio urbano, como a redução do IPTU, a prioridade na compra de produtos do programa para abastecimento das escolas municipais, creches, hospitais, entre outros. (AMARAL, 2018) Portanto, os avanços e incentivos ainda se direcionam a agricultura tradicional. Por mais que haja essa expansão na agricultura urbana, essa por si só não abarca as vantagens de uma fazenda vertical totalmente controlada.

No Brasil o primeiro caso de fazenda vertical surgiu no Centro Social Santa Luzia, na Vila Ré, na cidade de São Paulo. A fazenda é coordenada pela Cooperativa Mista Multisetorial Equilibrium. Não existe informação precisa de quantas fazendas verticais existem exatamente no Brasil, porém observa-se crescente aumento de interesse por implantação das mesmas pelo aumento desse novo mercado que está surgindo.

No meio acadêmico também não é diferente. São poucos materiais que se encontram no Brasil sobre esse tema. A maior parte do material científico produzido está fora do país. Demonstrando o pioneirismo de quem trabalha com esse assunto.

2.2. PRODUÇÃO DE MUDAS

2.2.1. Introdução

A produção de hortaliças representa grande parte de toda a cadeia agrícola no país. Normalmente, essa atividade se localiza próxima aos grandes centros urbanos, pois são nesses locais que se localizam maior parte do mercado consumidor. Isso proporciona impacto

econômico local não somente pela geração de renda e empregos, mas também no consumo dos mais diversos produtos atrelados à produção das hortaliças.

As hortaliças são peças fundamentais na boa nutrição do indivíduo. São ótimas fontes de vitaminas e sais minerais e contribuem de forma significativa para bom funcionamento do organismo especialmente no sistema digestivo. (MAKISHIMA, 1992).

O sucesso do cultivo de hortaliças depende em grande parte da utilização de mudas de alta qualidade, o que torna o seu cultivo mais competitivo, com o aumento de produtividade e diminuição dos riscos de produção (MINAMI, 1995).

Diante disso, a produção de mudas em ambientes controlados se torna assunto muito relevante pelos vários fatores como: maior precocidade da produção, menor possibilidade de contaminação fitopatogênica, maior relação percentual entre sementes plantadas e mudas obtidas, melhor aproveitamento da área destinada à produção de mudas, maior facilidade na execução de tratos culturais como desbaste, irrigação, adubação, tratamento fitossanitário e menor estresse por ocasião do transplântio. (LESKOVAR e STOFFELA, 1995)

2.2.2. Aspectos Econômicos

Um estudo realizado pela Embrapa apresentou que em 2009 a produção brasileira de hortaliças foi de aproximadamente 18 milhões de toneladas, contemplando 40 espécies. Em 2011 esse número foi de 19 milhões considerando apenas 32 hortaliças. O que gerou a receita de mais de 25 bilhões de reais e mais de 7 milhões de empregos diretos e indiretos.

Esse cenário demonstra que nas últimas décadas ocorreram melhorias que contribuíram sobremaneira para que o setor atingisse esse patamar. Não somente a introdução de novas tecnologias, mas, também a impulsão para a utilização de novos insumos garantiu essa transformação. O outro fator contribuinte para o aumento da produção de hortaliças é o fato dos consumidores se tornarem cada vez mais exigentes com relação a qualidade, variedade e custo.

Mesmo diante desse cenário favorável, a maior parte do cultivo de hortaliças ainda se resume aos grandes polos, como Minas Gerais responsável por 30% da produção nacional e São Paulo com 20% (NASCIMENTO e PEREIRA, 2016).

2.2.3. *Estado Da Arte De Cultivo*

No processo de produção de mudas atual, o sistema mais utilizado são os viveiros. Estes contam com diversas características que favorecem o rápido desenvolvimento das sementes. Dentre as principais características dos viveiros, pode-se destacar:

- Quebra-vento:

O quebra-vento é uma estrutura natural, normalmente feita de plantas que pode ser vista na figura 1.



Figura 1 – Quebra-vento de eucalipto (EMBRAPA, 2016).

É recomendado a utilização de quebra-vento mesmo em regiões em que não haja a predominância de ventos fortes, pois essas estruturas auxiliam na regulação e estabilidade da temperatura do viveiro e evitam danos mecânicos a produção.

A escolha do tipo de quebra-vento é muito relativa e depende da região, mas de maneira geral o mais utilizado é o quebra-vento de eucalipto, pois este tem rápido crescimento e manutenção baixa.

Existem outras soluções não naturais aplicadas a quebra-ventos como telas plásticas, muros, alvenarias e obstáculos naturais. Estas soluções não são tão usuais, porém existem em alguns casos pontuais como forma de solução para aquelas situações em que não é possível utilizar uma barreira natural.

- Estufas:

As estufas são estruturas feitas com o objetivo de melhorar o controle da produção além de proteger a mesma. As estufas podem proteger da chuva, controlar a luminosidade e auxiliar na estabilidade térmica durante o processo de crescimento da planta. Existem diversos tipos de estufas, sendo as mais comuns as do tipo em arco como pode ser visto na figura 2. Este tipo é bastante utilizado devido a sua fácil montagem.



Figura 2 – Estrutura da estufa (EMBRAPA, 2016).

As estufas são geralmente constituídas de uma cobertura, que pode ser de plástico, vidro ou policarbonato. A estrutura da estufa geralmente pode ser feita de PVC, aço ou madeira, garantindo a boa integridade. Já o fechamento lateral, pode ser feito utilizando diversos materiais como plástico, policarbonato ou telas próprias para esse fim.

- Bancadas:

As bancadas são estruturas construídas no interior das estufas com o objetivo de manter as bandejas suspensas e afastadas do chão. Isso permite a realização da poda aérea das raízes dos cultivares nas bandejas, além proporcionar maior controle e uniformidade da irrigação e evitar a proliferação de fungos pelo acúmulo de água, sais e fertilizantes no fundo da bandeja.

Diversos tipos de estruturas de bancadas são utilizados. A mais comum é a do tipo “latada”, que consistem basicamente em manter as bandejas de produção suspensas por arames

de aço galvanizado apoiados em estruturas metálicas, madeira ou alvenaria, conforme pode ser observado na figura 3. Essas estruturas são bastante utilizadas devido a sua fácil, instalação e baixo custo, visto que as bandejas de produção de mudas não são equipamentos pesados, ou seja, não demandam grandes estruturas de apoio.



Figura 3 – Bancadas de produção de mudas (EMBRAPA, 2016).

- Tecnologias aplicadas:

Atualmente, algumas estufas contam com diversas tecnologias que contribuem com a aceleração do desenvolvimento da planta e melhoria da qualidade. Dessas tecnologias, pode-se citar por exemplo: controle de temperatura, telas móveis para o controle de luminosidade incidente, teto e laterais móveis para o controle de temperatura de cultivo, sistemas de aquecimento e resfriamento e diversos tipos de sistemas de irrigação, podendo ser manuais ou automáticos.

Nota-se que no estado da arte da produção de mudas, não está contemplado a tecnologia de aquecimento do substrato como forma de regularização da temperatura da semente que está sendo semeada. Também é possível observar a ausência de automação mais robusta com sensores e controladores integrados à internet.

2.3. INFLUÊNCIA DOS FATORES AMBIENTAIS NO CULTIVO

2.3.1. Influência Da Temperatura Ambiente

A temperatura ambiente constitui um dos principais fatores que influenciam a semente, afetando a germinação total e a velocidade de germinação, pois tende a influenciar a velocidade de absorção de água e as reações bioquímicas determinantes no processo germinativo. (FERREIRA e BORGHETTI, 2004) (CARVALHO e NAKAGAWA, 2012).

A germinação pode ser definida como a saída do estado de repouso do embrião e a retomada da atividade metabólica, sendo também o desenvolvimento do embrião e a emergência da plântula até tornar-se independente das reservas da semente (FERREIRA e BORGHETTI, 2004) (CARVALHO e NAKAGAWA, 2012). Externamente é marcada pelo rompimento da testa e a protusão da radícula. (FENNER e THOMPSON, 2005).

Cada espécie apresenta a temperatura mínima, máxima e ótima para a germinação. A temperatura é chamada de ótima quando ocorre o máximo de germinação no menor tempo. Acima e abaixo dos limites máximo e mínimo, respectivamente, pode ocorrer a morte dos embriões. A faixa de 20 a 30°C mostra-se adequada para a germinação de grande número de espécies subtropicais e tropicais (LARCHER, 2003) (FERREIRA e BORGHETTI, 2004) (BRANCALION *et al.*, 2010).

Na tabela 1 é possível observar alguns valores de temperaturas ambientes para seus respectivos cultivares.

| ESPÉCIE | TEMPERATURA (°C) | | |
|------------------|------------------|--------|---------|
| | MÍNIMA | MÁXIMA | ÓTIMA |
| Abóbora | 16 | 38 | 20 - 30 |
| Alface | 2 | 29 | 20 |
| Berinjela | 16 | 35 | 20 - 30 |
| Beterraba | 4 | 35 | 20 - 30 |
| Cebola | 2 | 35 | 20 |
| Couve-flor | 4 | 38 | 20 - 30 |
| Melancia | 16 | 41 | 20 - 30 |
| Melão | 16 | 38 | 20 - 30 |
| Pepino | 16 | 41 | 20 - 30 |
| Pimentão/pimenta | 16 | 35 | 20 - 30 |
| Quiabo | 16 | 41 | 20 - 30 |
| Repolho | 4 | 38 | 20 - 30 |
| Tomate | 10 | 35 | 20 - 30 |

Tabela 1 – Faixas de temperatura de produção de mudas. (EMBRAPA, 2016).

De maneira geral, temperaturas muito baixas diminuem a velocidade de germinação das sementes enquanto temperaturas muito altas aceleram a velocidade de germinação. Isso ocorre, pois, a temperatura altera a capacidade de absorção de água da semente.

Temperaturas muito longe da ideal, podem inclusive induzir a semente a dormência. Sementes de alface acima de 30°C podem ser induzidas a dormência na fase de embebição. Este fenômeno é conhecido como termoinibição, porém é um processo reversível, uma vez que ao retornar a temperaturas favoráveis, a semente volta a germinar normalmente. Porém em outros casos existe a termodormência, que corresponde ao período em que a semente permanece embebida sob altas temperaturas. Neste caso, mesmo retornando a temperaturas favoráveis, as sementes ainda permanecem em estado de dormência, necessitando de outras ações para que haja a quebra da dormência e conseqüentemente a germinação das mesmas (Embrapa, 2016).

| ESPÉCIE | TEMPERATURA (°C) | | |
|------------------|------------------|--------|---------|
| | MÍNIMA | MÁXIMA | ÓTIMA |
| Abóbora | 16 | 38 | 20 - 30 |
| Alface | 2 | 29 | 20 |
| Berinjela | 16 | 35 | 20 - 30 |
| Beterraba | 4 | 35 | 20 - 30 |
| Cebola | 2 | 35 | 20 |
| Couve-flor | 4 | 38 | 20 - 30 |
| Melancia | 16 | 41 | 20 - 30 |
| Melão | 16 | 38 | 20 - 30 |
| Pepino | 16 | 41 | 20 - 30 |
| Pimentão/pimenta | 16 | 35 | 20 - 30 |
| Quiabo | 16 | 41 | 20 - 30 |
| Repolho | 4 | 38 | 20 - 30 |
| Tomate | 10 | 35 | 20 - 30 |

Tabela 2 – Faixas de temperatura de produção de mudas. (EMBRAPA, 2016).

2.3.2. *Influência Da Temperatura Do Solo*

Durante o dia o solo pode acumular grande quantidade de calor, liberando esse calor a noite, atuando como reservatório de energia (GEIGER *et al.*, 2003). A temperatura do solo depende da razão entre a absorção e irradiação de calor. Essa relação é variável ao longo do dia e ao longo do ano (WU AND NOFZIGER, 1999)

A temperatura do substrato é uma das propriedades que influenciam diretamente uma série de processos relacionados às plantas. Além disso, a temperatura do substrato governa a

evaporação e o arejamento, bem como o tipo e a taxa das reações químicas que ali ocorrem (COMETTI, 2013; DINIZ *et al.*, 2014; NASCIMENTO *et al.*, 2016)

A temperatura do substrato está diretamente ligada as condições meteorológicas do ambiente em que se encontra a produção. A diferença das temperaturas atmosféricas e do substrato podem iniciar uma série de processos de transferência de energia que influenciam diretamente na germinação da semente (CARNEIRO *et al.*, 2013).

Temperaturas do solo entre 10 e 28 graus Celsius afetam a taxa de troca gasosa do solo com o meio ambiente e aumentam a intensidade das atividades das enzimas extracelulares que degradam os polímeros orgânicos no solo (CONANT *et al.*, 2008).

Aumentam também as taxas de respiração microbiana (WALLENSTEIN *et al.*, 2010). Aumentando também a mineralização de nitrogênio no solo pelo aumento da atividade microbiana no processo de decomposição da matéria orgânica (YAN AND HONGWEN, 2014). Em temperaturas abaixo do ponto de congelamento o processo de mineralização diminui reduzindo a atividade microbiana. Neste intervalo, apresentam as melhores performances do seu metabolismo (KAISER *et al.*, 2007) Temperaturas acima de 58 graus Celsius e abaixo do ponto de congelamento se tornam inviáveis para a vida microbiana (BRISTOW, 1998)

A temperatura do substrato tem forte influência no crescimento da planta e na capacidade de absorção de água e no crescimento das raízes e do caule (TOSELLI *et al.*, 1999)

A capacidade de absorção de água decresce à medida que abaixa a temperatura do solo, isto ocorre, pois, quanto menor a temperatura da água, maior a viscosidade. Consequentemente, a redução da absorção de água diminui a capacidade de fotossíntese, prejudicando o desenvolvimento da planta (TOSELLI *et al.*, 1999). O aumento da viscosidade também prejudica a capacidade de absorção os nutrientes e o transporte pelas células da planta em desenvolvimento (GROSSNICKLE, 2000).

Apesar de ser bastante relevante a influência da temperatura do substrato no desenvolvimento das plantas, existem poucos estudos que abordam com propriedade este tema (CAVALCANTI, 2019).

2.3.3. *Influência Da Umidade Do Solo*

A umidade do solo é um dos fatores de maior importância na produção de mudas, pois é a água que sinaliza para a semente o momento de quebra da dormência e, é por meio da água que a planta realiza sua nutrição (FILHO, 2017).

A água presente no solo é responsável pela grande maioria dos processos fisiológicos e bioquímicos da semente, especialmente no período de embebição, germinação, emergência e floração (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

Inicialmente deve haver equilíbrio na quantidade de água utilizada na irrigação. O solo não deve exceder 85% de umidade, porém não pode estar abaixo de 50%. Tanto o excesso de água quanto a falta de água podem prejudicar o processo de germinação da semente das mudas (EMBRAPA, 2016).

2.3.4. *Influência Da Luz*

A luz também é um dos fatores mais relevantes no processo de produção de mudas. A radiação luminosa pode ser: Através de fonte natural ou artificial. O sol constitui a fonte natural de luz e as lâmpadas constituem a fonte de iluminação artificial.

A luz é o fator que permite a fotossíntese sendo também um dos fatores principais na alongação do caule, das ramificações, da expansão foliar e fixação biológica (CÂMARA, 2000).

A radiação luminosa é primordial no processo de absorção e conversão do dióxido de carbono da atmosfera em açúcares e água que virão a formar hidrocarbonetos responsáveis por formar as estruturas básicas para manutenção da vida da planta (WHATLEY; WHATLEY, 1982).

Outro fator que merece destaque é a influência que a luz solar exerce nas mudanças dos fenótipos da planta. Um exemplo disso é o fototropismo, ou seja, a capacidade que a planta possui de se mover em direção a luz para melhor captação da radiação luminosa. Outro fenômeno que merece ser citado é a fotoblastia, que consiste na influência que a luz exerce na capacidade de germinação da semente. Sementes ditas fotoblásticas positivas apresentam resposta mais rápida no processo de germinação quando semeadas a profundidade que permitam receber luz (TAIZ *et al.*, 2017).

2.4. TECNOLOGIAS APLICADAS EM CASAS DE VEGETAÇÃO

2.4.1. Casas de vegetação

Recentemente foi possível notar uma significativa mudança nos processos de fabricação das indústrias. Atualmente estão sendo utilizadas tecnologias mais inteligentes em suas linhas de produção e o processo geralmente está conectado à internet, melhorando o controle, a atuação e a gestão de dados. Todas essas mudanças e aumento de performance são atribuídos o nome de indústria 4.0 (SANTOS *et al.*, 2018).

Essas mudanças estão gerando impactos também na agricultura. Os processos utilizados no campo não estão mais seguindo os modelos tradicionais de plantio. A cada dia mais tecnologia é empregada na produção de alimentos, seja através de maquinário mais tecnológico e na utilização de drones e satélites. A agricultura 4.0 surgiu inspirada nas inovações tecnológicas ocorridas nos processos industriais que são intermediadas pela internet, gerando maior flexibilização do processo. (ESPERIDIÃO; SANTOS; AMARANTE, 2019).

Dentro desse contexto, a casa de vegetação é uma das aplicações da agricultura 4.0. Consiste em um ambiente no qual as variáveis climáticas são completamente controladas. Em situações tradicionais de cultivo, a irrigação, a luminosidade, a temperatura e outros fatores são determinados exclusivamente pelas condições dadas pela natureza, já na casa de vegetação, todas essas variáveis são controladas utilizando sensores, atuadores e dispositivos de controle e normalmente se aplicam a cultivos de hortaliças, legumes e frutas em pequena escala atualmente (TERUEL, 2010).

2.4.2. Sensores

2.4.2.1. Termopar

Os termopares são os sensores de temperatura mais confiáveis e utilizados da indústria. O princípio utilizado na sua forma de medição é chamado de efeito Seebeck conhecido desde meados do ano de 1900, porém, apenas recentemente que este princípio foi empregado em larga

escala. Basicamente consiste em uma junção de dois fios constituídos de materiais diferentes, recebendo o nome de termopar.

O circuito de um termopar pode ser observado na figura 4. É possível notar que no circuito existe a junção de medição e a junção de referência. O efeito Seebeck ocorre pelo surgimento de uma tensão de circuito aberto na junção de referência, quando essa e a junção de medição estão submetidas a temperaturas diferentes. (MOREIRA, 2002)

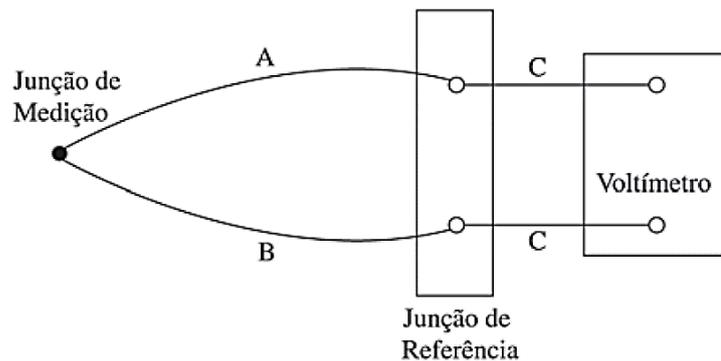


Figura 4 – Circuito do termopar. Extraído de (MOREIRA, 2022).

O efeito Seebeck pode ser observado em qualquer junção de dois fios metálicos submetidos a um gradiente de temperatura em suas junções. Qualquer par metálico de diferentes composições irá surgir uma tensão em seus terminais quando as junções forem submetidas a tensões diferentes. Portanto, devido a essa propriedade, existe diversas formas de ligação das ligas metálicas e conseqüentemente surgem diversos tipos de termopares, com características para uma situação específica de uso.

Os principais tipos de termopares são do tipo: E, J, K, R, S. A figura 5 ilustra a performance de cada tipo de termopar submetido a um determinado gradiente de temperatura.

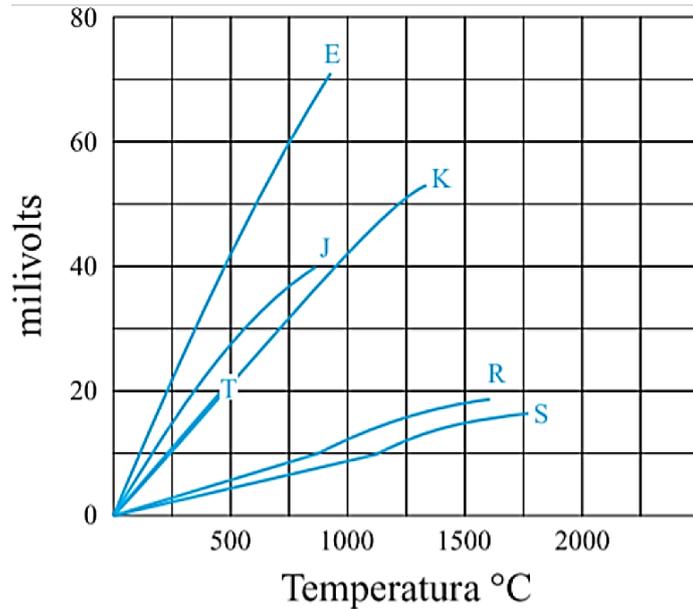


Figura 5 – Curvas de milivolts por temperatura. Extraído de (SOUZA, 2013).

É possível observar que cada tipo de termopar se comporta de maneira diferente, conseqüentemente cada termopar será melhor aplicado a cada situação específica. Por exemplo, na figura 5 é possível observar que o termopar do tipo E, é o que apresenta maior sensibilidade a variação de temperatura. Pois pequenas variações de temperatura produzem grandes variações de tensão. Ou seja, é um termopar de alta precisão, porém com uma faixa de trabalho limitada. Já o termopar do tipo S possui uma faixa de trabalho maior, porém sua precisão é menor em relação ao do tipo E.

2.4.2.2. Sensor de umidade do solo por capacitância

O sensor capacitivo de umidade de solo utiliza a propriedade dos capacitores para conseguir medir o nível de umidade presente no substrato.

Um capacitor é um componente eletrônico que consiste basicamente em duas placas condutoras paralelas separadas por um material isolante chamado de dielétrico. Ao aplicar tensão no capacitor, cargas se acumulam nas placas paralelas. A quantidade de cargas acumuladas nas placas depende de vários fatores como: a área das placas, a distâncias entre as mesmas e o tipo de dielétrico que está sendo utilizado.

No caso do sensor capacitivo de umidade de solo, as placas paralelas são as hastes que vão diretamente ao solo. Estas não variam sua área ou distância entre elas. O dielétrico corresponde ao substrato que permeia as hastes. Este sensor mede a umidade do solo ao se medir a quantidade de carga acumulada em suas hastes que é proporcional a umidade presente no substrato. Pelo fato do dielétrico ser o substrato que envolve o sensor capacitivo, a alteração da umidade presente no mesmo altera suas características elétricas e consequentemente as cargas acumuladas no capacitor. (DOS SANTOS, 2018).

Na figura 6 é possível observar um desenho esquemático do sensor de umidade capacitivo. Nota-se a presença de um campo elétrico entre os terminais positivo e negativo do sensor. Este campo elétrico surge pelo acúmulo de cargas elétricas nos terminais do sensor. É possível observar a alteração do campo elétrico da situação (a) para a situação (b). Essa alteração ocorreu devido a alteração do material dielétrico entre as placas, que alterou a concentração de cargas elétricas nos terminais do sensor. Ou seja, a mudança das propriedades elétricas do material dielétrico, gera mudanças nas cargas acumuladas nos terminais do sensor. Ao medir essa concentração de cargas, é possível medir a umidade presente no substrato.

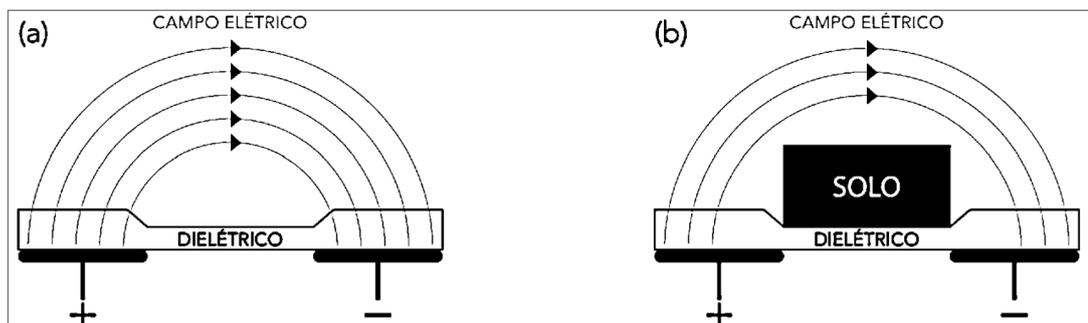


Figura 6 – Sensor capacitivo de umidade de solo. Extraído de (DANIEL, 2020).

2.4.3. Atuadores

2.4.3.1. Cabo de calefação

Os cabos de calefação são muito utilizados na construção civil para o aquecimento do piso em edificações em que o clima é predominantemente frio. Estes cabos são basicamente constituídos de materiais que ao serem percorridos por corrente elétrica produzem calor pelo efeito Joule. O efeito Joule diz que todo condutor quando percorrido por corrente produz calor, porém os cabos elétricos tradicionais geralmente são constituídos de elementos como cobre ou

alumínio que possuem boa condutividade e baixa resistividade, gerando dessa forma pouco calor. Já os cabos de calefação são feitos de fibra de carbono e, portanto, tem o potencial de aquecer bastante quando percorridos por corrente elétrica. Com isso, o calor produzido pelos cabos de calefação é irradiado aquecendo tudo ao seu redor inclusive os pisos de ambientes domésticos.

2.4.3.2. *Mergulhão*

Mergulhão é o termo mais utilizado para descrever o ebulidor elétrico muito utilizado para aquecer água. Este equipamento é apenas uma resistência elétrica que quando ligada a energia elétrica produz calor pelo efeito Joule. Os mergulhões são constituídos de uma alça isolante que vai ligada ao plug de energia e a parte metálica que irá gerar o aquecimento necessário para a aplicação. Na figura 7 é possível observar as características físicas de um mergulhão.



Figura 7 – Ebulidor elétrico. (Elaborado pelo autor, 2022).

2.4.3.3. *Bombas*

Bombas são um dispositivo que movem fluidos, podendo ser líquidos ou gases, por ação mecânica, normalmente convertendo de energia elétrica em energia hidráulica. As bombas são

os equipamentos responsáveis por fornecer a energia necessária para que os fluídos consigam se deslocar de um ponto a outro, superando obstáculos e a própria resistência da tubulação. (FORTES, 2012)

Existem diversas classificações de bombas, porém o foco deste trabalho será dado nas bombas submersas, que são bombas projetadas para trabalhar continuamente mergulhadas no fluido que se deseja transportar.

2.4.3.4. *Iluminação*

A iluminação é um dos fatores mais críticos no processo de produção de alimentos. Portanto uma iluminação de qualidade é fundamental no bom andamento do plantio. Em casas de vegetação totalmente controladas, a iluminação é fornecida por lâmpadas para a obtenção de maior controle. A utilização de iluminação natural se torna pouco interessante, pela complexibilidade na regulação do nível de radiação solar individualmente a cada planta, bem como a frequência do espectro luminoso aplicado ao cultivo, justificando o uso da iluminação artificial.

Dessa maneira, a utilização de iluminação artificial se torna uma solução mais prática. Existem diversos tipos de lâmpadas no mercado atualmente, como: Fluorescentes, halógenas, LED, dentre outras. Dentre as lâmpadas citadas, a mais eficiente do ponto de vista energético é a lâmpada de LED.

A sigla LED vem do inglês *light-emitting diode* que significa diodo emissor de luz. Seu funcionamento se baseia no princípio do diodo que dependendo da constituição das suas camadas N-P pode emitir luz quando polarizado diretamente por corrente elétrica.

2.4.4. **Controladores**

2.4.5.1. *Sistemas de controle*

Um sistema de controle pode ser definido como um conjunto de subsistemas e processos utilizados com o objetivo de se obter determinado tipo de saída desejado. (NISE, 2020)

Basicamente os sistemas de controle se dividem em dois grupos: sistemas de controle de malha aberta e sistemas de controle de malha fechada.

Os sistemas de controle de malha aberta geralmente são os mais simples, mais fáceis de se implementar e conseqüentemente mais viáveis do ponto de vista econômico. (NISE, 2020)

Na figura 8 é possível observar um diagrama de blocos que representa um sistema de controle de malha aberta, através do qual observa-se sua simplicidade operativa, uma vez que a saída não retroalimenta a entrada, ou seja, a entrada não tem um sinal de retorno sobre o comportamento da saída.



Figura 8 – Sistema de controle de malha aberta (Adaptado de NISE, 2020).

Na figura 8 nota-se a simplicidade de um sistema de controle de malha aberta. Este recebe este nome pois a saída não retroalimenta a entrada, ou seja, a entrada não tem um sinal de retorno sobre o comportamento da saída.

A máquina de lavar é um exemplo simples de aplicação de um sistema de controle de malha aberta. Ou seja, ao escolher, por exemplo, o modo de lavagem rápida, uma programação interna irá comandar todo o procedimento de lavagem, porém nenhum sinal será enviado de volta informando em que situação se encontra a roupa durante a lavagem.

Um sistema de controle de malha fechada é aquele em que a saída retroalimenta a entrada obtendo dessa maneira a informação do comportamento da saída, podendo assim a entrada ser ajustada para o melhor desempenho ou melhor precisão da saída.

Na figura 9 é possível observar um diagrama de blocos que representa um sistema de controle de malha fechada.

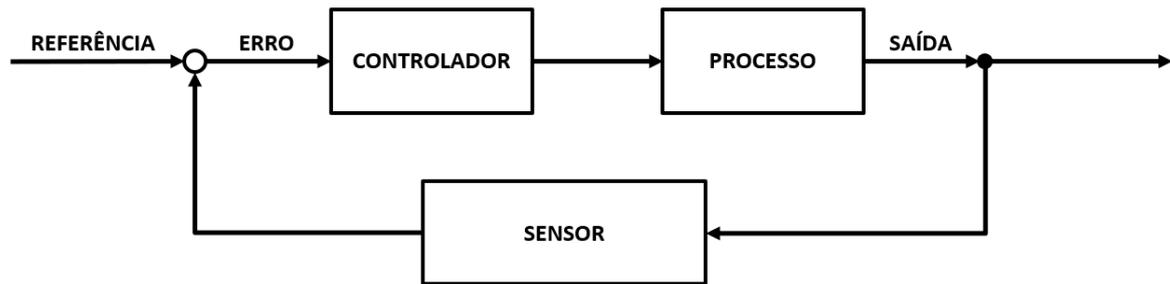


Figura 9 – Sistema de controle de malha fechada (Adaptado de NISE, 2020).

Neste sistema é possível observar uma significativa diferença em relação ao sistema de malha aberta. Mas, a diferença de maior importância é que a saída está retroalimentando a entrada por meio de um sensor. Esse sinal de retorno permite analisar se a saída está de acordo com o que foi estabelecido pelo sinal de referência.

A diferença entre o sinal medido e a referência é chamado de erro. Este erro é um sinal que será levado para o controlador para que este possa atuar da maneira que foi construído tentando aproximar o máximo possível o sinal de retorno com o sinal de referência.

O controlador é a parte fundamental em um sistema de controle de malha fechada. Este que irá determinar de que maneira será feita a atuação no processo para que se corrija o erro entre a referência e o sinal medido.

Existem diversos tipos de controladores, porém os mais utilizados são os do tipo On-Off e do tipo PID.

2.4.5.2. Controle On-Off

As características principais do controle On-Off é a simplicidade de desenvolvimento e baixo custo de implementação. Basicamente este controle avalia se a saída do processo está acima ou abaixo do valor de referência (LI, 2010). Caso o valor medido esteja abaixo, o controlador envia um sinal ao processo para que este entre em operação. Caso o valor medido esteja acima do valor de referência então este para a operação do processo. Este tipo de controle é muito utilizado em sistemas de aquecimento ou resfriamento que não demandam muita precisão

Na figura 10 é possível observar que apesar da vantagem da simplicidade, o controle On-Off apresenta grande desvantagem pois nunca estabiliza no valor de referência. Este sempre permanece oscilando em torno da referência. Em algumas aplicações isto não significa um problema, porém em aplicações que se necessita de precisão na saída do sistema, o controle On-Off não é indicado.

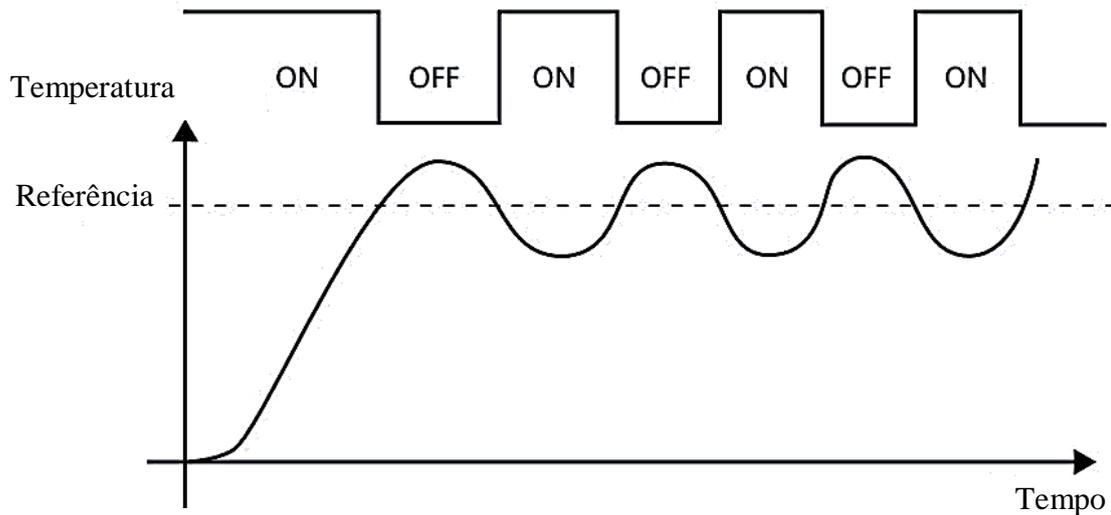


Figura 10 – Sistema de controle On-Off. (Elaborado pelo autor, 2022).

2.4.5.3. Controle PID

A sigla PID são as iniciais de proporcional, integral e derivativo. O controle PID utiliza de várias ferramentas matemáticas para que o valor de saída do sistema chegue ao valor de *setpoint* da melhor maneira possível e com a estabilidade necessária para a aplicação.

Na figura 11 é possível observar uma malha de controle PID. Nota-se que o controlador está dividido em três blocos, o bloco proporcional, o bloco integral e o bloco derivativo, cada um com as suas funções na malha.

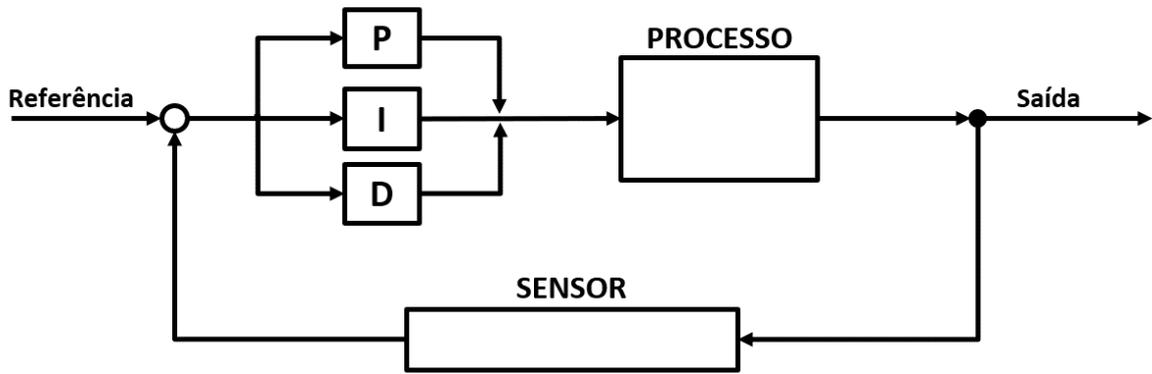


Figura 11 – Sistema de controle PID. (Adaptado de NISE, 2020).

O Bloco proporcional é responsável por aplicar um ganho ao erro do sistema. Ou seja, ele pode amplificar ou atenuar o sinal de erro, como pode ser observado na equação 1, em que K_p é representa o ganho proporcional e $e(t)$ representa o erro ao longo do tempo.

$$P = K_p e(t)$$

Equação 1 – Bloco proporcional do PID. (NISE, 2020).

A atribuir valores maiores que 1 na constante K_p geralmente faz com que a saída do sistema atinja o valor de referência mais rápido, porém valores muito altos de K_p podem levam a instabilidade do sistema ou gerar sobrecarga no sistema.

O bloco integral é responsável por eliminar o erro de regime permanente. Este erro consiste na característica que alguns sistemas possuem em que apenas o ganho proporcional não é suficiente para gerar a ação do sistema para alterar sua saída. Dessa forma, o bloco integral soma e acumula continuamente o erro ao longo de todo o processo, dessa maneira o erro acumulado passa a ser de magnitude suficiente para gerar a ação de correção no sistema aplicado. Na equação 2, é possível observar o somatório dos erros ao longo de todo o tempo do processo multiplicado pelo ganho integral K_i .

$$I = K_i \int_0^t e(t) dt$$

Equação 2 –Bloco integral do PID. (NISE, 2020)

O bloco derivativo é responsável por analisar a taxa de variação da saída do sistema. Dessa forma, caso a saída esteja se aproximando de forma muito rápida em direção ao *setpoint* o bloco derivativo irá atenuar o comando no processo para que a saída não ultrapasse o sinal de referência. É recomendado usar o bloco derivativo em sistemas em que não pode ocorrer um surto na saída, como por exemplo em sistemas que envolvem pressão, como caldeiras.

$$D = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Equação 3 –Bloco derivativo do PID. (NISE, 2020)

Dessa forma, a ação PID do controlador pode ser resumida como o somatório da contribuição parcial de cada um dos blocos no processo, como pode ser visto na equação 4.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Equação 4 –Equação completa do PID. (NISE, 2020).

2.4.5. *Microcontroladores*

O microcontrolador consiste em um único circuito integrado que reúne um núcleo de processador, memórias voláteis e não voláteis e diversos periféricos de entrada e de saída de dados. De certa forma pode ser considerado um computador de pequena escala pelas semelhanças com ele.

Os microcontroladores ganharam grande campo de aplicações nas mais diversas áreas por sua versatilidade e baixo custo. Uma dessas aplicações está no ramo da prototipagem.

Diversas plataformas de prototipagem atualmente utilizam microcontroladores nos seus projetos. Na figura 12 é possível observar uma placa de prototipagem da plataforma Arduino, nela nota-se a presença do chip do microcontrolador Atmega328

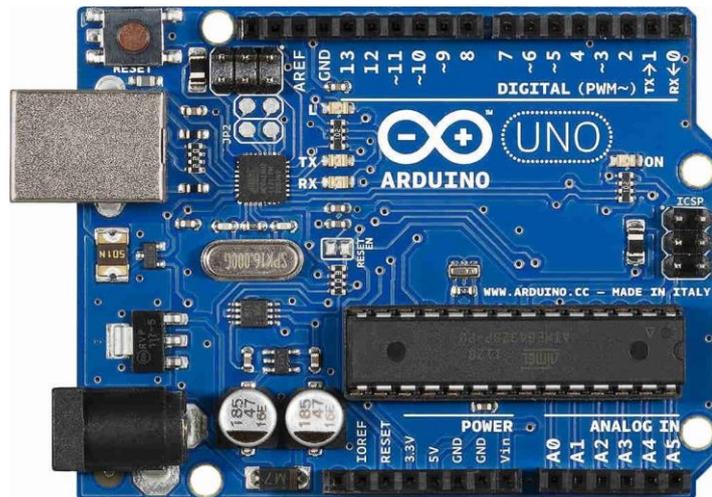


Figura 12 – Placa de Arduino. (Elaborado pelo autor, 2022).

2.4.6. Sistemas De Indicação

Para que seja possível o constante acompanhamento do processo, é necessário que existam equipamentos capazes apresentar as informações de forma clara e rápida.

Uma solução eficiente que é comumente empregada em microcontroladores é utilização de módulos de displays de sete segmentos como pode ser visto na figura 13.

O display de sete segmentos é um dispositivo que possui 10 terminais de conexão elétrica podendo exibir resultados alfanuméricos. O módulo de displays de sete segmentos para Arduino, constitui-se de quatro displays e um separador, porém com apenas quatro terminais de ligação elétrica. Essa baixa quantidade de terminais otimiza o processo de montagem e prototipagem e só é possível pois no próprio módulo existe um circuito e uma programação própria para interpretar as informações vindas do controlador.

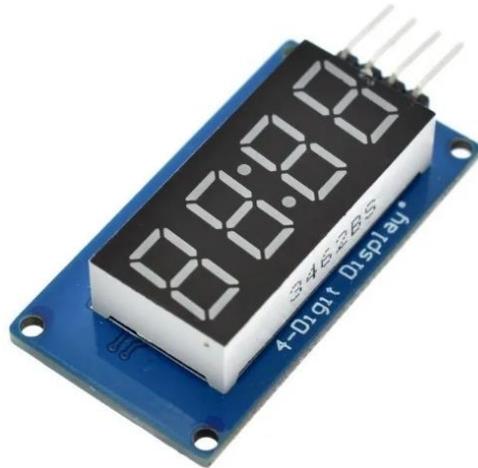


Figura 13 – Módulo de display de sete segmentos. (Elaborado pelo autor, 2022).

2.4.7. Pwm

PWM é um acrônimo em inglês para *Pulse Width Modulation*, ou em português: Modulação por Largura de Pulso. Esta técnica utiliza um nível de tensão fixa sendo capaz de entregar vários níveis de potência dependendo do ciclo de chaveamento em alta frequência.

Na figura 14 é possível observar um circuito constituído de uma fonte de tensão contínua em série com uma chave e um led. Neste circuito, ao fechar a chave, 100% da potência será aplicada ao led. Porém, ao abrir e fechar a chave em frequência muito alta, nota-se que a potência aplicada no led será menor. A potência aplicada na carga depende diretamente da porcentagem do tempo em que a chave fica ligada durante o chaveamento.

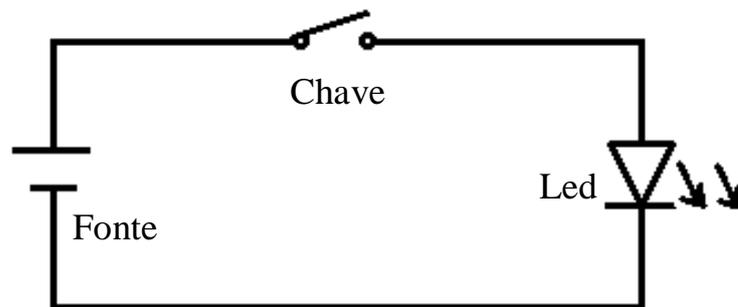


Figura 14 – Circuito de exemplo de um PWM. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 15 é possível observar vários ciclos de trabalho de um PWM. Quando o ciclo está a 10% significa que 10% do período a chave estará ligada e 90% do período estará desligada. Nesse cenário apenas 10% da potência da fonte estaria sendo aplicada a carga. A mesma ideia se aplica para todos os ciclos. No ciclo de 50%, metade da potência seria aplicada à carga. No ciclo de 90%, seriam aplicados à carga 90% da potência.

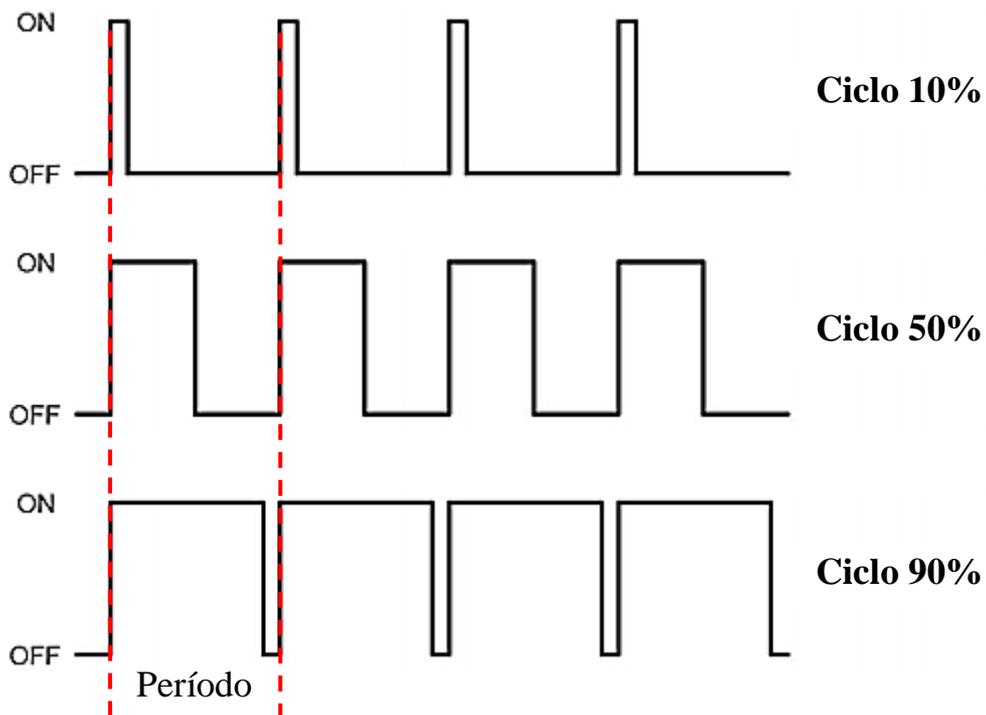


Figura 15 – Ciclos de trabalhos de um PWM. (Elaborado pelo autor, 2022).

2.4.8. *Relê de estado sólido*

O relê de estado sólido é um dispositivo semicondutor que atua de maneira muito semelhante aos relês eletromecânicos tradicionais. Ou seja, são capazes de acionar uma carga de grande potência a partir de um circuito de baixa potência.

A grande vantagem do relê de estado sólido é que este não possui partes mecânicas móveis em seu interior. Isso confere a ele uma robustez muito maior, maior confiabilidade e menor manutenção. Mas, para algumas aplicações a sua principal vantagem é a capacidade de

chaveamento em alta frequência, ou seja, a capacidade de liga e desligar centenas de vezes por segundo. Essa característica permite que este seja acionado utilizando a técnica PWM. Portanto, com o relê de estado sólido é possível aplicar diversos níveis de tensão em uma carga a partir de uma fonte de tensão com valor fixo.



Figura 16 – Relê de estado sólido. (Elaborado pelo autor, 2022).

2.5. REFERÊNCIAS

- ABEL, C. **The vertical garden city: towards a new urban topology**. CTBUH Journal, 2010.
- AMARAL, Cristiane de Avila. **Vertical farm (fazenda vertical): análise da qualidade do investimento usando protótipo de empreendimento imobiliário**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2018.
- ALPAY, Ö.; ERDEM, E. **Climate Control of an Smart Greenhouse based on Android**. International Conference On Artificial Intelligence And Data Processing (Idap), Turkey, p. 1-5, set. 2018.
- BANERJEE, C.; ADENAEUER, L. **Up, Up and Away! The Economics of Vertical Farming**. Journal of Agricultural Studies, 2014.
- BAULCOMBE, D. et al. **Reaping the benefits: Science and the sustainable intensification of global agriculture**. London: The Royal Society, 2009. Disponível em: https://royalsociety.org/~media/royal_society_content/policy/publications/2009/4294967719.pdf. Acesso em: 15 nov. 2021.
- BIN ISMAIL, Muhammad Ikhwan Hanif; THAMRIN, Norashikin M. **IoT implementation for indoor vertical farming watering system**. In: 2017 International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE). IEEE, 2017.
- BIRKBY, Jeff. **Vertical farming**. ATTRA Sustainable Agriculture. NCAT IP516, 2016.
- BRANCALION, P. H. S.; NOVENBRE, A. D. L. C.; RODRIGUES, R. R. **Temperatura ótima de germinação de sementes de espécies arbóreas brasileiras**. Revista Brasileira de Sementes, Londrina, v. 32, n. 4, p. 15 - 21, 2010.
- CÂMARA, Gil Miguel de Sousa; HEIFFIG, L. S. **Fisiologia, ambiente e rendimento da cultura da soja**. In: Soja: tecnologia da produção II[S.l: s.n.], 2000.
- CARNEIRO, R.G., MOURA, M.A.L., DA FONSECA LYRA, R.F., DE ANDRADE, A.M.D., DOS SANTOS, A.B., MAIA, R.G.X., **Fluxo de Calor do Solo e Saldo de Radiação Dentro de uma Área de Mata Atlântica em Comparação com uma área de Cana-de-Açúcar**. Revista Brasileira de Geografia Física, 2013.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 5. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2012. 590 p.
- CAVALCANTI, Sávio Duarte Lopes et al. **Variação espaço-temporal da temperatura do substrato em bandejas de produção de mudas**. Revista de Agricultura Neotropical, v. 6, n.

1, p. 66-73, 2019.

CENCI, Sérgio Agostinho; SOARES, Antônio Gomes; FREIRE JUNIOR, Murillo. **Manual de perdas pós-colheita em frutos e hortaliças**. 1997.

COMETTI, A.G. **Misprogramming prevention in solid-state memory**. U.S. Patent Application. 2013

CONANT, R.T., DRIJBER, R.A. and HADDIX, M.C. **Sensitivity of organic matter decomposition to warming varies with its quality**. *Global change biology*, 14: 868-877. 2008

DANIEL, Ederson Afonso et al. **APRIMORAMENTO TECNOLÓGICO NO TESTE DE EMERGÊNCIA DE SEMENTES DE SOJA EM LEITO DE AREIA**. 2020.

DESPOMMIER, D. **Farming up the city: The rise of urban vertical farms**. Trends in Biotechnology, 2013

DESPOMMIER, D. **The vertical farm: controlled environment agriculture carried out in tall buildings would create greater food safety and security for large urban populations**. 2011

DESPOMMIER, D. **The vertical farm: feeding the world in the 21st century**. Macmillan. 2010.

DINIZ, J.M.T.,DANTAS, R.T.,FIDELIS,F.J. **Spatial-temporal variability of temperature and soil thermal diffusivity**. Lagoa Seca-PB. Revista Ambiente & Água, 9, 2014.

DOS SANTOS, Ana Claudia Davino; DE SÁ SANTANA, Irlândio; GONÇALVES, Mário Henrique Bento. **Confecção de sensores capacitivos de umidade á baixo custo**. 2018

ELLINGSEN, E.; DESPOMMIER, D. **The Vertical Farm - The origin of a 21st century Architectural Typology**. CTBUH Journal, 2008

FENNER, M.; THOMPSON, K. **The ecology of seeds**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 250 p.

FERREIRA, A. G.; BORGHETTI, F. **Germinação: do básico ao aplicado**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 323 p.

FILHO, A. C. M. **Sistema De Automação E Controle Inteligente Para Cultivo Protegido-Tecnologia Acessível Ao Pequeno Produtor**. p. 1–134, 2017

FORTES, Márcio Zamboti et al. **Eficientização energética com ajuste do ponto de operação de bombas centrífugas**. In: 27º Congresso Brasileiro de Manutenção. Anais... Rio de Janeiro. 2012.

GEBAUER, A. B.; PRICE, T. D. **Foragers to Farmers: An Introduction**. Transitions to

- Agriculture in Prehistory.** Madison, Prehistory Press, p. 1-10, 1992.
- GEIGER, R., ARON, R.N. e TODHUNTER, P. **The climate near the ground.** Rownaan and little field publishers, Inc. Lanham, 42-50. 2003
- GLASER, J. A. **Green chemistry with nanocatalysts.** Clean Technologies and Environmental Policy (2012).
- GROSSNICKLE, S.C. **Ecophysiology of Northern spruce species in the performance of planted seedlings.** NRC-CNRC, NRC, Research press, Ottawa, ON, Canada. 2000
- HORTON, R., BRISTOW, R.I., RLUITENBERG, G.J. and SAUER, T.J. **Crop residue effects on surface radiation and energy-balance review: Theoretical and applied climatology.** 1996
- JENSEN, Merle H. **Controlled Environment agriculture in deserts, tropics and temperate regions-A World Review.** International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical and Subtropical Greenhouses 578. 2001.
- KAISER, C., MEGER, A., BIASI, C., RUSULIMOVA, O., BARSUKOV, P. and RIETHER, A. **Conservation of soil organic matter through cryoturbation in arctic soils in Siberia.** J. Appli. Soil Ecol. 2007
- LA NOTTE, L. et al. **Hybrid and organic photovoltaics for greenhouse applications.** Applied Energy, v. 278, p. 115582, 15 nov. 2020.
- LARCHER, W. **Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups.** Berlin: Springer, 2003. 533 p.
- LESKOVAR, D.I.; STOFFELLA, P.J. **Vegetable seedling root systems: morphology, development, and importance.** HortScience, Alexandria, v.30, n. 6, p.1153-1159, 1995.
- LI, Bin et al. **Optimal on–off control of refrigerated transport systems.** Control Engineering Practice, v. 18, n. 12, p. 1406-1417, 2010.
- MAKISHIMA, N. **Cultivo de hortaliças.** 2.ed. Brasília: EMBRAPA-CNPQ, 26p. (EMBRAPA-CNPQ. Instruções Técnicas, 6), 1992.
- MINAMI, K. **Produção de mudas de alta qualidade em horticultura.** São Paulo: T. A. Queiroz, 1995.
- MOREIRA, Lúcia. **Medição de temperatura usando-se termopar.** Cerâmica Industrial, v. 7, n. 5, p. 51-53, 2002.
- NASCIMENTO, W. M.; PEREIRA, R. B. **Produção de mudas de hortaliças.** Embrapa Hortaliças-Livro técnico (INFOTECA-E), 2016.
- NASCIMENTO, W.M., ANDRADE, K.P., FREITAS, R.A., SILVA, G.O.,BOITEUX, L.S.

Germinação de sementes de tomateiro em diferentes temperaturas: Variabilidade fenotípica e heterose. Horticultura Brasileira, 2016.

NASCIMENTO, W. M.; PEREIRA, R. B. **Produção de mudas de hortaliças.** Embrapa Hortaliças-Livro técnico (INFOTECA-E), 2016.

NISE, Norman S. **Control systems engineering.** John Wiley & Sons, 2020.

ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** <<https://sustainabledevelopment.un.org>> Acesso em: agosto/2016.

SAHOUR, A. **Greenhouse Climate Controller by Using of Internet of Things Technology and Fuzzy Logic.** Instrumentation Measure Métrologie, Edmonton, v. 20, n. 1, p. 29-38, fev. 2021. Disponível em: <https://www.iieta.org/journals/i2m/paper/10.18280/i2m.200105>. Acesso em: 15 nov. 2021.

SANTOS, B. P. et al. **Indústria 4.0: Desafios E Oportunidades.** Revista Produção e Desenvolvimento, v. 4, p. 111–124, 2018.

SETYAWAN, Teguh. **MAX6675 K-Type Thermocouple with Arduino.** <https://microcontrollerslab.com/>, 2022 Acesso em: 14/03/22

SIVAMANI, S., BAE, N.-J., SHIN, C.-S., PARK, J.-W., & CHO, Y.-Y. **An OWL-Based Ontology Model for Intelligent Service in Vertical Farm.** In Lecture Notes in Electrical Engineering (2014).

SOUZA, Vitor Amadeu. **Termopar Com Pic.** Clube de Autores, 2013.

TAIZ, L. et al. Fisiologia e desenvolvimento vegetal Diversidade vegetal. v. 6 ed. 2017

TOSELLI, M., FLORE, J.A., MAROGONI, B. and MASIA, A. **Effects of root-zone temperature on nitrogen accumulation by non-breeding apple trees.** J. hort. Sci. Biotech., 1999

VISHWAKARMA, A. **IOT Based Greenhouse Monitoring And Controlling System.** 2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES), 2020

WALLENSTEIN, M.D., ALLISONS, S., ERNAKOVICH, J., STANWEG, J.M. SINABAUGH, R. **Controls on the temperature sensitivity of soil enzymes, a key driver of in-situ enzyme activity rates.** Global change biology. 2010

WHATLEY, J. M.; WHATLEY, F. R. **A luz e a vida das plantas.** São Paulo: Edusp, 1982.

WU, J. NOFZIGER, D.L. **Incorporating temperature effects on pesticide degradation into a management model.** J. Environ. Qual. 28: 92-100. 1999

YAN, L. and HANGWEN, X. **Effects of soil temperature, flooding and organic matter addition in N₂O emissions from a soil of Hongze lake wetland, China.** J. Appli. Soil Ecol.

2014.

ZHANG, W. et al. **Robust Model-based Reinforcement Learning for Autonomous Greenhouse Control**. arXiv Preprint, 2021. Submetido em 26 ago. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2108.11645>. Acesso em: 27 out. 2021.

3. LINHA DE PESQUISA E ENQUADRAMENTO NOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA CAPES

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) é uma fundação que atua na expansão e consolidação da pós-graduação *stricto sensu* em todos os estados brasileiros. A Engenharia é uma das grandes áreas da CAPES que tem como objetivo intensificar a produção de conhecimento para otimizar os processos de produção e desenvolver novas tecnologias.

Neste cenário, o Programa de pós-graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade (PPGEAS) tem como principal foco a formação de profissionais que atendam as demandas de uma sociedade cada vez mais exigente em relação a eficiência e sustentabilidade.

O PPGEAS apresenta atualmente duas linhas de pesquisa:

- 1 – Tecnologia e ciência dos materiais.
- 2 – Eficiência energética e sustentabilidade.

Esta pesquisa segue a segunda linha do PPGEAS, pois o principal enfoque está na produção de mudas de alta qualidade, em menor tempo, sem a utilização de agrotóxicos ou defensivos agrícolas e próximo aos grandes centros urbanos, utilizando o aquecimento do substrato como nova tecnologia das casas de vegetação. Dessa forma, otimizando todo o processo diminuindo os impactos ambientais.

Atualmente o processo de produção de mudas, verduras, hortaliças e frutas ainda segue os modelos tradicionais de cultivo, incluindo as plantações localizadas em centros urbanos. Com a proposta de desenvolvimento de tecnologia para casas de vegetação, diversos aspectos da produção poderão ser otimizados, como por exemplo o consumo de água que será entregue ao substrato somente o valor necessário ao cultivo, visto que todo o processo é monitorado por sensores, dessa forma tornando-o mais sustentável. Além disso, o ambiente controlado elimina a necessidade de agrotóxicos, pois este impede a entrada de insetos, fazendo com que a qualidade da produção seja muito maior em relação a produção tradicional. E, com a implementação do aquecimento do substrato a produção poderá ser feita em tempo menor, fazendo com que seja muito mais atrativo para o produtor do ponto de vista econômico.

4. OBJETIVOS

4.1. GERAL

Avaliar os impactos do aquecimento do substrato em um sistema de produção de mudas em ambiente fechado, com controle de iluminação, controle de umidade do solo e controle da temperatura da água de irrigação, e comparar com o desempenho de produção tradicional.

4.2. ESPECÍFICOS

- Desenvolver o sistema de controle PID para a temperatura do substrato;
- Implementar o sistema de controle PID para a temperatura da água de irrigação;
- Estabelecer o sistema de controle de umidade do solo;
- Desenvolver o sistema de iluminação artificial;
- Realizar as medições para que seja possível comparar o desempenho das mudas em ambiente controlado e das mudas em ambiente externo.

5. INTRODUÇÃO

Estima-se que até o ano de 2050 a população mundial irá atingir a marca de aproximadamente 9 milhões de pessoas. Diante dessa perspectiva, é imperativo a busca por tecnologias de produção de alimentos mais eficientes e que tenham menos impacto no meio ambiente (BAULCOMBE *et al.*, 2009; SAHOUR *et al.*, 2021).

A agricultura já emprega muita tecnologia em seus processos de produção. Mesmo assim, essa tecnologia não é suficiente para atender a futura demanda mundial de alimentos, alguns fatores como pragas, doenças e condições climáticas não são possíveis controlar. (ALPAY; ERDEM, 2018). Neste contexto, a tecnologia está aumentando mais sua participação nos processos agrícolas, com o objetivo de otimizar a produção. (VISHWAKARMA *et al.*, 2020)

Novas tecnologias como estufas de alta tecnologia e fazendas verticais estão crescendo em número a cada dia mais em escala mundial. Nestes ambientes é possível controlar variáveis como: aquecimento, ventilação, resfriamento, umidade relativa, umidade do solo, luz natural ou artificial e fertilização (LA NOTTE *et al.* 2020).

Dessa forma, a utilização destas tecnologias irá propiciar aumento de produção de alimentos próximos aos grandes centros urbanos, ou seja, alimentos mais frescos, empregando apenas as quantidades necessárias de recursos como água e energia elétrica para isso. (ZHANG *et al.*, 2021)

Portanto, dentro desse contexto, este trabalho tem como objetivo principal avaliar os impactos do aquecimento do substrato na produção de mudas. O desenvolvimento desta tecnologia pode ser agregado às estufas de alta tecnologia e às fazendas verticais tornar a processo de produção ainda mais eficaz.

6. METODOLOGIA

6.1. MÉTODO PROPOSTO

Em Daniel (2020) foi desenvolvido um sistema de aquecimento de substrato para os testes de emergência de soja em leito de areia. O objetivo de Daniel (2020) consistia em testar se a tecnologia proposta poderia reduzir o tempo de emergência da soja. O sistema que foi desenvolvido levou a resultados bastante expressivos reduzindo consideravelmente o tempo gasto neste teste.

Apesar dos resultados positivos, o sistema de controle de temperatura apresentava grande instabilidade que poderia gerar variações de temperatura de até 15°C, como pode ser visto na figura 17.

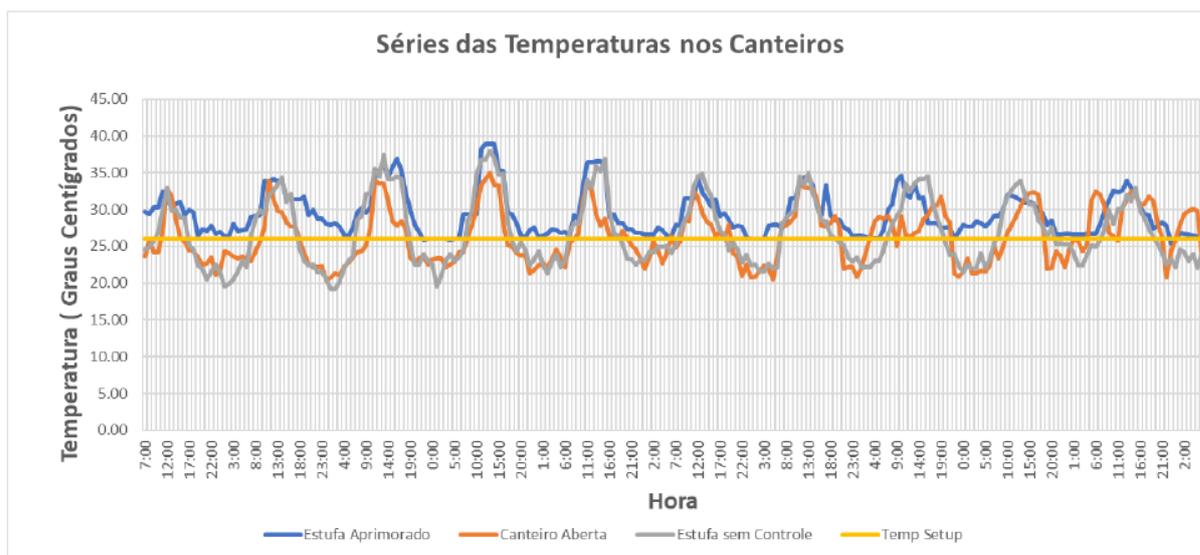


Figura 17 – Temperatura do substrato em Daniel (2020). Extraído de Daniel (2020).

Na figura 17 pode ser observado que a temperatura de referência para o experimento foi de 25°C e que a temperatura medida oscila muito em torno da referência. Essa oscilação é proveniente da característica do controlador utilizado, no caso, controle On-Off.

As vantagens de um sistema de controle On-Off são baixo custo e facilidade de implementação, porém este tipo de controle nunca estabiliza no valor de referência desejado, gerando oscilações que podem ser indesejáveis dependendo da aplicação.

O controle On-Off trabalha realizando comparação entre o valor medido e o valor de referência. Em uma aplicação de temperatura, caso esteja abaixo da temperatura de referência, o controlador ativa o sistema de aquecimento. Caso a temperatura medida esteja acima da temperatura de referência então o controlador desliga o sistema de aquecimento. Porém, dependendo da aplicação que se utiliza este controlador a temperatura pode subir muito rápido ou cair muito rápido, gerando instabilidade na saída do sistema. (LI, 2010)

Diante deste cenário, este trabalho propôs a utilização de uma técnica de controle mais sofisticada chamada controle PID. Este tipo de controle utiliza o erro entre o valor medido e o valor de referência e a partir deste valor e de cálculos matemáticos o controlador analisa o quanto deve atuar na planta para se chegar ao valor desejado da melhor maneira possível.

Outra situação observada em Daniel (2020) foi que o sistema de irrigação estava gerando choque térmico nas sementes. Pelo fato que enquanto o substrato estava com temperatura de 25°C, por exemplo, a temperatura ambiente poderia estar em outros valores mais baixos. Essa diferença de temperatura e conseqüentemente esse choque térmico provocado na semente durante o processo de irrigação tem diversos aspectos negativos para a germinação da semente podendo inclusive vir a inviabilizar a mesma.

Para mitigar esse problema, este trabalho propôs o desenvolvimento de um sistema de aquecimento para a água de irrigação também utilizando controle PID. Dessa forma, a irrigação irá ocorrer automaticamente mediante duas condições: Primeiramente que a umidade do substrato esteja abaixo de 50% e segundo que a temperatura da água de irrigação esteja igual e estabilizada com o mesmo valor da temperatura do substrato. Na figura 18 é possível observar um diagrama que representa o sistema de preaquecimento da água de irrigação.

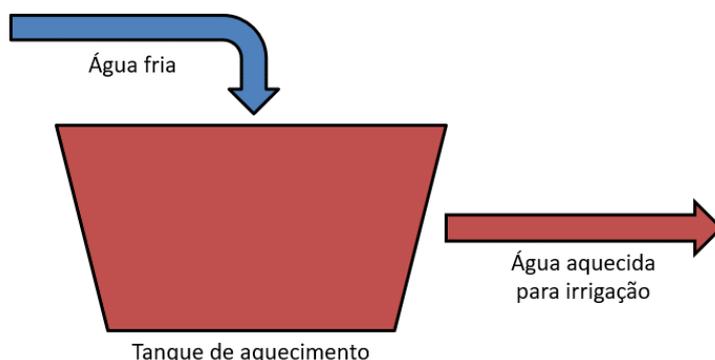


Figura 18 – Tanque para aquecimento da água de irrigação. (Elaborado pelo autor, 2022).

Portanto a proposta do trabalho consistiu no desenvolvimento de quatro sistemas:

- Sistema de controle PID de aquecimento do substrato;
- Sistema controle PID de aquecimento da água de irrigação;
- Sistema de irrigação;
- Sistema de iluminação do ambiente controlado.

E, após o desenvolvimento e implementação destes sistemas, foi feita uma análise dos impactos da utilização destas tecnologias na produção de mudas de hortaliças.

6.2. PROJETO

Na figura 19 é possível observar um diagrama esquemático de como o sistema de controle PID de aquecimento do substrato foi desenvolvido.

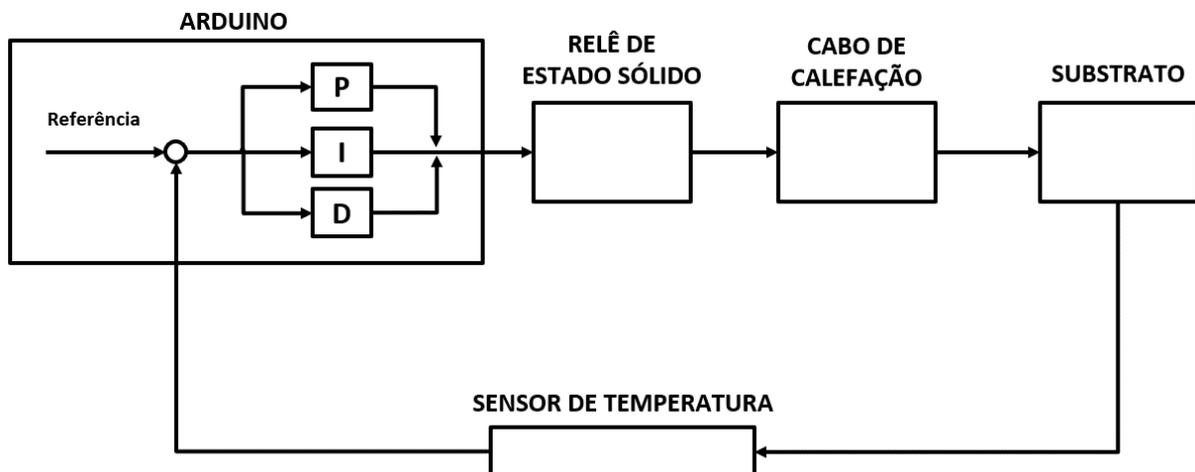


Figura 19 – Sistema de controle de temperatura do substrato. (Elaborado pelo autor, 2022).

Nota-se na figura 19 que o Arduino atua como o controlador do sistema. Nele se encontra toda a programação de aquisição de dados, filtragem matemática de sinal, sistema de controle do PID, a temperatura de referência do substrato e a técnica de acionamento PWM. O Arduino também é responsável por receber o sinal do sensor de temperatura que servirá de base para os

cálculos do PID. A saída do Arduino é responsável por acionar o relê de estado sólido. O relê por sua vez irá ligar ou desligar o cabo de calefação para que este aqueça o substrato até a temperatura de referência estabelecida na programação do Arduino. E, o sensor de temperatura mede a temperatura do substrato e joga essa informação para o Arduino, estabelecendo dessa forma uma malha de controle fechada.

Na figura 20 é possível observar a malha de controle do sistema de aquecimento da água de irrigação. Este sistema é muito semelhante ao de aquecimento do substrato, o que diferencia neste caso é o atuador e o objeto a ser controlado. No caso, o atuador é uma resistência de aquecimento, vulgarmente conhecida como mergulhão. Esta resistência irá aquecer a água até a mesma temperatura do substrato para que não haja choque térmico nas sementes, correndo o risco de inviabilizar.

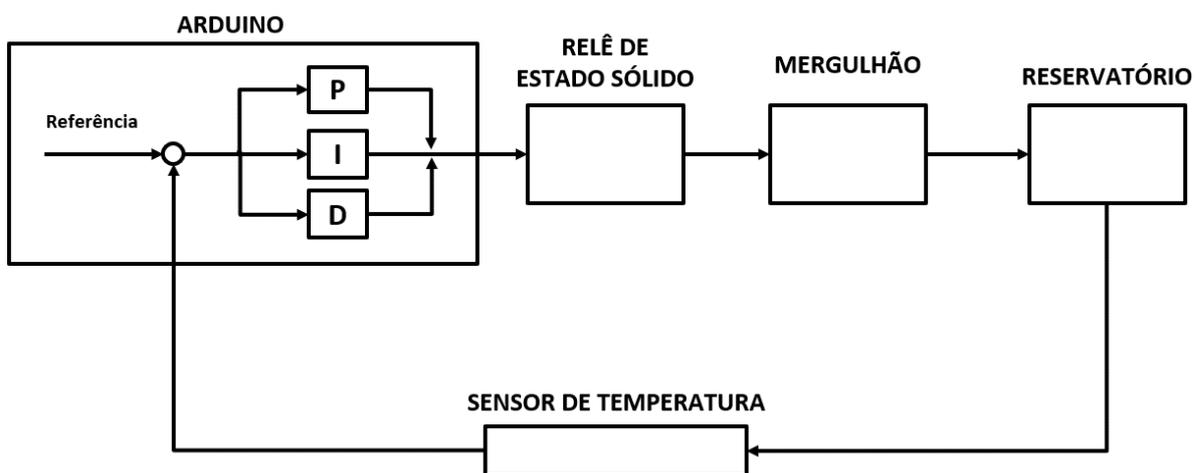


Figura 20 – Sistema de controle de temperatura da água de irrigação. (Elaborado pelo autor, 2022).

O objeto a ser controlado nesse caso é a temperatura da água. A metodologia utilizada tem algumas semelhanças com o sistema de aquecimento do substrato. Os pontos que diferem são apenas os ganhos nos blocos proporcional, integral e derivativo do PID por se tratar de um outro sistema com um comportamento diferente.

Para o sistema de irrigação existe larga faixa de operação que pode ir de 50% a 85% de umidade do substrato (EMBRAPA, 2016). Portanto, nesta aplicação não é um fator crucial a precisão do controle, basta garantir que a umidade esteja nesta faixa aceitável. Dessa forma, o sistema de controle utilizado foi um controle do tipo On-Off como pode ser visto na figura 21.

Na figura 21 pode ser observado que novamente o Arduino é o controlador do sistema. Nele se encontra toda a programação para leitura dos dados vindos do sensor de umidade. Nesta aplicação caso a umidade caia de 50% o Arduino irá enviar um sinal para o relê de estado sólido ativando-o. Por sua vez o relê irá ligar a bomba que fará a irrigação do substrato. Basicamente como o sistema de bombeamento possui inércia por se tratar de água, naturalmente a umidade do solo irá passar dos 50%, mas mesmo sob essas condições ainda estará abaixo dos 85% recomendados para maior eficácia do crescimento das mudas.

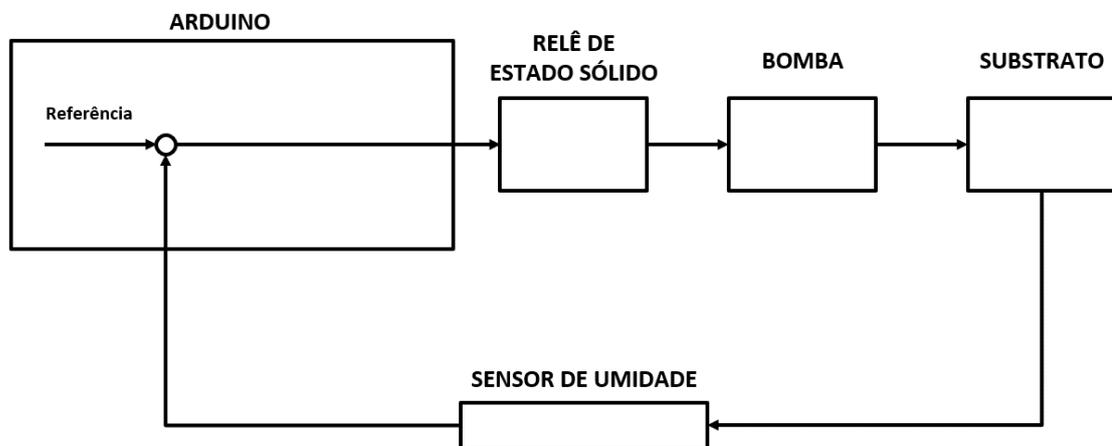


Figura 21 – Sistema de controle de umidade do substrato. (Elaborado pelo autor, 2022).

O sistema de iluminação é o sistema mais simples de todos pois este é controlado por um sistema conhecido como malha aberta, pois não existe retorno do sinal para que seja averiguado se a iluminação está de acordo com o valor de referência preestabelecido, como pode ser observado na figura 22. Neste caso, apenas inspeções visuais foram suficientes para garantir que a iluminação estava adequada ou não.



Figura 22 – Sistema de iluminação. (Elaborado pelo autor, 2022).

6.3. DETALHAMENTO DO PROJETO

O controlador de temperatura do substrato e da água de irrigação operam de maneira bastante semelhante. A diferença entre os dois basicamente se resume aos ganhos do PID de cada controlador que são inseridos na programação do Arduino. Dessa forma, o detalhamento de projeto de um controlador também vale para o outro.

Para se trabalhar com temperatura utilizando o Arduino, é necessário escolher um sensor de temperatura adequado para a aplicação que se deseja monitorar. Nesta pesquisa foi utilizado o sensor de temperatura MAX6675 que pode ser visto na figura 23.

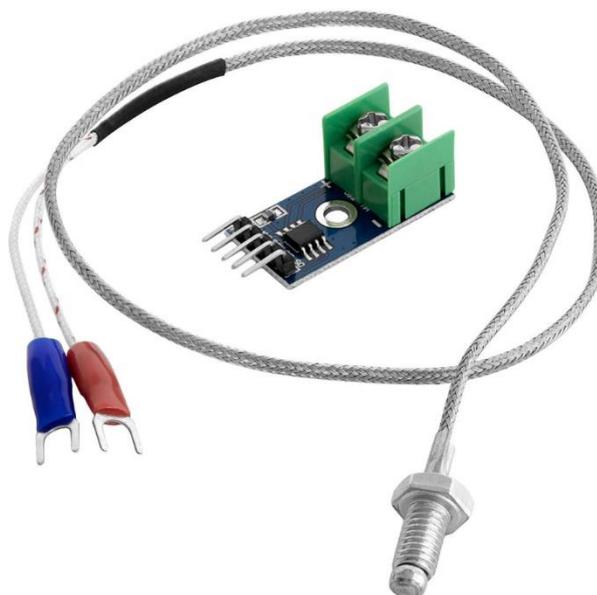


Figura 23 – Sensor de temperatura MAX6675. (Extraído de OLIVEIRA, 2022).

O MAX6675 é um sensor de temperatura do tipo K, que suporta a faixa de temperatura de 0°C a 800°C com a resolução de 0,25°C (NALAVADE, 2019). Este sensor foi escolhido para o projeto por atender a faixa de temperatura que será empregado, por apresentar uma capa protetora do termopar e ao longo do cabo o que garante robustez na sua construção, visto que

foi imerso em água e terra, e por apresentar um módulo transdutor de sinal para Arduino. Além de todas as características técnicas do sensor, outro fator relevante foi o custo. Este sensor possui o melhor custo-benefício dos sensores de temperatura do mercado.

A função do módulo do MAX6675 é receber o sinal de tensão do termopar localizado na ponta do sensor e converter esse sinal em um valor de temperatura que será lido diretamente pelo Arduino utilizando a biblioteca própria para isso. Dessa forma é poupado tempo e esforço de programação para fazer com que o valor lido pelo Arduino seja útil para a aplicação em questão. O circuito de ligação do MAX6675 e seu respectivo módulo pode ser visto na figura 24.

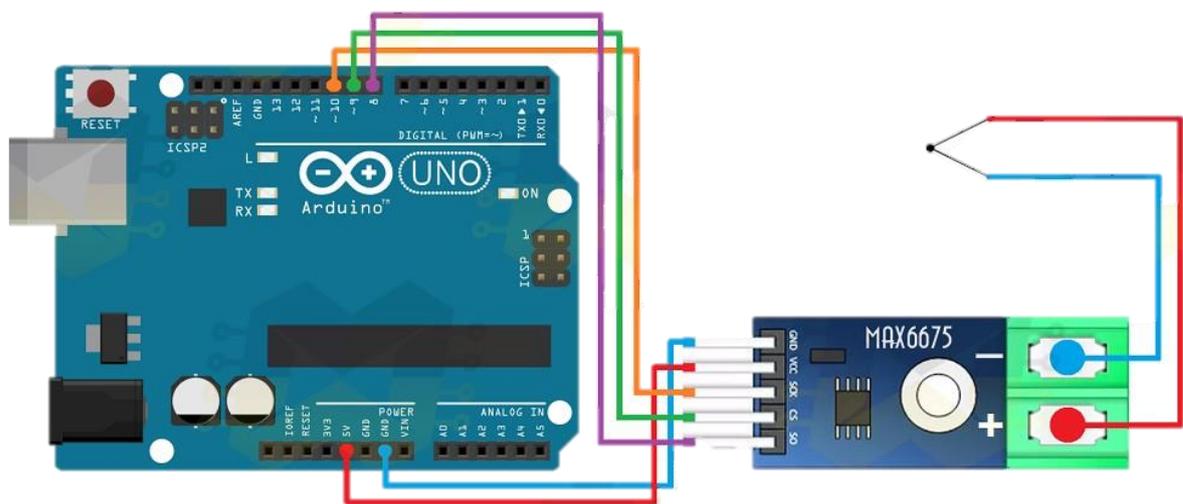


Figura 24 - Ligação do MAX6675. (SETYAWAN, 2022).

O Arduino é uma placa de prototipagem que utiliza o microcontrolador Atmega328. Neste microcontrolador é desenvolvida uma rotina de programação para controle do sistema. Na figura 25 pode ser observado um diagrama de blocos que representa o algoritmo que foi desenvolvido.

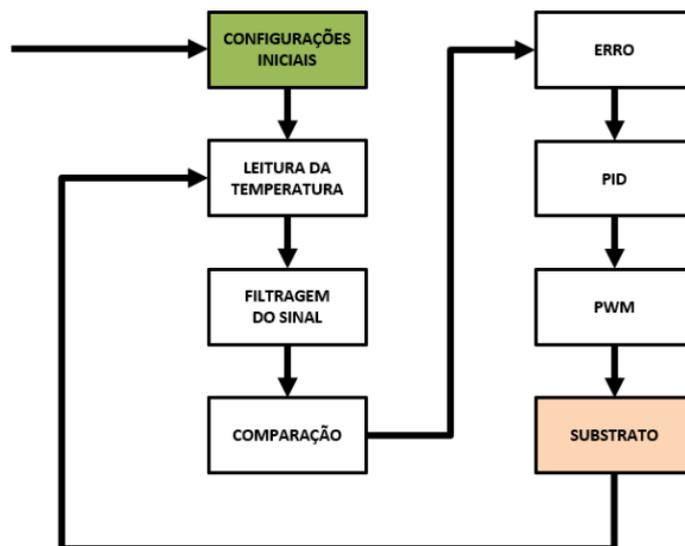


Figura 25 - Algoritmo de controle do Arduino. (Elaborado pelo autor, 2022).

Nas configurações iniciais são inseridos todos os parâmetros, bibliotecas, variáveis, constantes e rotinas de inicialização necessárias para o funcionamento do programa.

Em seguida é feita a leitura da temperatura fornecida pelo módulo do MAX6675 que está ligado ao termopar. Como a resolução do sensor é de 0,25°C a temperatura medida apresenta grandes oscilações pois ela pode saltar de 31°C para 31,25°C por exemplo, sem que haja a transição contínua entre esses dois valores. Isso resulta em sinal ruidoso como pode ser visto na figura 26.

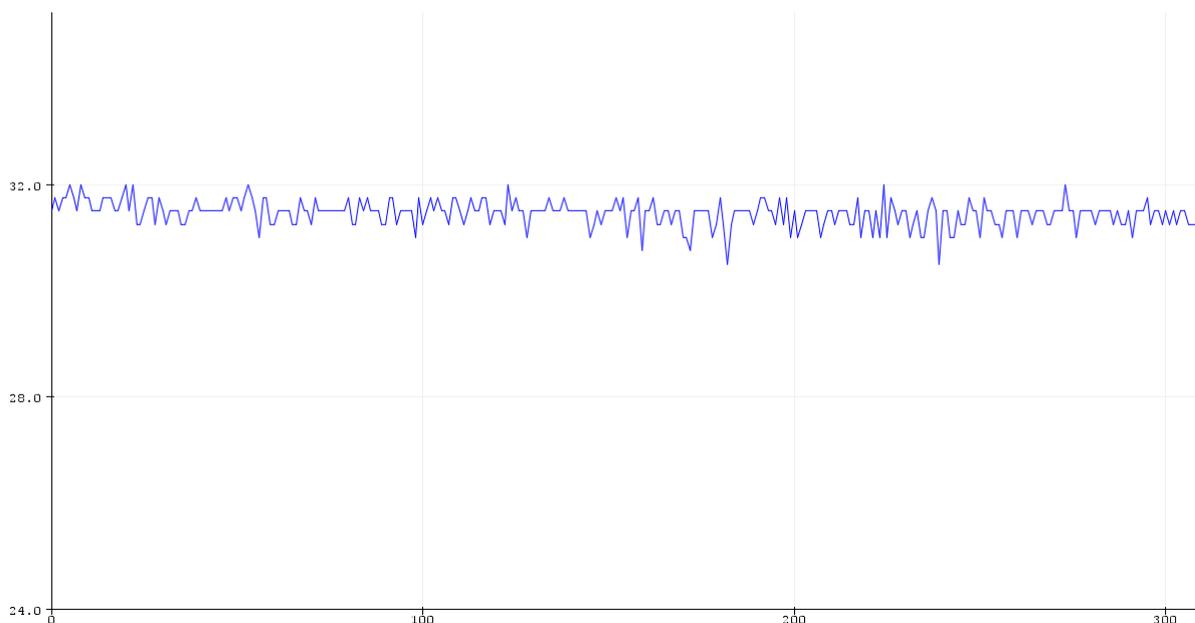


Figura 26 – Sinal de temperatura sem filtro. (Elaborado pelo autor, 2022).

A figura 26 foi gerada a partir da função *plotter serial* do Arduino. Na ocasião o sensor de temperatura estava medindo uma temperatura constante de aproximadamente 31°C, mesmo assim é possível notar o quão ruidoso é o sinal, justificando a necessidade de utilização de um filtro.

Um sistema que utiliza um sinal muito ruidoso é praticamente impossível a utilização do bloco derivativo do PID. Pois como este bloco mede justamente a taxa de variação do sinal medido, a saída deste bloco apresentaria valores muito altos e alternados fazendo com que o atuador não tivesse ação correta. A função principal do bloco derivativo do PID é evitar surtos no sistema, porém um sinal ruidoso atua como pequenos surtos alternados e aleatórios. Isso faria com que o controlador se tornasse incapaz de trabalhar de maneira correta.

Dessa forma, a próxima etapa do processo consiste na filtragem do sinal de temperatura recebido pelo sensor. O filtro é basicamente uma rotina dentro do algoritmo que realiza a média aritmética móvel dos 50 últimos valores de temperatura, atuando como janela deslizante. Dessa forma foi possível obter um sinal mais contínuo ao longo do tempo como pode ser visto na figura 27.

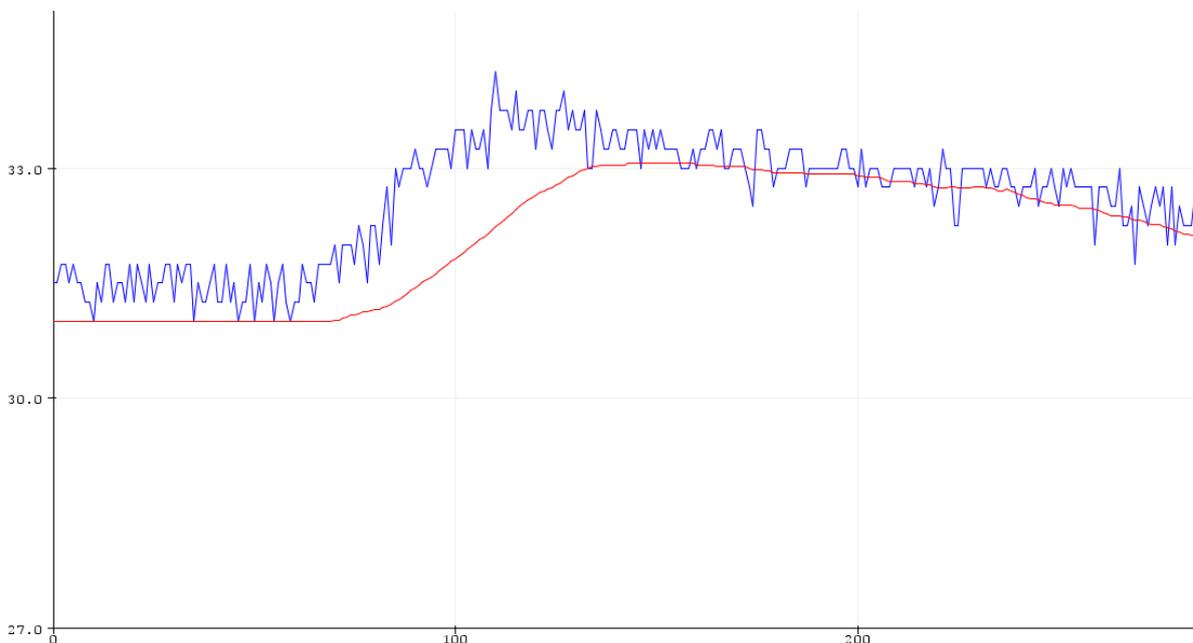


Figura 27 – Sinal de temperatura filtrado. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 27 é possível observar o sinal bruto (sem filtro) na cor azul, e o sinal filtrado na cor vermelha. Note que o gráfico pode ser dividido em três partes. A parte inicial é possível notar que o sinal filtrado está abaixo do sinal bruto. Isso ocorre no início porque ainda não foram acumulados valores suficientes para que a curva filtrada esteja dentro dos valores brutos.

A segunda parte é quando o valor de temperatura varia. É possível notar que quando a temperatura começa a aumentar, o sinal filtrado tem atraso para acompanhar essa mudança. Novamente, pelo fato que a mudança do sinal filtrado começa a ocorrer apenas depois de ter acumulado valores na média aritmética suficientes para provocar as primeiras alterações.

A terceira parte do sinal é quando se nota que o sinal filtrado se comporta como a média, este se localiza entre o sinal bruto. Demonstrando que esta simples rotina matemática acrescentada ao código é possível resolver o problema de ruído do sistema.

Como este projeto lida com intervalos de medições de dias, este período transitório que o sinal filtrado leva para se adequar ao sinal bruto é irrelevante, do ponto de vista de precisão do controle de temperatura do sistema.

Após a aquisição de dados de temperatura e filtragem, chegando na etapa de comparação entre o valor medido e o valor de referência estabelecido nas configurações iniciais da programação. Essa comparação irá gerar o valor de erro que será utilizado pelo PID para determinar o quanto irá atuar o PWM.

Na figura 28 é possível observar com mais detalhe o funcionamento do PID. Nota-se que o erro surge da comparação do valor da temperatura com a referência. Esse valor de erro por sua vez é utilizado pelos blocos proporcional, integral e derivativo, e são feitos os devidos cálculos levando em consideração as constantes de cada bloco.

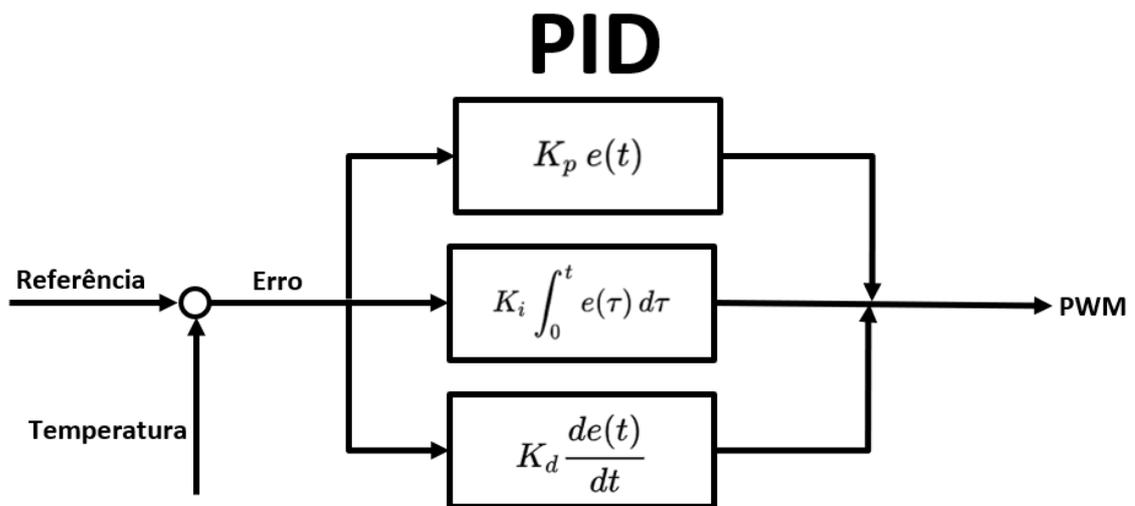


Figura 28 - Funcionamento do PID. (Adaptado de NISE, 2020).

Na saída do PID todas as contribuições dos blocos proporcional, integral e derivativo são somados para gerar o sinal de referência para o PWM. A variável que armazena o valor de saída do PID é do tipo *float* com 10 bits, ou seja, ela pode guardar valores de 0 a 1023. No programa foi desenvolvido uma rotina que converte esses valores de 0 a 1023 para 0% a 100%. Ou seja, quando o PID gerar resultado igual a 0 o PWM estará desligado. Quando for gerado o valor de 1023 o PWM estará trabalhando a 100%. Quando for gerado o valor de 512 o PWM estará trabalhando a 50% e, assim por diante.

Na figura 29 é possível observar um gráfico que mostra de forma didática como é feita essa conversão de valores. Observe que para valores acima de 1023 o PWM se mantém fixo a 100% e para valores abaixo de 0 o PWM se mantém fixo a 0%. Essa observação é bastante importante pois como foi mencionado, a variável que armazena o valor de saída do PID apenas trabalha entre 0 e 1023. Portanto, qualquer valor fora dessa faixa gerava erro durante a execução do programa. Então, foi feita a rotina condicional para limitar os valores a essa faixa de operação. Além disso, do ponto de vista físico, não teria como o PWM trabalhar com valores acima de 100% ou abaixo de 0%.

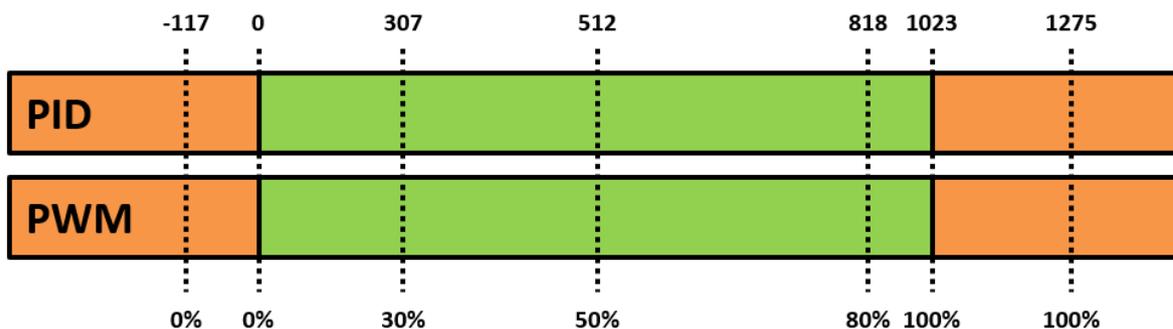


Figura 29 – Correlação de PID e PWM. (Elaborado pelo autor, 2022).

O PWM é uma técnica de acionamento bastante eficaz para esta pesquisa pois apenas controlando a largura do pulso aplicada ao relê de estado sólido, este consegue variar a tensão aplicada na carga a partir de uma tensão fixa (PUTRA, 2022). Ou seja, quando o PWM estiver operando a 100% do seu ciclo, estará sendo entregue ao cabo de calefação a potência máxima. Porém, quando estiver operando a 50% do ciclo, apenas metade da potência estará sendo aplicado a carga, reduzindo a potência entregue.

Este controle é importante, pois partir do controle da tensão aplicada no sistema de calefação é possível controlar a temperatura. Dessa maneira é possível aplicar um ajuste fino e proporcional à necessidade do substrato. Na figura 30 é possível observar um exemplo de um gráfico de aquecimento em função do tempo.

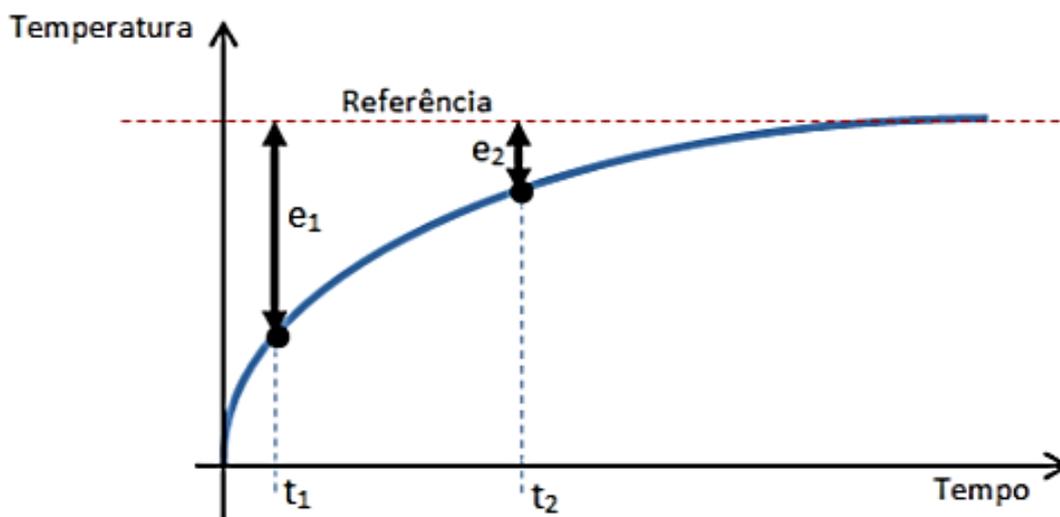


Figura 30 – Temperatura em função do tempo. (Elaborado pelo autor, 2022).

Pode-se observar que a temperatura se elevou até a temperatura de referência sem ultrapassar a mesma. No tempo t_1 a temperatura verificada está muito abaixo da referência, gerando o erro e_1 e no tempo t_2 a temperatura medida está mais próxima da referência gerando erro menor e_2 . Portanto, como e_2 é menor que e_1 , não é necessário aplicar toda 100% do aquecimento no sistema para evitar que este ultrapasse a referência. No tempo t_2 o aquecimento do sistema deve ser menor que t_1 . Este controle é obtido através do controle da largura de pulso aplicado no sistema de calefação, que vai modular a largura do pulso baseado no tamanho do erro entre a temperatura medida e a referência.

Foi utilizado o relê de estado sólido nesta pesquisa, pois os tradicionais contadores não iriam suportar a quantidade de chaveamento utilizado. O contator é um dispositivo eletromecânico que aciona a carga fechando contatos metálicos em seu interior. Para um PWM deve ser utilizar um componente capaz de realizar manobras em a frequência muito maior que um contator consegue suportar. Em razão disso, foi utilizado um relê de estado sólido que não possui partes móveis na sua composição (FERNÁNDEZ, 2022). As manobras são realizadas utilizando apenas a sua eletrônica interna. Isso possibilita a frequência de chaveamento muito alta sem comprometer a vida útil do equipamento.

Na figura 31 é possível observar um diagrama de como foram montadas as bandejas de cultivo, para que seja possível analisar os efeitos do aquecimento do substrato na produção de mudas.

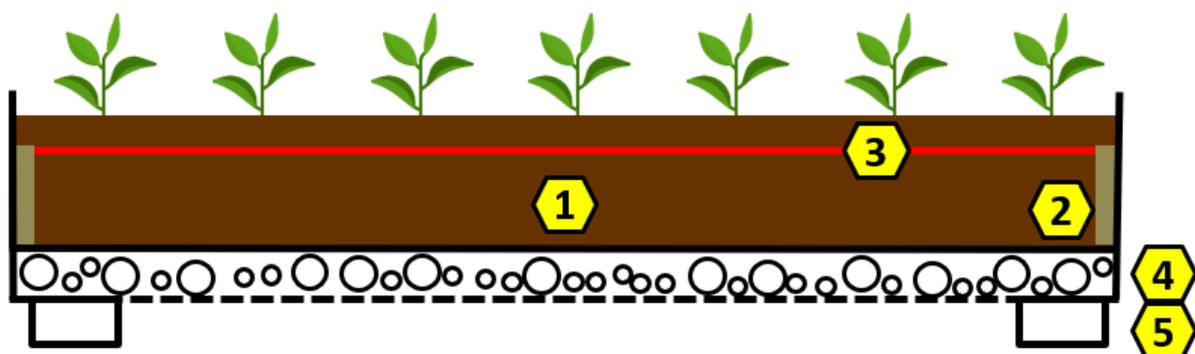


Figura 31 – Diagrama da bandeja de cultivo. (Elaborado pelo autor, 2022).

Como pode ser visto na figura 31, existem alguns pontos que serão destacados. O ponto 1 é o substrato, neste caso foi usado terra própria para o cultivo de hortaliças. O ponto 2 são

suportes laterais que foram fixados os cabos de calefação. O ponto 3 são os cabos de calefação que estão de 0,5 a 1 centímetro abaixo do substrato, essa é a profundidade recomendada para o plantio das sementes. Ou seja, os cabos de calefação ficam no mesmo nível das sementes. O ponto 4 representa a faixa de argila expandida cuja função é criar espaço de drenagem para que a água da irrigação não acumule no fundo da bandeja. Entre a argila expandida e o substrato existe a manta permeável que permite apenas a passagem de água. Esta manta é colocada para evitar que a terra seja levada junto com a água excedente que desce para o leito de argila expandida. O fundo da bandeja é perfurado para permitir a saída de possível excedente de água de irrigação. O ponto 5 são suportes da bandeja de cultivo para que esta possa ficar elevada do chão, dessa forma irá permitir a evaporação da água de irrigação que poderá sair pelo sistema de drenagem.

Na figura 32 é possível observar a bandeja de plantio antes da preparação para os testes. Nota-se que a bandeja foi feita de madeira, não foi encontrada no mercado uma bandeja com as dimensões necessárias para a montagem do experimento. Nota-se também os furos que foram feitos para a drenagem da possível sobra da água de irrigação.

Na figura 33 é possível visualizar a camada de argila expandida responsável por criar espaço de drenagem para o possível excedente de água de irrigação.

Na figura 34 nota-se a colocação da manta permeável que permite a passagem apenas da água de irrigação evitando que se perca o substrato durante o processo de drenagem.



Figura 32 – Preparação da bandeja de cultivo. (Elaborado pelo autor, 2022).



Figura 33 – Camada de argila expandida. (Elaborado pelo autor, 2022).



Figura 34 – Manta permeável. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 35 observa-se a colocação dos cabos de calefação utilizando os suportes para que fiquem esticados e com o espaçamento mais homogêneo possível.



Figura 35 – Cabos de calefação. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 36 é possível observar as três bandejas de plantio utilizadas com o substrato e prontas para o plantio. Nota-se o sistema de iluminação pronto e os respectivos controladores de temperatura individuais. Foram utilizadas três bandejas em ambiente interno para que fosse possível testar diferentes cenários de temperaturas.



Figura 36 – Três sistemas completos. (Elaborado pelo autor, 2022).

Para a irrigação do experimento, inicialmente foi considerado que seria utilizado um sistema de irrigação por gotejamento. Porém essa metodologia foi descartada por apresentar desigualdade de irrigação no processo.

Como pode ser observado na figura 37, a tubulação que transporta a água de irrigação estava sofrendo flexão pelo peso da água no interior. Além disso, por questões financeiras, não foi possível utilizar uma bomba potente o suficiente para que todo o sistema fosse pressurizado de maneira uniforme. Dessa maneira, as mudas não estavam recebendo a mesma quantidade de água, e isso, acarretava o crescimento não uniforme, tornando impossível avaliar os impactos do aquecimento do substrato no crescimento das plantas. Na figura 40 nota-se que as plantas a esquerda cresceram consideravelmente mais do que a planta a direita. Isso ocorreu pois com o peso da água a tubulação flexionou e por diferença de pressão, as plantas da esquerda receberam volume maior de água.



Figura 37 – Sistema de gotejamento. (Elaborado pelo autor, 2022).

Além desse problema, com o sistema de irrigação por gotejamento não era possível garantir que a água de irrigação estava chegando as sementes com a mesma temperatura do substrato para evitar o choque térmico. Como toda a tubulação do sistema era muito grande, perdia-se muito calor para a própria tubulação e para o ar durante o processo de gotejamento. Ou seja, o aquecimento da água de irrigação não estava sendo fator relevante no processo.

Outro fator limitante é o fato que esse sistema deveria ser utilizado pelas três bandejas, portanto, seria impossível fazer uma análise com temperaturas diferentes em cada bandeja, pois a irrigação poderia fornecer apenas uma temperatura. Dessa forma, era imperativo o desenvolvimento de nova forma de irrigação que conseguisse fornecer água individualmente para cada bandeja na temperatura certa.

Dessa forma foi desenvolvido um sistema individual de água de irrigação que atenderia todas as bandejas, como pode ser visto no diagrama da figura 38.

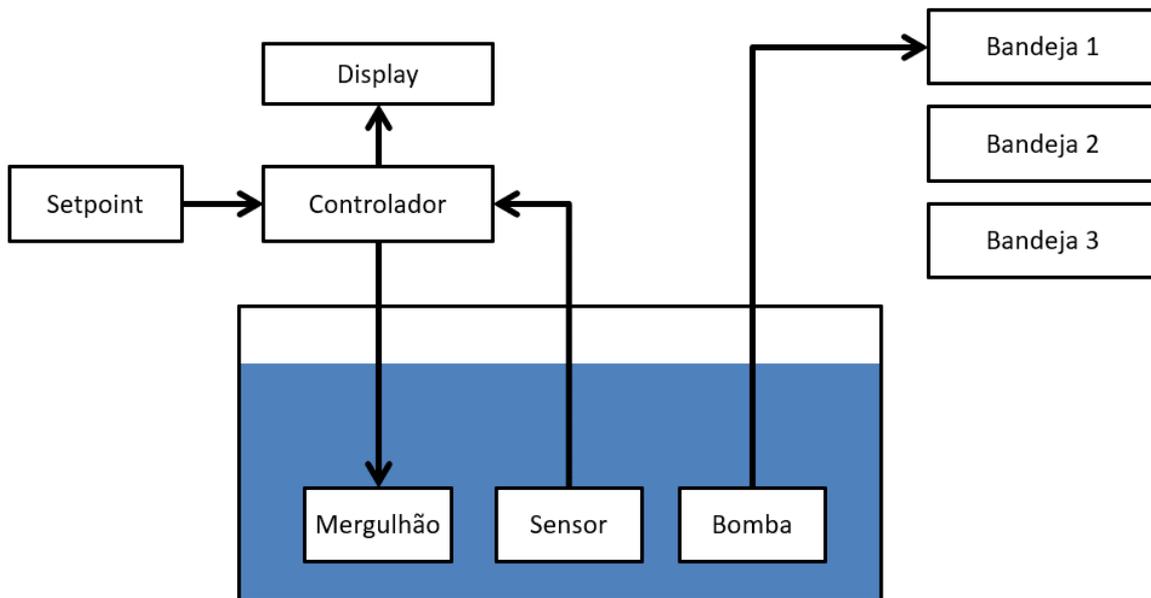


Figura 38 – Sistema de aquecimento individual. (Elaborado pelo autor, 2022).

Para o sistema de irrigação individual foi desenvolvido um sistema de aquecimento muito semelhante ao utilizado para aquecimento do substrato, porém a diferença neste caso é que o valor de referência de temperatura deveria ser estabelecido externamente ao Arduino. Portanto, foram acrescentados botões ao circuito de controle para que fosse possível alterar a referência de temperatura sem a necessidade de atualizar o programa toda vez que fosse necessário fazer a irrigação. Esse controle externo está representado por *setpoint* na figura 38.

Esse complemento consiste basicamente em dois botões, sendo um para incremento e outro para decréscimo da temperatura de referência. Ao pressionar um desses botões, automaticamente o código desenvolvido reconhece qual botão foi pressionado e faz os devidos ajustes.

Dessa forma, antes de irrigar era necessário inserir o valor de temperatura da água no controlador individualmente para cada bandeja, havia apenas um sistema por questões orçamentárias.

Para saber o momento correto de irrigação foi colocado um sensor de umidade do substrato ligado ao display que fornecia o valor da umidade constantemente. Caso a umidade caísse abaixo dos 50%, uma luz de alerta indica a necessidade de se fazer a irrigação.

Na figura 39 é possível observar os efeitos das mudanças no sistema de irrigação. Nota-se que as mudas germinaram e se desenvolveram de forma bastante uniforme, demonstrando o sucesso e a eficácia das alterações.



Figura 39 – Cultivo com sistema individual de irrigação. (Elaborado pelo autor, 2022).

6.4. METODOLOGIA PARA VALIDAÇÃO DO DISPOSITIVO

Foram feitos quatro ciclos de experimentos ao longo da pesquisa para se avaliar os efeitos do aquecimento do substrato. Ao todo foram construídas quatro bandejas de plantio para que fossem testados diversos cenários durante os experimentos. Das quatro bandejas, três foram equipadas com os cabos de calefação e construídas de acordo com a figura 31 e uma bandeja foi construída sem nenhum controle e colocada ao ar livre para que fosse cultivada da maneira tradicional, para que fosse possível ter referência e posteriormente realizar as devidas comparações.

No primeiro ciclo foram utilizadas sementes de alface crespa como espécie de teste. A alface foi escolhida por apresentar um ciclo de plantio relativamente reduzido em relação a outros cultivares. As mudas de alface crespa, geralmente ficam prontas após 30 dias de plantio. As temperaturas das bandejas em ambiente interno foram 30°C, 32,5°C e 35°C.

No segundo ciclo foram utilizadas 10 espécies de cultivares para se avaliar o comportamento com o substrato aquecido. As espécies utilizadas foram: Alface crespa, alface Simpson, couve, rúcula, erva-cidreira, repolho, mostarda, chicória, pimenta malagueta e tomate

gaúcho. Foram escolhidas essas espécies porque todas apresentam o mesmo tempo de produção. Foram realizados dez plantios de cada espécie. As temperaturas das bandejas com substrato aquecido foram: 30°, 35°C e 40°C. Nota-se que foram utilizadas temperaturas mais elevadas para que fosse possível avaliar o quanto o aquecimento gerava impacto no crescimento dos cultivares.

No terceiro ciclo foram utilizadas apenas as espécies de alface crespa e tomate gaúcho. Foi escolhida essas duas espécies, pois observou-se que cada espécie do segundo ciclo reagiu de forma diferente ao aquecimento do substrato, tonando a análise extremamente complexa e conseqüentemente necessitando de mais experimentos para se chegar a conclusão assertiva. Foram realizados 50 plantios de cada espécie. Neste ciclo apenas duas bandejas ficaram em ambiente com iluminação artificial e suas temperaturas fora respectivamente 27°C e 33°C. A terceira bandeja foi colocada a 30°C em ambiente externo com iluminação natural junto com a bandeja sem aquecimento para que se fosse testado o comportamento dos cultivares em ambiente externo com e sem aquecimento do substrato.

No quarto ciclo foi utilizado apenas a alface crespa. Foram feitos 100 plantios. As duas bandejas com iluminação artificial foram aquecidas com 26°C e 28°C respectivamente, e a bandeja aquecida em ambiente externo foi utilizada a temperatura de 26°C para que fosse possível comparar com a bandeja com iluminação artificial.

Na tabela 2 é possível observar um resumo de como foram arranjadas as temperaturas de cada bandeja de plantio e o ambiente de cada ciclo aqui descrito.

| TEMPERATURAS DAS BANDEJAS | | | | | |
|----------------------------------|-------------------------|--------|------|-------------------------|----------|
| CICLO | AMBIENTE INTERNO | | | AMBIENTE EXTERNO | |
| 1° | 30°C | 32,5°C | 35°C | | Ambiente |
| 2° | 30°C | 35°C | 40°C | | Ambiente |
| 3° | 27°C | 33°C | | 30°C | Ambiente |
| 4° | 26°C | 28°C | | 26°C | Ambiente |

Tabela 3 – Configuração dos ciclos de plantio. (Elaborado pelo autor, 2022).

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. ESTABILIDADE DO SISTEMA

A estabilidade do sistema é um fator de extrema importância para o projeto, pois oscilações de temperatura podem gerar estresse nas sementes e nas plantas e isso pode impactar negativamente no seu desenvolvimento. Portanto, vários testes com o aquecimento do substrato foram realizados antes do plantio.

Após resolvido todos os problemas de ordem técnica e com o programa de controle, foi iniciado os testes de comportamento e estabilidade da temperatura ao longo do tempo.

Os testes iniciais geraram resultados completamente insatisfatórios. Em alguns casos a temperatura do sistema subia mais do que 50% do valor de referência. Ou seja, com valor de referência de 35°C o sistema chegava a atingir um pico de 53°C, resultando a diferença de 18°C. Esses resultados são completamente inviáveis para o projeto visto que a temperatura de mais de 50°C iriam inutilizar a maioria das sementes semeadas.

Após inúmeros testes e ajustes nos coeficientes de ganho do PID o sistema de aquecimento se demonstrou estável ao longo do tempo, conforme pode ser visto na figura 40.

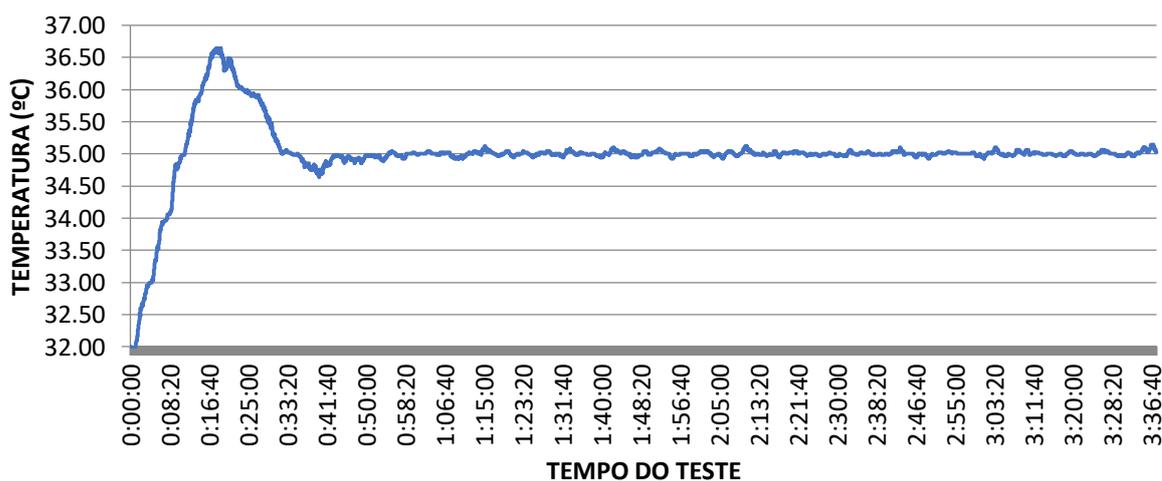


Figura 40 – Temperatura do substrato. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 40 é possível observar dois momentos principais. O momento de regime transitório e o momento de regime permanente. O período de regime transitório compreende aproximadamente os 50 minutos iniciais do teste. Este período é caracterizado por grandes variações de temperatura até que o sistema se estabilize. Já o regime permanente compreende o período em que as variações de temperatura já não são mais significativas, ou seja, é o período em que o sistema se estabiliza próximo ao valor de referência.

Durante o regime transitório a temperatura atinge o pico de 36,64°C, sendo 35°C a temperatura de referência, ou seja, a diferença de apenas 1,64°C que representa a oscilação de 4,69% da temperatura de referência.

Durante o regime permanente, especificamente depois de 50 minutos do início do teste o sistema se estabilizou completamente, sendo que neste período o pico de temperatura foi de 35,14°C, o mínimo de temperatura foi de 34,92°C e a média de temperatura foi exatamente de 35,00°C.

Também foram realizados testes de performance durante o período de um dia completo, para que fosse possível observar o comportamento da temperatura perante as oscilações da temperatura ambiente, como pode ser visto na figura 41.

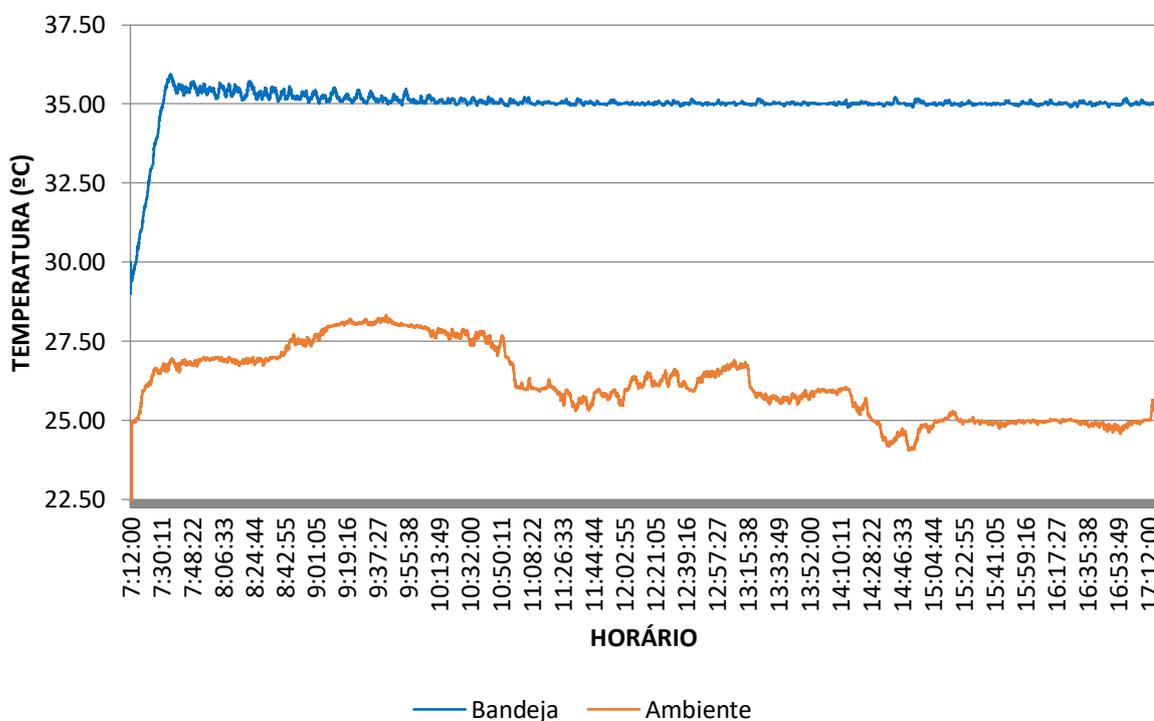


Figura 41 –Estabilidade do sistema durante o dia. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 41 é possível notar o gráfico que representa o comportamento da temperatura da bandeja de cultivo e da temperatura ambiente ao longo do período diurno. Foi monitorado o período de aproximadamente 10 horas, iniciando aproximadamente às 07 e terminando aproximadamente às 17. A curva superior em azul representa os valores de temperatura da bandeja e a curva inferior em alaranjado representa a temperatura ambiente. Nota-se que as variações de temperatura na bandeja de cultivo foram pequenas em relação as variações da temperatura ambiente. A máxima temperatura registrada na bandeja foi de 35,94°C durante o regime transitório, sendo 35°C a temperatura de referência. A temperatura média registrada foi exatamente de 35,00°C durante o regime permanente. A temperatura ambiente máxima foi de 28,34°C, enquanto a temperatura mínima foi de 24,06°C. Apresentando dessa forma uma variação total de 4,28°C.

Também foi realizado um teste de performance durante a noite, como pode ser visto na figura 42.

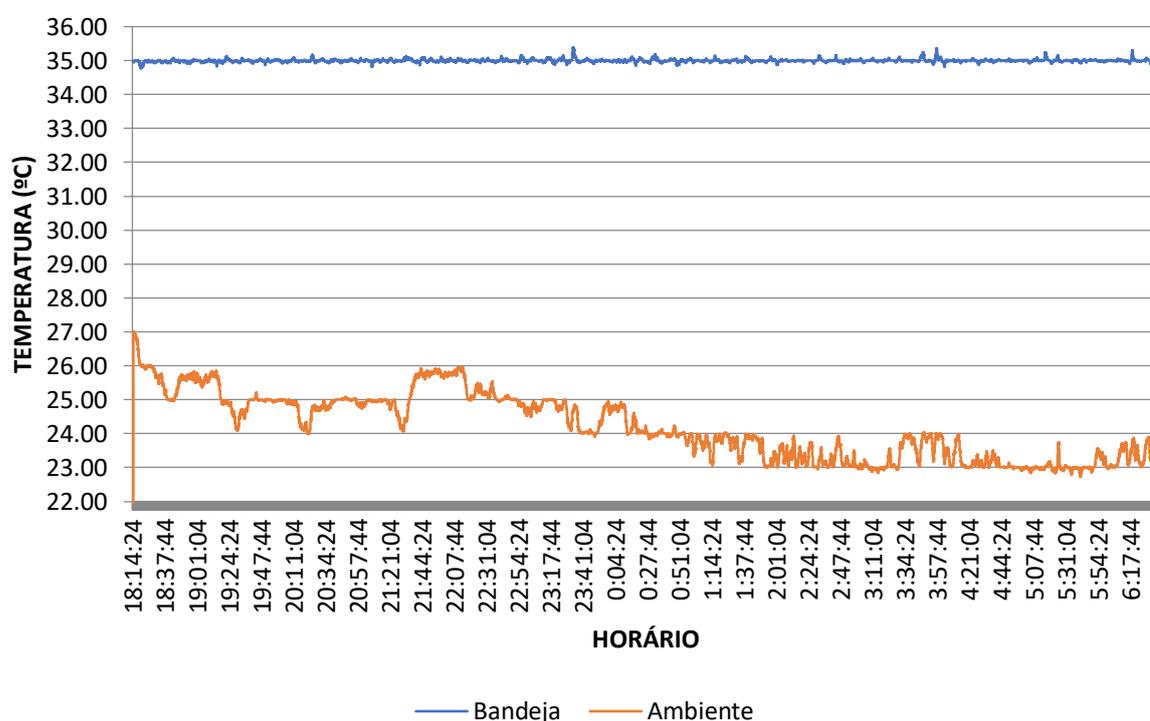


Figura 42 – Estabilidade do sistema durante a noite. (Elaborado pelo autor, 2022).

No teste noturno, a bandeja de plantio foi monitorada por aproximadamente 12 horas. Na figura 42 é possível observar que a temperatura da bandeja não apresenta o regime transitório,

pois este teste foi iniciado logo após o teste durante o dia. Neste teste é possível notar que a temperatura da bandeja se manteve estável durante todo o processo, enquanto a temperatura ambiente sofria grandes oscilações. Ao final do acompanhamento foi verificado que a temperatura máxima da bandeja foi de 35,38°C, e a temperatura mínima foi de 34,78°C, sendo que a referência estabelecida havia sido de 35°C. E, a temperatura ambiente chegou ao máximo de 27,02°C e mínimo de 22,72°C, ou seja, a variação de 4,30°C.

A diferença entre o máximo durante o dia e o mínimo durante a noite, é de 5,62°C, enquanto o sistema se manteve estável durante todo o teste. Lembrando que este foram os valores registrados durante os testes, porém a temperatura ambiente pode variar muito mais do que foi verificado. No dia 19/05/2022, por exemplo, foi registrada a temperatura de 5°C, sendo essa a menor temperatura do ano em Goiânia.

7.2. INVESTIMENTO DO PROJETO

O orçamento de todo o projeto pode ser observado na tabela 3. Foram considerados todos os materiais e equipamentos utilizados na prototipagem, testes e montagem do produto. Não foram considerados os valores de máquinas e ferramentas utilizados na montagem do experimento, tendo em vista que já havia sido adquiridos. Também não foi levada em consideração o valor da mão de obra empregada na montagem de todo equipamento, pois este serviço foi realizado pelo próprio pesquisador.

| ITEM | DESCRIÇÃO | QTD | VALOR | TOTAL |
|------|---------------------------------------|-----|--------------|--------------|
| 1 | Arduino | 6 | R\$ 60,00 | R\$ 360,00 |
| 2 | Cabo de calefação 200m | 1 | R\$ 1.300,00 | R\$ 1.300,00 |
| 3 | Relê de estado sólido 40A | 4 | R\$ 40,00 | R\$ 160,00 |
| 4 | Sensor capacitivo de umidade de solo. | 4 | R\$ 17,00 | R\$ 68,00 |
| 5 | Sensor de temperatura MAX 6675 | 4 | R\$ 50,00 | R\$ 200,00 |
| 6 | Bomba de água | 1 | R\$ 40,00 | R\$ 40,00 |
| 7 | Lâmpada fluorescente 40W 240cm | 8 | R\$ 60,00 | R\$ 480,00 |
| 8 | Rabicho lâmpada fluorescente | 16 | R\$ 1,50 | R\$ 24,00 |
| 9 | Mão francesa | 4 | R\$ 25,00 | R\$ 100,00 |
| 10 | Cabo paralelo | 20 | R\$ 5,00 | R\$ 100,00 |
| 11 | Plug macho | 5 | R\$ 4,20 | R\$ 21,00 |
| 12 | Plug fêmea | 5 | R\$ 5,00 | R\$ 25,00 |

| | | | | |
|----|---------------------------------------|----|------------|---------------------|
| 13 | Plug P4 Arduino | 6 | R\$ 2,65 | R\$ 15,90 |
| 14 | Kit jumpers Arduino | 10 | R\$ 12,64 | R\$ 126,40 |
| 15 | Mini protoboard | 6 | R\$ 5,22 | R\$ 31,32 |
| 16 | Tábua de pinus 30cm x 3m | 6 | R\$ 50,00 | R\$ 300,00 |
| 17 | Caixa de parafusos para madeira | 1 | R\$ 30,35 | R\$ 30,35 |
| 18 | Sistema de irrigação por gotejamento | 1 | R\$ 109,00 | R\$ 109,00 |
| 19 | Disjuntor monofásico 10A. | 1 | R\$ 8,25 | R\$ 8,25 |
| 20 | Mergulhão para aquecimento | 1 | R\$ 44,90 | R\$ 44,90 |
| 21 | Tambor reservatório de água 50 litros | 1 | R\$ 66,83 | R\$ 66,83 |
| 22 | Válvula Boia | 1 | R\$ 97,99 | R\$ 97,99 |
| 23 | Terra para hortaliça | 3 | R\$ 16,90 | R\$ 50,70 |
| 24 | Fertilizante | 1 | R\$ 18,49 | R\$ 18,49 |
| 25 | Argila expandida | 3 | R\$ 36,90 | R\$ 110,70 |
| 26 | Manta permeável | 1 | R\$ 168,00 | R\$ 168,00 |
| | | | | R\$ 4.056,83 |

Tabela 4 – Orçamento do projeto. (Elaborado pelo autor, 2022)

7.3. RESULTADOS DO 1º CICLO

O primeiro ciclo consistiu em utilizar três bandejas de plantio em ambiente interno e uma bandeja em ambiente externo conforme pode ser visto na tabela 2. Os valores de referência de temperatura de substrato para as bandejas com aquecimento foram 30°C, 32,5°C e 35°C.

Inicialmente foi planejado utilizar a técnica de irrigação por gotejamento neste primeiro ciclo e foi considerado o cultivo da alface crespa até a sua etapa final, ou seja, até estar pronto para a colheita. Porém, devido a problemas com metodologia adotada no sistema de irrigação, este ciclo foi interrompido, pois os cultivares apresentaram tamanhos muito diferentes na mesma bandeja.

Mesmo diante dessas dificuldades de ordem técnica, foram observados resultados relevantes durante o processo.

O plantio das sementes de alface crespa foram realizados no dia 13/12/21.

No dia 15/12/21 foi observado o aparecimento dos cotilédones de algumas sementes na bandeja de 30°C, conforme pode ser visto na figura 43. As demais bandejas, inclusive na bandeja externa, não foi observado nenhum sinal de emergência neste dia.



Figura 43 – Bandeja de 30°C dia 15/12/21. (Elaborado pelo autor, 2022).

No dia 16/12/21 foi observado a primeira emergência na bandeja sem aquecimento como pode ser visto na figura 44(a). No mesmo dia, foi registrado o desenvolvimento na bandeja de 30°C como pode ser visto na figura 44(b).



Figura 44 – (a) Bandeja sem aquecimento dia 16/12/21. (b) Bandeja de 30°C dia 16/12/21 (Elaborado pelo autor, 2022).

No dia 18/12/21 foi registrado o desenvolvimento dos cultivares nas bandejas com aquecimento e na bandeja sem aquecimento como pode ser visto na figura 45.



Figura 45 – (a) Bandeja sem aquecimento dia 18/12/21. (b) Bandeja de 30°C dia 18/12/21 (Elaborado pelo autor, 2022).

No dia 07/01/22 foi interrompido este primeiro ciclo, totalizando 25 dias de plantio. Na figura 46 é possível observar o gráfico que demonstra a evolução de cada cultivo e sua respectiva temperatura. O gráfico se refere ao tamanho máximo de cada bandeja semeada. Nota-se que o melhor desempenho foi da bandeja com substrato aquecido a 30°C, chegando a crescer mais de três vezes mais rápido que o plantio em temperatura ambiente.

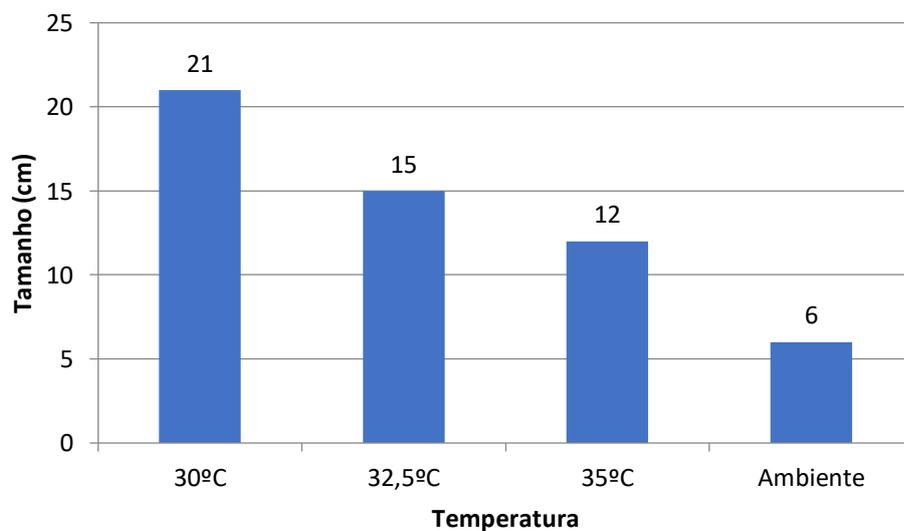


Figura 46 – Tamanho máximo de cada cultivo. (Elaborado pelo autor, 2022).

Importante observar que todas as bandejas com aquecimento tiveram crescimento mais acelerado do que a bandeja em temperatura ambiente.

Os melhores desempenhos podem ser observados nas figuras 50(a), 50(b), 50(c) e 50(d), para as temperaturas de 30°C, 32,5°C, 35°C e temperatura ambiente respectivamente.

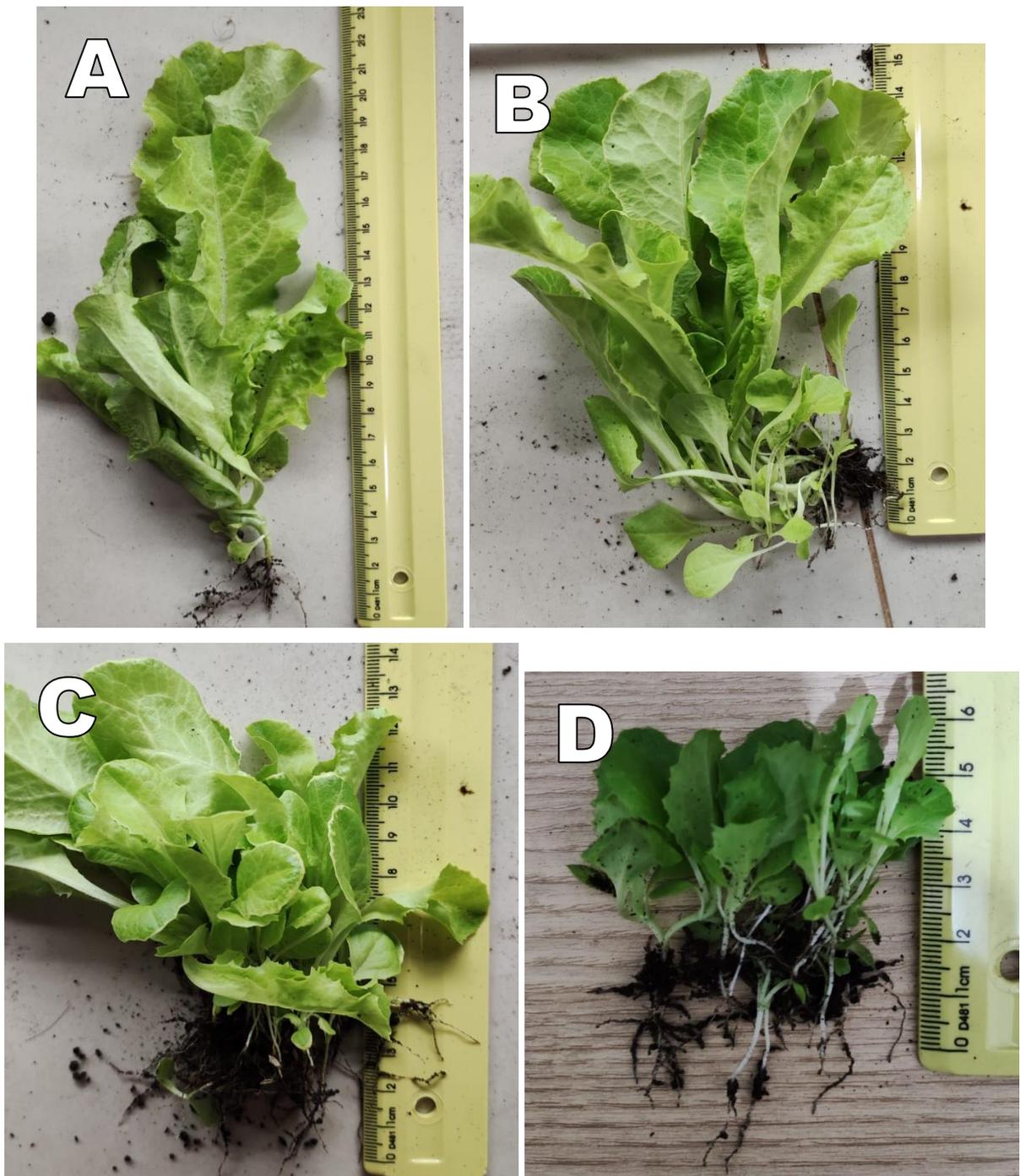


Figura 47 – (a) Bandeja a 30°C. (b) Bandeja a 32,5°C. (c) Bandeja a 35°C. (d) Bandeja a temperatura ambiente. (Elaborado pelo autor, 2022).

Segundo Embrapa (2016), o tempo médio de produção de alfaces é cerca de 60 dias, dessa forma, é possível notar o grande impacto que o aquecimento do substrato nessa atividade, porque, aproximadamente na metade do tempo, o cultivar já estava quase pronto para o consumo.

7.4. RESULTADOS DO 2º CICLO

No segundo ciclo foram utilizadas três bandejas de plantio em ambiente interno e uma bandeja em ambiente externo, conforme a tabela 2. Os valores de aquecimento das bandejas foram 30°C, 35°C e 40°C respectivamente. Foram considerados esses valores para que pudesse existir diferença maior entre as temperaturas de cada bandeja e para que ficasse mais evidente os efeitos do aquecimento do substrato.

Neste teste foi adotada a estratégia de focar todo o sistema na produção de mudas, ao invés de realizar a produção até a etapa final de colheita. Dessa forma, seria possível a realização de mais testes no mesmo período.

Neste ciclo os problemas com a irrigação foram resolvidos, foi abandonado a técnica de irrigação por gotejamento e foi utilizada irrigação por aspersão com água aquecida a mesma temperatura da bandeja para que não houvesse choque térmico na semente.

Foram utilizadas dez espécies de sementes neste teste como pode ser visto na tabela 4, com o objetivo de analisar o comportamento de cada espécie sob diferentes temperaturas.

| ITEM | ESPÉCIE | EMERGÊNCIA | TRANSPLANTIO | COLHEITA |
|-------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|
| 1 | Alface Crespa | 3 - 5 | 25 - 30 | 70 - 75 |
| 2 | Alface Simpson | 4 - 14 | 25 - 30 | 60 - 65 |
| 3 | Couve | 4 - 14 | 25 - 30 | 60 - 150 |
| 4 | Rúcula | 4 - 14 | 25 - 30 | 40 - 45 |
| 5 | Erva-Cidreira | 4 - 21 | 25 - 30 | - |
| 6 | Repolho | 3 - 5 | 25 - 30 | 80 - 90 |
| 7 | Mostarda | 4 - 14 | 25 - 30 | 40 - 45 |
| 8 | Chicória | 5 - 7 | 25 - 30 | 85 - 90 |
| 9 | Pimenta-malagueta | 7 - 14 | 25 - 30 | 100 - 120 |
| 10 | Tomate Gaúcho | 4 - 14 | 25 - 30 | 100 - 120 |

Tabela 5 - Espécies utilizadas no 2º ciclo. (Dados fornecidos pela Topseed, 2022)

Foram escolhidas essas dez espécies. pois como pode ser observado na tabela 4, todas têm o mesmo tempo de transplântio, tendo em vista que o foco do trabalho é a produção de mudas. Portanto, como todas as mudas das espécies levam o mesmo tempo para desenvolver, será possível fazer uma análise se o aquecimento do substrato influencia no desenvolvimento.

No dia 08/01/22 foram realizados dez plantios de cada espécie formando uma malha de dez por dez na bandeja de plantio, sendo cada coluna uma espécie diferente, e cada linha um plantio diferente da mesma espécie.

No dia 10/01/22, em menos de 48 horas, foi observado a primeira emergência de mostarda na bandeja de 35°C como pode ser visto na figura 48.



Figura 48 – Mostarda em bandeja de 35°C. (Elaborado pelo autor, 2022).

Este segundo ciclo foi encerrado no dia 03/02/2022, totalizando 27 dias de plantio. Ao final de todo o processo alguns resultados bastante relevantes puderam ser observados.

O primeiro resultado de grande impacto foi a bandeja a 40°C, nove sementes não germinaram. A única espécie a germinar foi a semente de mostarda, que emergiu do substrato no dia 22/01/2022, porém alguns dias depois secou e morreu.

Dessa forma, é possível concluir que o calor inviabilizou as sementes ou impediu que elas quebrassem o estado de dormência. Além disso, a temperatura de 40°C não propiciou ambiente

favorável ao desenvolvimento da semente de mostarda que germinou e chegou a emergir. Portanto, pode-se concluir que este nível de temperatura é completamente inviável para a produção de mudas das espécies utilizadas neste teste. Dessa forma, os dados coletados da bandeja a 40°C serão desconsiderados das análises a seguir.

O resultado da alface crespa pode ser visto na imagem 49. Nota-se que a 30°C e a 35°C não foram produzidas mudas. Esse resultado pode causar a interpretação que as sementes não germinaram, mas como pode ser visto no Anexo E, a 30°C as sementes germinaram, emergiram e atingiram a altura máxima de 1,1cm e a 35°C a alface chegou a atingir 0,5cm, porém ao longo do teste essas espécies secaram e morreram.

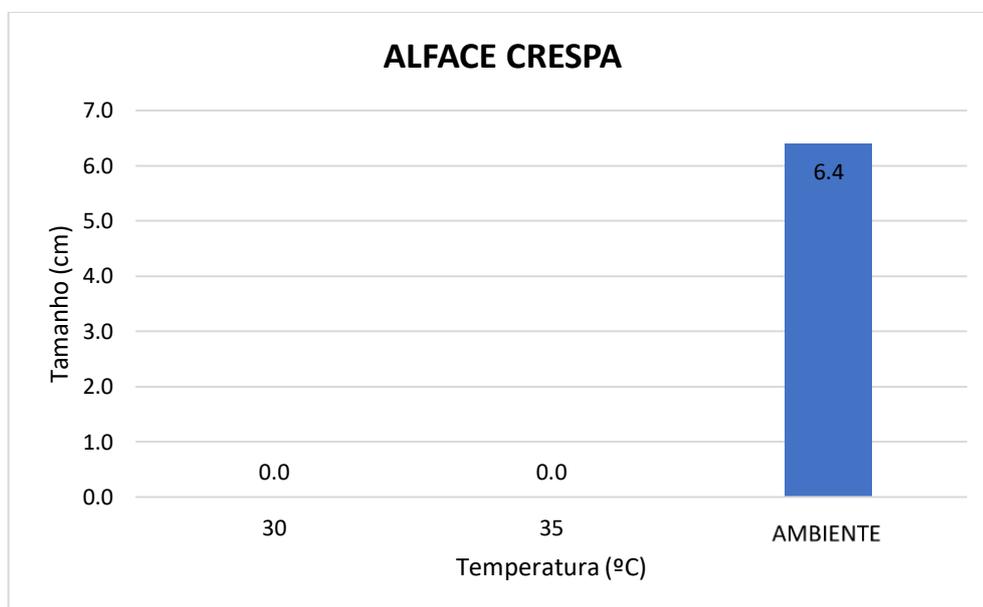


Figura 49 – Desempenho da alface crespa. (Elaborado pelo autor, 2022).

O resultado da alface Simpson pode ser visto na imagem 50. Nota-se que a bandeja de 30°C teve desempenho superior a bandeja em ambiente natural. Esse resultado representa crescimento 13% mais rápido do que utilizando as técnicas de plantio tradicionais.

Porém, a 35°C observa-se que não houve resultado nenhum. Neste caso não houve germinação da semente porque a temperatura da bandeja não permitiu a quebra da dormência ou por ter inviabilizado, como ocorreu a 40°C.

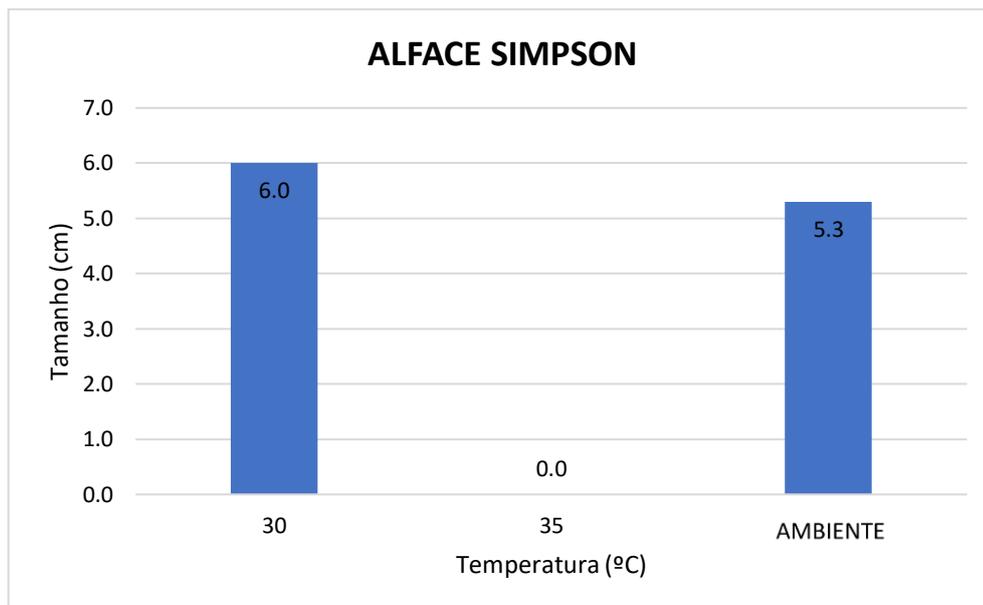


Figura 50 – Desempenho da alface Simpson. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 51 é possível observar o desempenho final do plantio de chicória. Nota-se um comportamento semelhante à alface crespa, porém neste caso as sementes semeadas na bandeja de 30°C não chegaram a germinar. Já na bandeja a 35°C, as sementes germinaram, atingiram o máximo de 1,4cm e em seguida secaram e morreram. Porém, ao analisar os dados no Anexo E nota-se que a chicória nesta bandeja apresentava a taxa de crescimento superior a bandeja em temperatura ambiente.

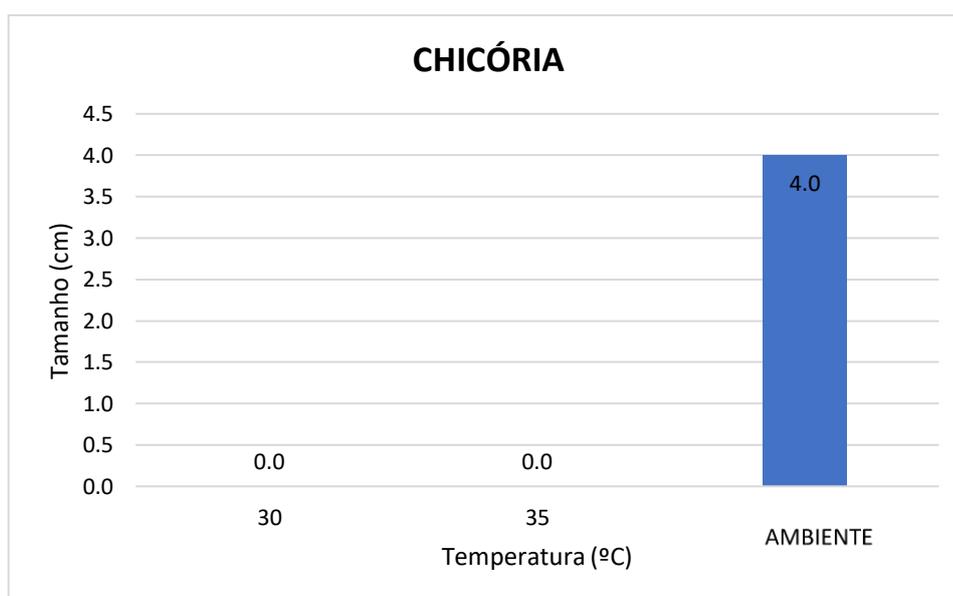


Figura 51 – Desempenho da chicória. (Elaborado pelo autor, 2022).

O resultado da couve pode ser visto na figura 52. Nota-se que ao final do teste as bandejas de 30°C e de 35°C tiveram desempenho inferior ao da bandeja com temperatura ambiente. É possível concluir que a couve não reage bem ao aquecimento do substrato.

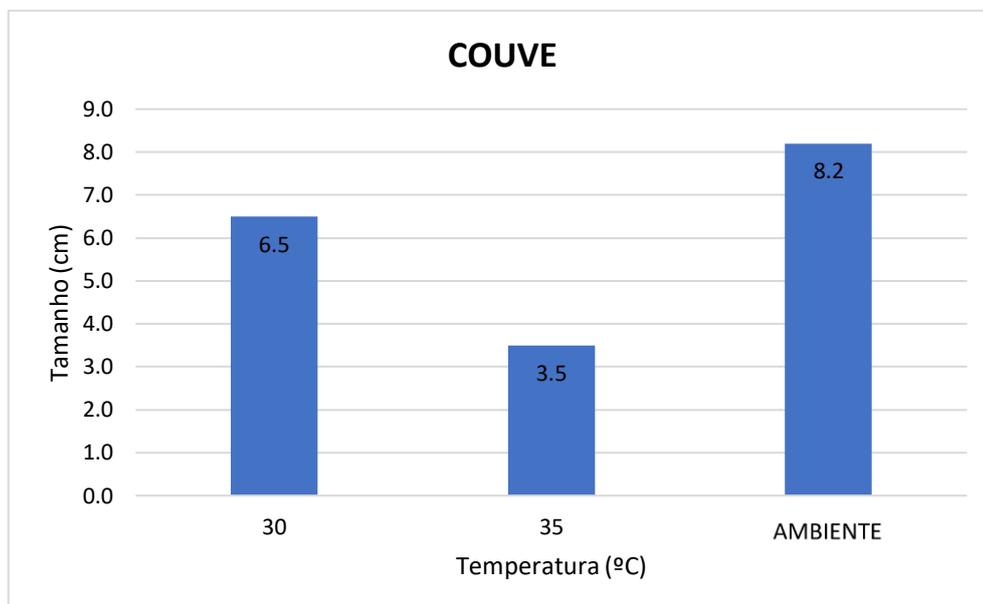


Figura 52 – Desempenho da couve. (Elaborado pelo autor, 2022).

A erva-cidreira foi o cultivo que menos teve sucesso no processo, pois na bandeja de 30°C, de 40°C e na bandeja com temperatura ambiente não houve germinação da semente. Na bandeja de 35°C houve emergência da semente, porém na sequência esta secou. É possível afirmar que provavelmente existia algum problema na qualidade da semente entregue pelo fornecedor.

Na figura 53 é possível observar o resultado da produção de mostarda. Nota-se que a 30°C se desenvolveu mais do que nas temperaturas de 35°C e na temperatura ambiente. Houve ganho de velocidade de crescimento de aproximadamente 7% ao longo do teste.

A bandeja com aquecimento de 35°C apresentou o mesmo desempenho da bandeja com temperatura ambiente. Portanto, o aquecimento a essa temperatura não gera nenhuma melhoria na produção de mostarda.

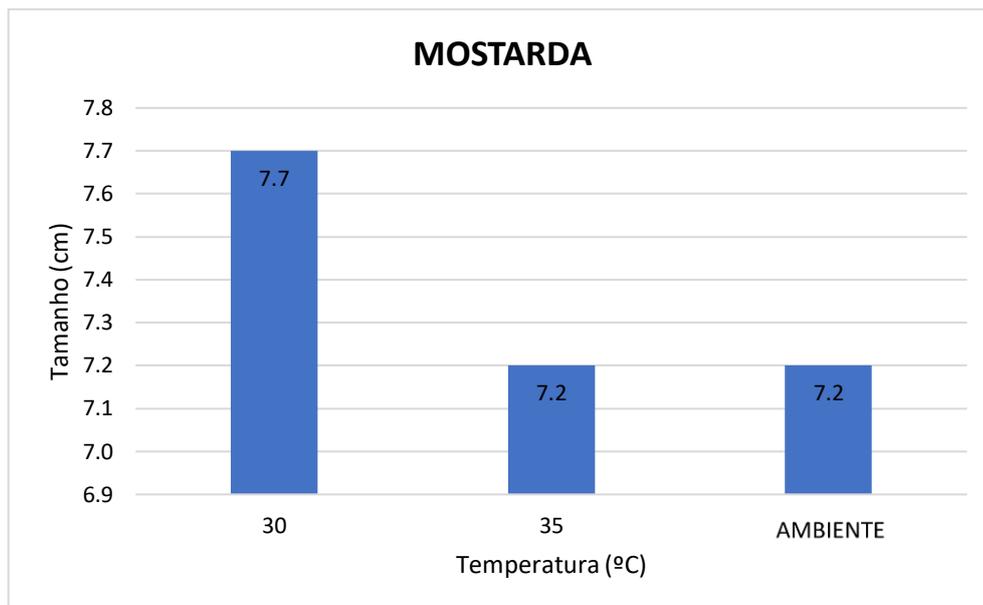


Figura 53 – Desempenho da mostarda. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 54 é possível observar o desenvolvimento da pimenta-malagueta. Nota-se que a bandeja de 30°C gerou resultado bastante expressivo em comparação com as demais temperaturas e principalmente em comparação com a temperatura ambiente. Esta bandeja apresentou melhoria de aproximadamente 170% em relação a temperatura ambiente. E, a bandeja de 35°C apresentou melhoria de aproximadamente 67%.

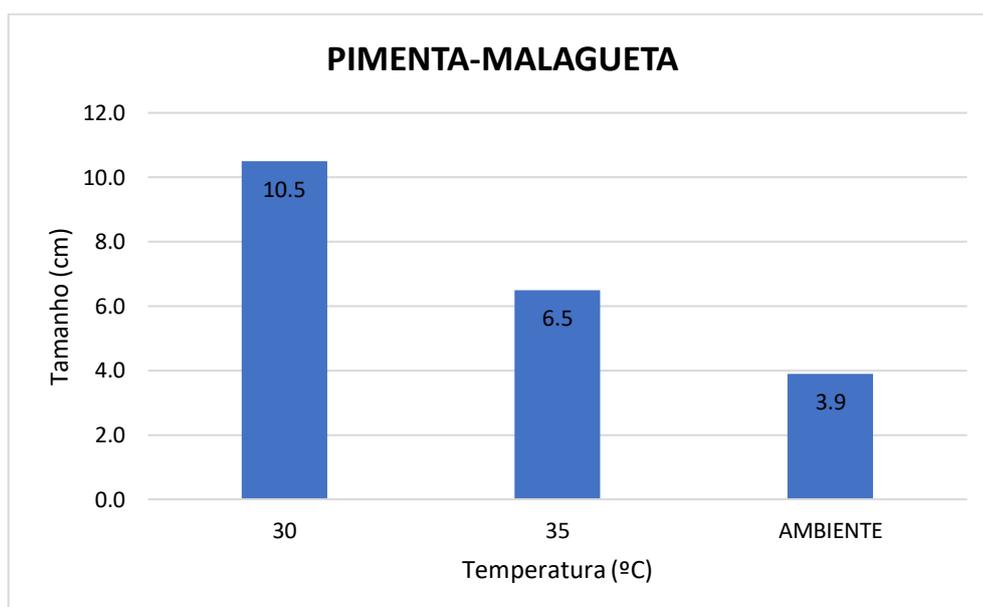


Figura 54 – Desempenho da pimenta-malagueta. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 55 é possível observar o resultado do teste com repolho. Nota-se que a bandeja com temperatura de 30°C apresentou o resultado aproximadamente 22% melhor do que a bandeja em temperatura ambiente. Porém a bandeja de 35° não demonstrou resultado melhor do que a bandeja em temperatura ambiente.

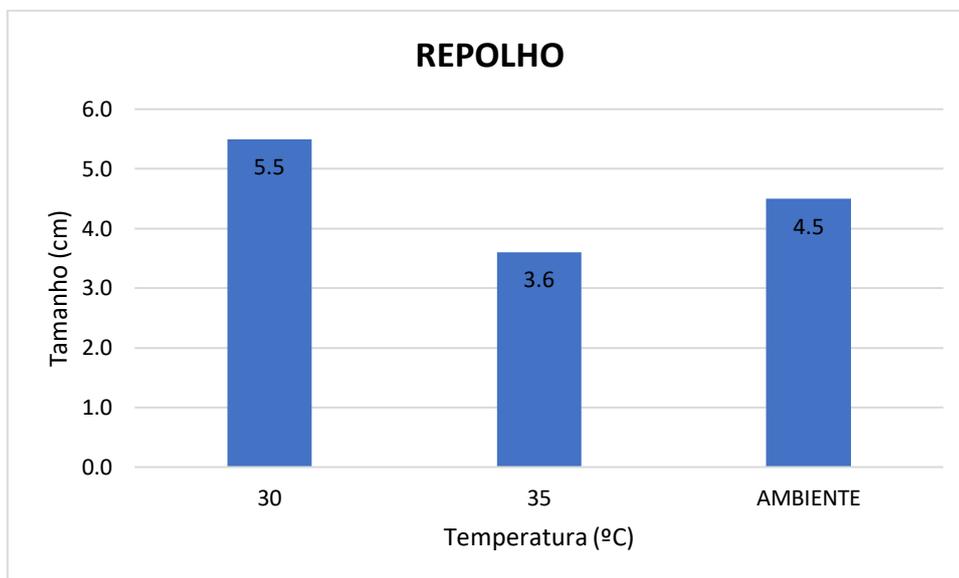


Figura 55 – Desempenho do repolho. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 56 nota-se que o desenvolvimento da rúcula na bandeja com 30°C de temperatura foi 70% superior ao crescimento da bandeja com temperatura ambiente. Porém a temperatura de 35°C inviabilizou a germinação das sementes.

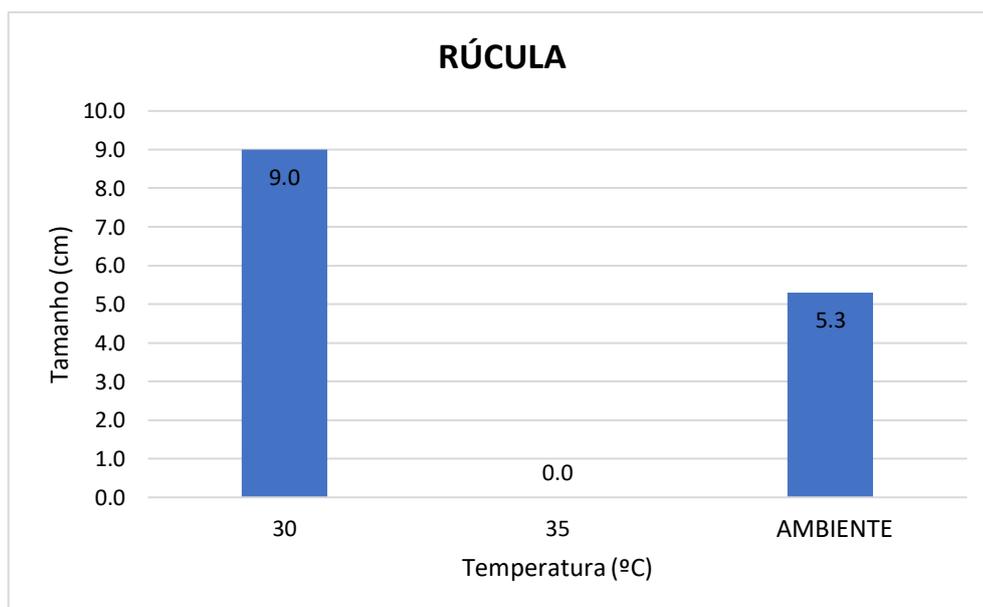


Figura 56 – Desempenho da rúcula. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 57 é possível observar o crescimento do tomate gaúcho no final do ciclo de teste. Nota-se que na bandeja de 30°C o crescimento foi de aproximadamente 89% a mais em relação a bandeja em temperatura ambiente. Porém a bandeja a 35°C apresentou resultado abaixo da temperatura ambiente.

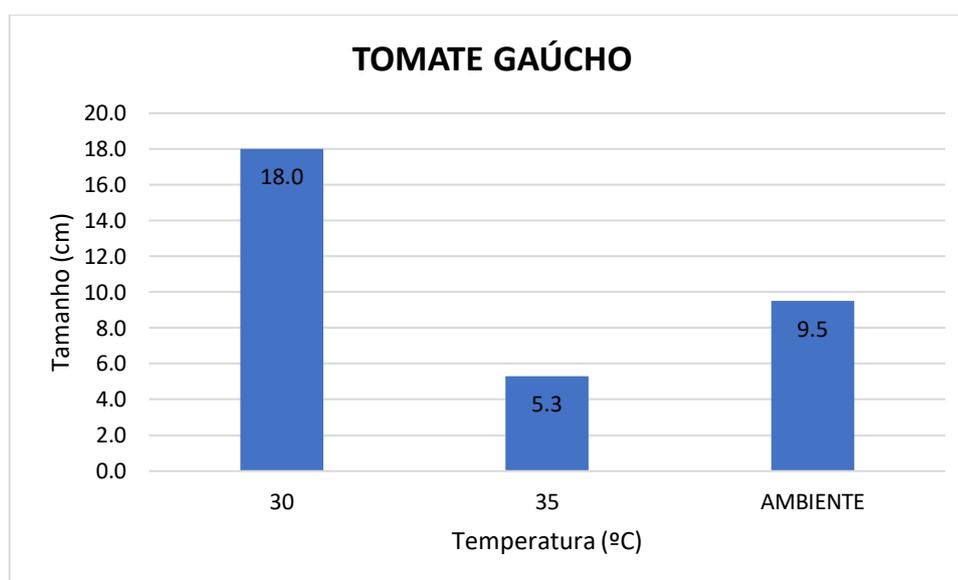


Figura 57 – Desempenho do tomate gaúcho. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na tabela 5 é possível observar os resultados de todos os plantios realizados na bandeja com o substrato aquecido a 30°C. Nota-se que algumas espécies responderam de forma positiva ao aquecimento, crescendo mais rapidamente do que em temperatura ambiente, como por exemplo a pimenta malagueta.

| | ESPÉCIE | 30°C (cm) | AMBIENTE (cm) | % |
|----|-------------------|-----------|---------------|------|
| 1 | Pimenta-malagueta | 10,5 | 3,9 | 169% |
| 2 | Tomate Gaúcho | 18,0 | 9,5 | 89% |
| 3 | Rúcula | 9,0 | 5,3 | 70% |
| 4 | Repolho | 5,5 | 4,5 | 22% |
| 5 | Alface Simpson | 6,0 | 5,3 | 13% |
| 6 | Mostarda | 7,7 | 7,2 | 7% |
| 7 | Erva-Cidreira | 0,0 | 0,0 | - |
| 8 | Couve | 6,5 | 8,2 | - |
| 9 | Alface Crespa | 0,0 | 6,4 | - |
| 10 | Chicória | 0,0 | 4,0 | - |

Tabela 6 – Resultados da bandeja a 30°C. (Elaborado pelo autor, 2022).

Enquanto outras espécies responderam de forma negativa, crescendo menos do que as espécies da bandeja em temperatura ambiente, e em alguns casos mais severos até não germinando devido ao calor da bandeja.

De forma análoga, podem ser observados na tabela 6 os resultados da bandeja aquecida a 35°C. Neste cenário, apenas a pimenta malagueta apresentou um resultado positivo em relação a bandeja em temperatura ambiente. Todas as outras espécies não tiveram desenvolvimento satisfatório, não germinaram por causa do calor da bandeja, ou morreram por algum fator durante o experimento.

| | ESPÉCIE | 35°C (cm) | AMBIENTE (cm) | % |
|----|-------------------|-----------|---------------|-----|
| 1 | Pimenta malagueta | 6,5 | 3,9 | 67% |
| 2 | Erva-Cidreira | 0,0 | 0,0 | - |
| 3 | Mostarda | 7,2 | 7,2 | - |
| 4 | Repolho | 3,6 | 4,5 | - |
| 5 | Tomate Gaúcho | 5,3 | 9,5 | - |
| 6 | Couve | 3,5 | 8,2 | - |
| 7 | Alface Crespa | 0,0 | 6,4 | - |
| 8 | Alface Simpson | 0,0 | 5,3 | - |
| 9 | Rúcula | 0,0 | 5,3 | - |
| 10 | Chicória | 0,0 | 4,0 | - |

Tabela 7 – Resultados da bandeja a 35°C. (Elaborado pelo autor, 2022).

7.5. RESULTADOS DO 3º CICLO

A proposta do 3º ciclo é continuar fazendo a análise dos impactos do aquecimento do substrato na produção de mudas, porém com algumas alterações em relação aos ciclos anteriores.

A primeira alteração foi diminuir a quantidade de espécies utilizadas no teste. Como pode ser observado nos resultados do 2º ciclo, foram utilizadas dez espécies de plantas em quatro configurações de bandejas diferentes. Cada espécie reagiu de forma diferente em cada bandeja, fazendo com que a análise dos resultados se tornasse muito complexa e em alguns casos até sem possibilidade de se chegar a uma conclusão. Dessa forma, para este ciclo foram escolhidas apenas duas espécies, sendo essas, alface crespa e tomate gaúcho.

A segunda alteração foi utilizar uma das bandejas com sistema de aquecimento de substrato em ambiente externo junto com a bandeja sem aquecimento, para que fosse possível avaliar os efeitos do aquecimento de substrato sem a iluminação artificial.

A terceira alteração do teste foram as temperaturas das bandejas. Neste ciclo foram adotadas as temperaturas de 27°C e 33°C para as bandejas em ambiente interno e 30°C para a bandeja em ambiente externo. Nota-se que os valores de temperatura adotados são mais baixos do que do segundo ciclo, sendo possível concluir, temperaturas a partir de 35°C tendem a impossibilitar a germinação das sementes. Adotando temperaturas mais baixas será possível avaliar possível ponto de ótimo desempenho das mudas.

Antes do plantio foram realizadas as marcações dos pontos no substrato em todas as bandejas que receberiam as sementes, melhorando a capacidade de previsão do local de emergência de cada plantio, conforme pode ser visto na figura 58. Cada plantio foi realizado a direita de cada estaca.



Figura 58 – Marcação dos pontos de plantio. (Elaborado pelo autor, 2022).

No dia 10/02/22 foram feitos 100 plantios em cada bandeja, sendo 50 de alface crespa e 50 de tomate gaúcho, formando a malha 10x10 dentro de cada bandeja de plantio.

No dia 19/02/2022, após 9 dias do início do teste, foram feitos os primeiros registros do progresso do experimento.

Na figura 59 é possível ver o desenvolvimento da bandeja em ambiente interno aquecida a 27°C. Nota-se que esta bandeja resultou em produção com grande eficiência, possuindo poucos espaços vazios, o que significa que poucas sementes não germinaram. Além disso, é possível observar a uniformidade do plantio, ou seja, o crescimento igual favorece o transplântio das mudas na mesma data para o local definitivo.



Figura 59 – Bandeja interna a 27°C. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 60 é possível observar o desenvolvimento da bandeja interna a 33°C.



Figura 60 – Bandeja interna a 33°C. (Elaborado pelo autor, 2022).

Nota-se que a bandeja interna a 33°C apresentou desempenho bastante diferente da bandeja interna a 27°C. É possível ver que as sementes de alface praticamente não se desenvolveram a essa temperatura. Poucas sementes chegaram a emergir até a data deste registro. Já as sementes de tomate gaúcho apresentaram bom desenvolvimento, assim como na bandeja interna a 27°C. Isso demonstra que o tomate gaúcho consegue se desenvolver bem em faixa de temperatura maior do que o alface. A inclinação do tomate gaúcho observada na figura 33, é causada pelo fototropismo, que é a capacidade que as plantas possuem de crescer em direção a luz, otimizando a eficiência de captação luminosa.

Na figura 61 é possível observar o progresso da bandeja externa a 30°C. Nota-se que assim como na bandeja interna a 33°C as sementes de alface não germinaram de forma considerável. Poucas sementes emergiram e de forma aleatória. Já as sementes do tomate gaúcho apresentaram desempenho similar as bandejas em ambiente interno, porém com eficiência menor, visto que é possível apontar alguns locais sem germinação.

Outro fator a ser levado em consideração é a influência do vento neste plantio. Na figura 61 é possível ver que algumas sementes de tomate gaúcho germinaram no lado da alface e vice versa. Isso demonstra a importância de se criar uma barreira para quebrar o vento, pois além de tirar as sementes do lugar, a exposição ao vento dificulta a estabilidade da temperatura nas bandejas. Uma produção em ambiente controlado elimina as características imprevisíveis do plantio como temperatura, iluminação e umidade.



Figura 61 – Bandeja externa a 30°C. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 62 é possível observar o comportamento da bandeja em temperatura ambiente. Nota-se que nesta bandeja houve aumento na quantidade de germinação da alface crespa em relação as bandejas de 30°C e 33°C, porém a taxa de germinação ainda é menor quando comparado com a bandeja interna de 27°C. Já o tomate gaúcho teve desempenho muito semelhante ao desempenho das outras bandejas, porém é possível notar algumas falhas na germinação, podendo concluir que a bandeja interna a 27°C apresentou eficiência maior em relação a bandeja externa.



Figura 62 – Bandeja em temperatura ambiente. (Elaborado pelo autor, 2022).

No dia 26/02/2022, após 16 dias de plantio foram feitos novos registros dos progressos dos cultivares nas bandejas.

Na figura 63 é possível ver o desenvolvimento das duas espécies na bandeja interna com temperatura de 27°C. Nota-se o quão expressivo foi o crescimento tanto da alface crespa quanto do tomate gaúcho em apenas sete dias.

Observa-se também a uniformidade do crescimento das mudas, demonstrando o quanto o sistema de irrigação por aspersão foi mais eficaz do que o sistema de irrigação por gotejamento.

Na figura 64 é possível observar o resultado do teste da badeja a 33°C. Nota-se que a alface crespa não reagiu de forma positiva a essa temperatura do substrato pelo seu baixo

desenvolvimento ao longo dos 16 dias. Porém o tomate gaúcho apresentou o mesmo progresso ao tomate da bandeja interna de 27°C.



Figura 63 – Bandeja interna a 27°C. (Elaborado pelo autor, 2022).



Figura 64 – Bandeja interna a 33°C. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 65 é possível notar o resultado na bandeja com temperatura de 30°C. Nota-se que as duas espécies secaram e morreram. Depois de um longo tempo de análise, foi descoberto erro na programação do controlador que permitia que o sistema de aquecimento ficasse ligado na potência máxima durante todo o tempo. Basicamente, a variável que armazena os valores de erro do PID é uma variável de 10 bits, ou seja, pode armazenar valores de 0 a 1023. E, a parte

integral do PID tem a função de acumular o erro ao longo do tempo. Em um dia quente a temperatura ambiente pode passar dos 30 graus. Sabendo que valor de referência de temperatura do controlador foi definido como 30°C para a bandeja externa, portanto quando a temperatura ambiente passava dos 30°C o controlador permanecia continuamente acumulando os valores de erro até que a variável passasse da sua capacidade de armazenamento. Isso provocava erro dentro da rotina do programa que acionava o cabo de calefação continuamente a 100% da sua potência. Dessa forma, a bandeja chegou a atingir temperaturas acima de 60°C, ocasionando a morte de todo o plantio.



Figura 65 – Bandeja externa a 30°C. (Elaborado pelo autor, 2022).

Na figura 66 é possível ver o desenvolvimento da bandeja a temperatura ambiente.



Figura 66 – Bandeja externa a temperatura ambiente. (Elaborado pelo autor, 2022).

Ao comparar os resultados da bandeja a 27°C e a bandeja a temperatura ambiente, nota-se considerável diferença entre os crescimentos da alface crespa nas duas bandejas. Já o tomate gaúcho apresentou desenvolvimento semelhante nas duas bandejas.

Pode ser concluído com este ciclo de experimentos que a alface crespa é bastante sensível ao aquecimento do substrato sendo que temperaturas acima de 30°C inviabilizam a germinação e o desenvolvimento, e temperaturas próximas de 27° potencializam o crescimento.

O tomate gaúcho apresentou desenvolvimento muito semelhante em todas as bandejas, demonstrando dessa forma que o aquecimento do substrato não afeta sua germinação e seu crescimento de forma significativa.

Devido a problemas técnicos, não foi possível comparar a performance da bandeja externa a 30°C com a bandeja externa a temperatura ambiente.

7.6. RESULTADOS DO 4º CICLO

Após exaustiva busca pelo erro que provocou o superaquecimento da bandeja externa de 30°C no terceiro ciclo, foi constatado que o erro era no programa de controle e foram feitas as devidas correções do problema.

Foi feita uma rotina condicional no programa que avalia o valor armazenado pela variável PID e tomadas as ações para evitar que não ultrapasse sua capacidade de armazenamento.

Evitando que o programa gerasse o erro que estava causando o acionamento com 100% de potência do cabo de calefação.

Este erro surgiu apenas no terceiro ciclo porque foi apenas neste ciclo que se colocou a bandeja com aquecimento em ambiente externo. Portanto, somente no último teste que o sistema de controle foi submetido a temperaturas mais altas, visto que em ambientes internos a temperatura tende a oscilar menos.

Neste quarto ciclo foi decidido que somente seria utilizado a alface crespa como teste. A razão dessa escolha e que não foram encontradas mais sementes de tomate gaúcho do mesmo fabricante e do mesmo lote, o que poderia levar a resultados diferentes dos ciclos anteriores, dificultando a análise do desenvolvimento da espécie.

A configuração das temperaturas das bandejas de plantio para esse ciclo foram 26°C e 28°C, respectivamente, para as bandejas em ambiente interno com iluminação artificial, e 26°C para a bandeja externa com aquecimento e iluminação natural, conforme tabela 2.

Foram escolhidos esses valores de temperatura, pois conforme pode ser visto no terceiro ciclo, a bandeja que apresentou o melhor resultado foi a bandeja de 27°C. Portanto foram escolhidos valores de temperatura que circundam esse valor na tentativa de encontrar um valor de ótimo desempenho.

Foi escolhida a temperatura de 26°C para a bandeja externa para que fosse possível realizar dois testes ao mesmo tempo. O primeiro teste seria comparar o desempenho da bandeja externa com aquecimento e a bandeja externa em temperatura ambiente. O segundo teste seria fazer a comparação entre a bandeja interna e externa com a mesma temperatura, no caso 26°C.

O plantio foi realizado no dia 25/05/2022 e os registros a seguir foram coletados no dia 18/06/2022, totalizando 24 dias de plantio.

A figura 67 refere-se ao resultado do desempenho da bandeja interna a 26°C.

A figura 68 refere-se a bandeja interna a 28°C.

A figura 69 é referente a bandeja externa a 26°C.

E, a figura 70 refere-se a bandeja em temperatura ambiente.



Figura 67 – Bandeja interna a 26°C. (Elaborado pelo autor, 2022).



Figura 68 – Bandeja interna a 28°C. (Elaborado pelo autor, 2022).



Figura 69 – Bandeja externa a 26°C. (Elaborado pelo autor, 2022).



Figura 70 – Bandeja externa a temperatura ambiente. (Elaborado pelo autor, 2022).

Os resultados demonstram a diferença significativa entre a produção em ambiente interno e o ambiente externo.

Em ambiente interno o cultivo está acondicionado em situação em que as variáveis envolvidas no plantio estão mais sob controle. Portanto, umidade, iluminação e temperatura, não sofrem tanta oscilação ao longo do processo, e isso reflete no melhor desempenho do plantio.

É possível notar que a bandeja interna a 26°C e a bandeja interna a 28°C apresentaram crescimento muito semelhante. Com esse resultado e com os resultados do 3º ciclo, é possível concluir que a faixa de ótimo desempenho da alface crespa está entre 26°C e 28°C e que a 27°C apresentou os melhores resultados de todos os ciclos.

As bandejas externas também apresentaram desempenho bastante semelhante entre si, porém com resultado muito insatisfatório. Uma hipótese para esse baixo desempenho é o fato que a época do plantio a temperatura ambiente estava muito alta, atingindo facilmente mais de 35°C durante grande parte do dia. Aliado a isso, as bandejas estavam expostas diretamente a luz solar na maior parte do dia. Esse fator pode ter contribuído para o aumento demasiado de temperatura nas bandejas ocasionando a inviabilização das sementes.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. SÍNTESE DOS RESULTADOS

Após a realização dos experimentos e análise dos dados é possível concluir que o aquecimento do substrato impacta no desenvolvimento dos cultivares. Este impacto pode ser positivo ou negativo a depender da temperatura utilizada.

No caso específico da alface crespa, é possível concluir que a faixa ideal de temperatura do substrato está entre 26°C e 28°C. Ao cultivar dentro dessa faixa, o desenvolvimento da alface crespa será mais rápido do que com o método tradicional. Temperaturas acima de 28° não favorecem o crescimento da alface crespa, podendo até em alguns casos inviabilizar as sementes.

Outros cultivares como o tomate gaúcho, por exemplo, possuem maior faixa de temperaturas aceitáveis, podendo ter bons resultados entre 27°C e 33°C, acima dessa faixa o tomate gaúcho perde desempenho no seu crescimento.

8.2. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O tempo foi fator muito limitante da pesquisa. Seria necessário mais tempo para a realização de mais experimentos com a mesma espécie e com outras espécies para se chegar a dados mais precisos.

O orçamento limitou a pesquisa, pois com mais sensores, atuadores e tecnologias aplicadas seria possível obter controles e resultados mais precisos.

8.3. PROPOSIÇÃO PARA ESTUDOS FUTUROS

Avaliar se as mudas produzidas em substrato aquecido, após o transplante, desenvolvem-se com qualidade até o estágio final.

Desenvolver estudo de viabilidade econômica do sistema de aquecimento do substrato e irrigação aquecida totalmente automatizados.

9. REFERÊNCIAS

- ALPAY, Ö.; ERDEM, E. **Climate Control of an Smart Greenhouse based on Android**. International Conference On Artificial Intelligence And Data Processing (Idap), Turkey, p. 1-5, set. 2018.
- AMARAL, Cristiane de Avila. **Vertical farm (fazenda vertical): análise da qualidade do investimento usando protótipo de empreendimento imobiliário**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2018.
- BAULCOMBE, D. et al. **Reaping the benefits: Science and the sustainable intensification of global agriculture**. London: The Royal Society, 2009. Disponível em: https://royalsociety.org/~media/royal_society_content/policy/publications/2009/4294967719.pdf. Acesso em: 15 nov. 2021.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 5. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2012. 590 p.
- CAVALCANTI, Sávio Duarte Lopes et al. **Variação espaço-temporal da temperatura do substrato em bandejas de produção de mudas**. Revista de Agricultura Neotropical, v. 6, n. 1, p. 66-73, 2019.
- DANIEL, Ederson Afonso et al. **Aprimoramento tecnológico no teste de emergência de sementes de soja em leito de areia**. 2020.
- FERNÁNDEZ, Manuel et al. **Solid-state relay solutions for induction cooking applications based on advanced power semiconductor devices**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 66, n. 3, p. 1832-1841, 2018.
- FERREIRA, A. G.; BORGHETTI, F. **Germinação: do básico ao aplicado**. Porto Alegre: Artmed, 2004.
- FILHO, A. C. M. **Sistema De Automação E Controle Inteligente Para Cultivo Protegido**. Tecnologia Acessível Ao Pequeno Produtor. p. 1–134, 2017
- LA NOTTE, L. et al. **Hybrid and organic photovoltaics for greenhouse applications**. Applied Energy, v. 278, p. 115582, 15 nov. 2020.
- LI, Bin et al. **Optimal on–off control of refrigerated transport systems**. Control Engineering Practice, v. 18, n. 12, p. 1406-1417, 2010.
- NALAVADE, Sandeep P. et al. **Development of 12 Channel Temperature Acquisition System for Heat Exchanger Using MAX6675 and Arduino Interface**. Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018). Springer, Singapore, 2019.
- NASCIMENTO, W. M.; PEREIRA, R. B. **Produção de mudas de hortaliças**. Embrapa Hortaliças-Livro técnico (INFOTECA-E), 2016.
- NISE, Norman S. **Control systems engineering**. John Wiley & Sons, 2020.

OLIVEIRA, Euler. **Como usar com Arduino – Módulo MAX6675.**
<https://blogmasterwalkershop.com.br/>, 2022 Acesso em: 14/03/22

PUTRA, Akbar Satria; AFIANTI, Hasti; WATIASHIH, Richs. **Comparative analysis of solar charge controller performance between mppt and pwm on solar panels.** Journal of electrical engineering and computer sciences, vol 7 number 1, June 2022, v. 7, n. 1, 2022.

SAHOUR, A. **Greenhouse Climate Controller by Using of Internet of Things Technology and Fuzzy Logic.** Instrumentation Measure Métrologie, Edmonton, v. 20, n. 1, p. 29-38, fev. 2021. Disponível em: <https://www.iieta.org/journals/i2m/paper/10.18280/i2m.200105>. Acesso em: 15 nov. 2021.

SETYAWAN, Teguh. **MAX6675 K-Type Thermocouple with Arduino.**
<https://microcontrollerslab.com/>, 2022 Acesso em: 14/03/22

SOUZA, Vitor Amadeu. **Termopar Com Pic.** Clube de Autores, 2013.

VISHWAKARMA, A. **IOT Based Greenhouse Monitoring And Controlling System.** 2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES), 2020

ZHANG, W. et al. **Robust Model-based Reinforcement Learning for Autonomous Greenhouse Control.** arXiv Preprint, 2021. Submetido em 26 ago. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2108.11645>. Acesso em: 27 out. 2021.

10. ANEXO

Anexo A – Código de programação do controle de temperatura.

```
#include <Arduino.h>
#include <TM1637Display.h>
#include "max6675.h" //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
#include <PWM.h>

int temperatura_display=0;
int ktcSO = 8; //PINO DIGITAL (SO)
int ktcCS = 9; //PINO DIGITAL (CS)
int ktcCLK = 10; //PINO DIGITAL (CLK / SCK)
//const int ledPin=13;

int led=11;
int32_t frequency=10;

float ref=26;
float erro=0;
float erro2=0;
float pid=0;

float kp=50;
float ki=0.01;
float kd=20;

float proporcional;
float integral;
float derivativo;
```

```

int pwm;

#define num 50
#define CLK 2
#define DIO 3
TM1637Display display (CLK, DIO);

#define BOTAO1 12
#define BOTAO2 13

MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO); //CRIA UMA INSTÂNCIA UTILIZANDO OS
PINOS (CLK, CS, SO)

float moving_average(float temp_bruta);

int values[num];          //vetor com num posições, armazena os valores para cálculo da
média móvel

float temp_bruta;         //armazena a leitura sem filtro da entrada analógica
float temp_filtrada;     //armazena a leitura filtrada da entrada analógica
int var = 0;

void setup(){
    display.setBrightness (0x0f);
    Serial.begin(115200); //INICIALIZA A SERIAL
    pinMode(led, OUTPUT);
    delay(500); //INTERVALO DE 500 MILISSEGUNDOS
    InitTimersSafe();
    SetPinFrequencySafe(led,frequency);

```

```

while (var <=num) {
temp_bruta=ktc.readCelsius();
temp_filtrada = moving_average(temp_bruta);
var++;
}

pinMode(BOTAO1, INPUT_PULLUP);
pinMode(BOTAO2, INPUT_PULLUP);

}

void loop(){

    if(digitalRead(BOTAO1) == LOW){
    ref=ref+1;
    display.showNumberDec (ref, true);
    delay(1000);
    }

    if(digitalRead(BOTAO2) == LOW){
    ref=ref-1;
    display.showNumberDec (ref, true);
    delay(1000);
    }

temp_bruta=ktc.readCelsius();
temp_filtrada = moving_average(temp_bruta);
    erro=(ref-temp_filtrada)/ref;

//***** CONTROLE PROPORCIONAL *****

```

```

proporcional=erro*kp;

//***** CONTROLE INTEGRAL *****
integral=integral+(erro*ki);

//***** CONTROLE DERIVATIVO *****
derivativo=((erro-erro2)*kd);
erro2=erro;

//***** CONTROLE PID *****
pid=proporcional+integral+derivativo;
pwm=pid*1023;

if (pwm>1023) {
pwm=1023;
}

if (pwm<0) {
pwm=0;
}

pwmWrite(led, pwm);

Serial.print(ref);
Serial.print(" ");
Serial.print(temp_bruta);
Serial.print(" ");
Serial.print(temp_filtrada);
Serial.print(" ");
Serial.print(proporcional);

```

```
Serial.print(" ");
Serial.print(integral);
Serial.print(" ");
Serial.print(derivativo);
Serial.print(" ");
Serial.print(pid);
Serial.print(" ");
Serial.println(pwm);
```

```
delay(500); //INTERVALO DE 500 MILISSEGUNDOS
```

```
temperatura_display=temp_filtrada*100;
display.showNumberDec (temperatura_display, true);
delay(100);
```

```
} // FIM DO LOOP
```

```
// --- Desenvolvimento das Funções ---
```

```
float moving_average(float temp_bruta)
```

```
{
```

```
int i;          //variável auxiliar para iterações
```

```
float acc = 0;  //acumulador
```

```
//Desloca o vetor completamente eliminando o valor mais antigo
```

```
for(i = num; i > 0; i--) values[i] = values[i-1];
```

```
values[0] = temp_bruta;    //carrega o sinal no primeiro elemento do vetor
```

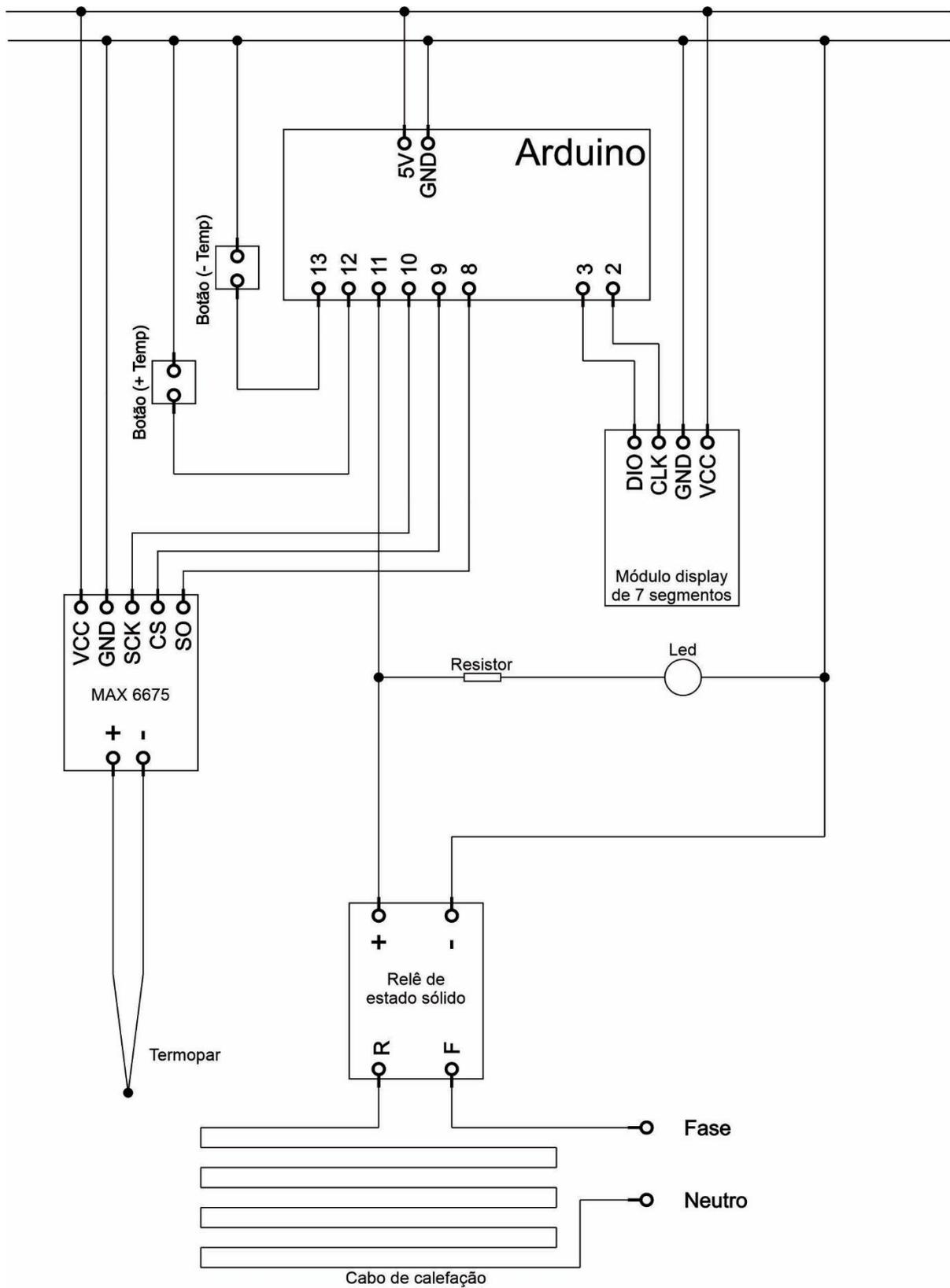
```
// long sum = 0;          //Variável para somatório
```

```
for(i = 0; i < num; i++) acc += values[i];
```

```
return acc / num;        //Retorna a média móvel
```

```
} //end moving_average
```

Anexo B – Circuito de controle de temperatura.

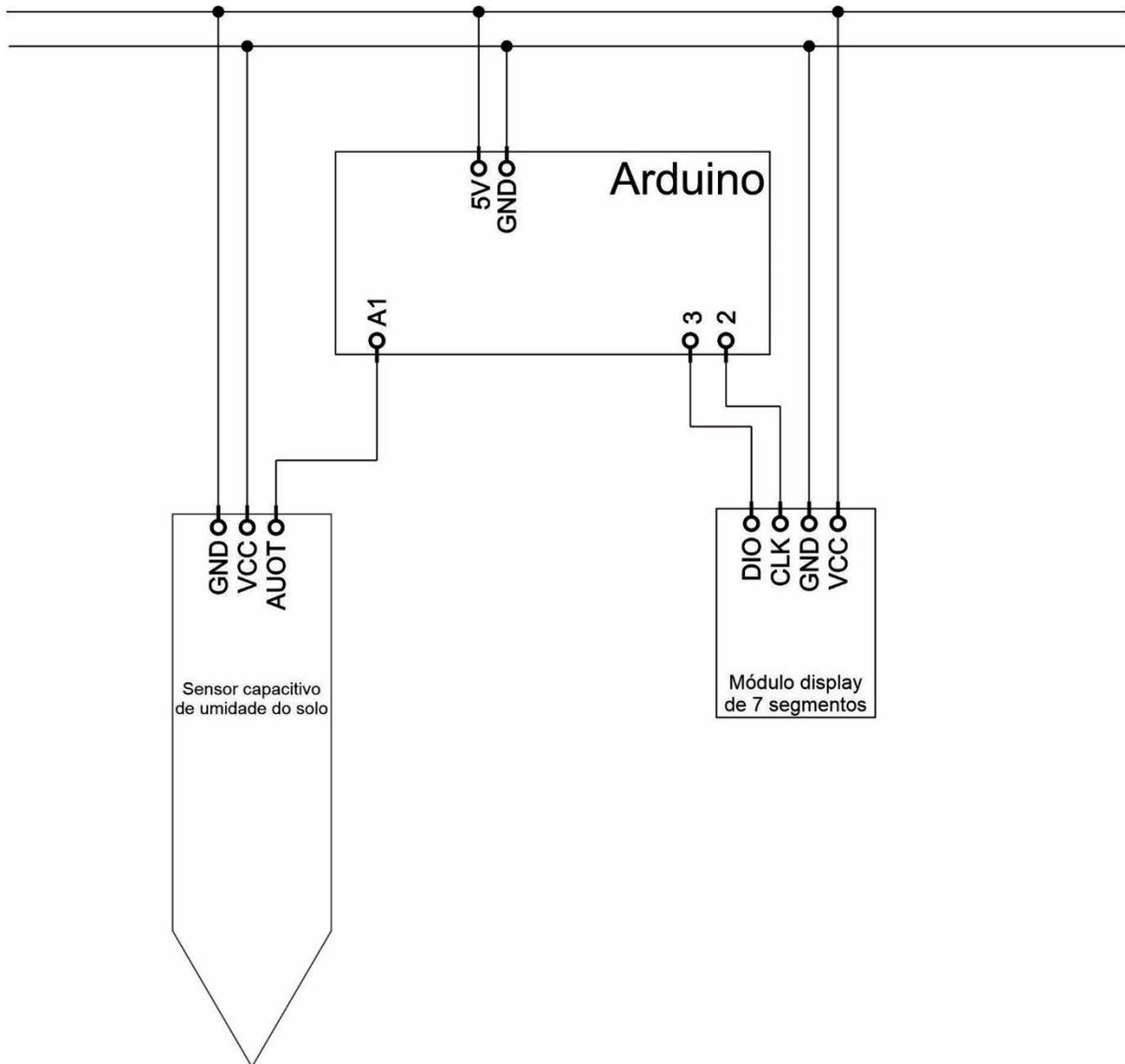


Anexo C – Código de programação do controle de umidade.

```
#include <Arduino.h>  
#include <TM1637Display.h>  
#define CLK 2  
#define DIO 3  
TM1637Display display(CLK, DIO);  
  
int relayPin = 8;  
int sensor_pin = A1; // Soil Sensor input at Analog PIN A0  
float output_value ;  
int umidade=50;  
  
void setup() // put your setup code here, to run once:  
  
{  
  Serial.begin(9600);  
  pinMode(relayPin, OUTPUT);  
  pinMode(sensor_pin, INPUT);  
  display.setBrightness (0x0f);  
}  
  
void loop()  
{  
  output_value= analogRead(sensor_pin);  
  //output_value=((600-output_value)/600)*100;  
  //display.showNumberDec (output_value, true);  
  Serial.println(output_value);  
  if(output_value>umidade){
```

```
digitalWrite(relayPin, LOW);  
}  
else  
{  
digitalWrite(relayPin, HIGH);  
}  
delay(1000);  
}
```

Anexo D – Circuito de controle de umidade.



Anexo E – Registro do crescimento no segundo ciclo de experimentos.

| T | ESPÉCIE | 10/1 | 11/1 | 12/1 | 13/1 | 14/1 | 15/1 | 16/1 | 17/1 | 18/1 | 19/1 | 20/1 | 21/1 | 22/1 | 23/1 | 24/1 | 25/1 | 26/1 | 27/1 | 28/1 | 29/1 | 30/1 | 31/1 | 1/2 | 2/2 | 3/2 |
|----|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 30 | Alface Crespa | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |
| 35 | Alface Crespa | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| 40 | Alface Crespa | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| N | Alface Crespa | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,5 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,9 | 3,2 | 3,6 | 3,9 | 4,2 | 4,5 | 4,8 | 5,1 | 5,5 | 5,8 | 6,1 | 6,4 |
| 30 | Alface Simpson | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,7 | 0,9 | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 1,9 | 2,1 | 2,4 | 2,8 | 3,1 | 3,4 | 3,7 | 4,1 | 4,4 | 4,7 | 5,0 | 5,4 | 5,7 | 6,0 |
| 35 | Alface Simpson | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 40 | Alface Simpson | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| N | Alface Simpson | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,6 | 2,0 | 2,3 | 2,6 | 3,0 | 3,3 | 3,6 | 4,0 | 4,3 | 4,6 | 5,0 | 5,3 |
| 30 | Couve | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,8 | 1,8 | 2,2 | 2,6 | 3,0 | 3,3 | 3,7 | 4,1 | 4,3 | 4,5 | 4,7 | 4,9 | 5,1 | 5,3 | 5,5 | 5,7 | 5,9 | 6,1 | 6,3 | 6,5 |
| 35 | Couve | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,1 | 3,1 | 3,2 | 3,2 | 3,3 | 3,3 | 3,3 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,5 | 3,5 |
| 40 | Couve | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| N | Couve | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,6 | 1,9 | 2,3 | 2,6 | 3,0 | 3,3 | 3,7 | 4,0 | 4,4 | 4,7 | 5,1 | 5,4 | 5,8 | 6,1 | 6,5 | 6,8 | 7,2 | 7,5 | 7,9 | 8,2 |
| 30 | Rúcula | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,8 | 1,0 | 1,8 | 1,9 | 2,2 | 2,5 | 2,8 | 3,0 | 3,3 | 3,6 | 4,1 | 4,5 | 5,0 | 5,4 | 5,9 | 6,3 | 6,8 | 7,2 | 7,7 | 8,1 | 8,6 | 9,0 |
| 35 | Rúcula | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 40 | Rúcula | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| N | Rúcula | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2,1 | 2,4 | 2,7 | 3,0 | 3,2 | 3,4 | 3,6 | 3,8 | 4,0 | 4,2 | 4,3 | 4,5 | 4,7 | 4,9 | 5,1 | 5,3 |
| 30 | Erva Cidreira | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 35 | Erva Cidreira | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,6 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,2 | 2,3 | 2,1 | 1,9 | 1,7 | 1,5 | 1,3 | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | 0,0 |
| 40 | Erva Cidreira | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| N | Erva Cidreira | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 30 | Repolho | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 2,2 | 2,3 | 2,7 | 3,0 | 3,4 | 3,7 | 4,1 | 4,4 | 4,5 | 4,6 | 4,7 | 4,8 | 4,9 | 5,0 | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 5,3 | 5,4 | 5,5 |
| 35 | Repolho | 0,0 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2,2 | 2,5 | 2,8 | 3,1 | 3,1 | 3,2 | 3,2 | 3,3 | 3,3 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,5 | 3,5 | 3,6 | 3,6 |
| 40 | Repolho | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| N | Repolho | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,8 | 1,1 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,3 | 3,5 | 3,6 | 3,8 | 4,0 | 4,2 | 4,3 | 4,5 |
| 30 | Mostarda | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 1,9 | 2,3 | 2,7 | 3,1 | 3,5 | 3,9 | 4,3 | 4,6 | 4,9 | 5,2 | 5,4 | 5,7 | 6,0 | 6,3 | 6,6 | 6,9 | 7,1 | 7,4 | 7,7 |
| 35 | Mostarda | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 1,1 | 1,5 | 1,8 | 2,2 | 2,5 | 2,9 | 3,3 | 3,7 | 4,1 | 4,5 | 4,9 | 5,2 | 5,6 | 6,0 | 6,4 | 6,8 | 7,2 |
| 40 | Mostarda | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| N | Mostarda | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,8 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 2,2 | 2,6 | 3,1 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 4,9 | 5,4 | 5,8 | 6,3 | 6,7 | 7,2 |
| 30 | Chicória | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 35 | Chicória | 0,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |
| 40 | Chicória | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| N | Chicória | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,3 | 1,5 | 1,8 | 2,0 | 2,3 | 2,5 | 2,8 | 3,0 | 3,3 | 3,5 | 3,8 | 4,0 | 4,0 |
| 30 | Pimenta malagueta | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 1,4 | 1,8 | 2,2 | 2,5 | 2,9 | 3,3 | 3,9 | 4,5 | 5,1 | 5,7 | 6,3 | 6,9 | 7,5 | 8,1 | 8,7 | 9,3 | 9,9 | 10,5 | |
| 35 | Pimenta malagueta | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 1,4 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,5 | 2,8 | 3,2 | 3,6 | 3,9 | 4,3 | 4,7 | 5,0 | 5,4 | 5,8 | 6,1 | 6,5 |
| 40 | Pimenta malagueta | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| N | Pimenta malagueta | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,7 | 1,9 | 2,1 | 2,3 | 2,5 | 2,7 | 2,9 | 3,1 | 3,3 | 3,5 | 3,7 | 3,9 |
| 30 | Tomate Gaucho | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,7 | 3,0 | 3,3 | 3,7 | 4,0 | 4,3 | 4,7 | 5,0 | 6,1 | 7,2 | 8,3 | 9,3 | 10,4 | 11,5 | 12,6 | 13,7 | 14,8 | 15,8 | 16,9 | 18,0 |
| 35 | Tomate Gaucho | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 0,8 | 1,1 | 1,5 | 1,9 | 2,2 | 2,6 | 2,8 | 3,1 | 3,3 | 3,5 | 3,7 | 4,0 | 4,2 | 4,4 | 4,6 | 4,9 | 5,1 | 5,3 | 5,3 |
| 40 | Tomate Gaucho | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| N | Tomate Gaucho | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 1,6 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,7 | 2,9 | 3,1 | 3,6 | 4,2 | 4,7 | 5,2 | 5,8 | 6,3 | 6,8 | 7,4 | 7,9 | 8,4 | 9,0 | 9,5 |