

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
*Campus* DIVINÓPOLIS  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Gustavo Barros Castro

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO EM ESCALA DE SISTEMA DE CULTIVO EM  
AMBIENTE CONTROLADO

Divinópolis  
2017

Gustavo Barros Castro

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO EM ESCALA DE SISTEMA DE CULTIVO EM  
AMBIENTE CONTROLADO

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: eletrônica e computação.

Orientador: Prof. Dr. Lucio Flávio Santos Patrício

Divinópolis  
2017

Gustavo Barros Castro

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO EM ESCALA DE SISTEMA DE CULTIVO EM  
AMBIENTE CONTROLADO

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentada ao colegiado de Graduação em En-  
genharia Mecatrônica como parte dos requisitos  
exigidos para a obtenção do título de Engenheiro  
Mecatrônico.

Áreas de integração: eletrônica e computação.

Comissão Avaliadora:

---

Prof. Dr. Lúcio Flávio Santos Patrício  
CEFET-MG *Campus V*

---

Prof. Dr. Christian Gonçalves Herrera  
CEFET-MG *Campus V*

---

Prof. Me. Jean Carlos Pereira  
CEFET-MG *Campus V*

Divinópolis  
2017

# Agradecimentos

Agradeço,

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais, Maria Lúcia e Paulo César, pelo apoio durante esta jornada, pela colaboração e toda estrutura que me foi fornecida durante toda minha vida. Sem vocês nenhuma conquista seria possível.

Ao meu irmão Matheus, pelo incentivo, parceria e por estar sempre disposto a escutar as minhas ideias. A minha namorada Bruna pelo carinho, companheirismo e paciência.

A todos os professores do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, responsáveis por moldar o profissional que sou hoje, em especial ao professor Lúcio Flávio Santos Patrício, pela orientação, paciência e apoio durante todo o curso de engenharia mecatrônica.

A todos aqueles que direta e indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho, o meu Muito Obrigado.

# Epigrafe

Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.

Walter S. Landor

# Resumo

O presente trabalho de pesquisa apresenta o desenvolvimento de um protótipo em escala de sistema de cultivo em ambiente controlado, no qual variáveis ambientais, tais como temperatura do ar, umidade do solo e luminosidade, são monitoradas e controladas. A crescente variabilidade dos fatores que influenciam a agricultura tradicional, devido principalmente as mudanças climáticas aliadas a necessidade do aumento produtivo, devido a expansão populacional, criou a necessidade da migração para um sistema produtivo alimentar mais eficiente, no qual o consumo de recursos naturais seja menor, a resiliência às instabilidades climáticas seja maior e a produtividade seja expandida. Nesse escopo a Agricultura em Ambiente Controlado (AAC) aparece como uma solução para os problemas levantados. Visando avaliar as diferentes tecnologias que podem ser aplicadas em uma cultura em ambiente protegido, desenvolveu-se um protótipo capaz de monitorar e controlar a demanda de irrigação, a temperatura do ambiente e a iluminação adequada para o cultivo, sendo que todos estes processos são realizados de forma autônoma, através de instruções de um microcontrolador ATmega 2560. Para tanto realizou-se uma avaliação dos materiais necessários, o desenvolvimento da metodologia de atuação e o projeto e fabricação dos sistemas de atuação. O sistema de irrigação por gotejamento possibilitou a manutenção da umidade do solo, assim como o sistema de iluminação através de LEDs foi capaz de manter o fotoperíodo desejado. O sistema de controle de temperatura através de pastilhas de peltier foi capaz de atuar, embora de forma limitada, sobre a variável.

Palavras-chave: Cultivo em ambiente controlado. Automação. Sistema de produção agrícola.

# Abstract

This research shows the development of a small scale prototype of a controlled environment agriculture system in which environmental variables, such as air temperature, soil moisture and luminosity are monitored and controlled. The increasing variability of factors that affect the traditional agriculture, mainly due to climate change, and the need for higher productivity rates, due to population expansion, has created the need to a more efficient food production system in which the consumption of natural resources will be lower, the resilience to climate instabilities is greater and productivity is expanded. In this scope, Controlled Environment Agriculture (CEA) appears as a solution to the problems raised. In order to evaluate the different technologies that can be applied in a protected environment, a prototype able to monitoring and controlling irrigation demand, ambient temperature and adequate lighting for cultivation was developed, all of which are carried out in an autonomous way, through instructions of an ATmega 2560 microcontroller. For this purpose, an evaluation of the necessary materials, the development of the methodology of actuation and the design and manufacture of the actuation systems were carried out. The drip irrigation system was capable to maintain the soil moisture, just as the LED lighting system was able to maintain the desired photoperiod. The temperature control system through peltier cell was able to act, albeit to a limited extent, on the variable

Key-words: Controlled Environment Agriculture. Automation. Agricultural production system.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Acrônimos e Notação</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Definição do Problema . . . . .	5
1.2 Motivação . . . . .	5
1.3 Objetivos do Trabalho . . . . .	6
1.4 Estado da Arte . . . . .	6
1.5 Organização do Documento . . . . .	7
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>9</b>
2.1 Cultivo em ambiente protegido . . . . .	9
2.2 Automação agrícola . . . . .	10
2.3 Cultivo em ambiente controlado . . . . .	11
2.4 Fatores de controle . . . . .	12
2.4.1 Temperatura . . . . .	13
2.4.2 Umidade do ar . . . . .	13
2.4.3 Radiação Luminosa . . . . .	14
2.4.4 Água e nutrientes . . . . .	15
2.4.5 Concentração de $CO_2$ . . . . .	16
<b>3 Materiais e métodos</b>	<b>18</b>
3.1 Sistema de irrigação . . . . .	19
3.1.1 Sensor de umidade do solo . . . . .	19
3.1.2 Válvulas solenoides . . . . .	21
3.1.3 Gotejadores . . . . .	22
3.1.4 Funcionamento do sistema de irrigação . . . . .	23
3.2 Sistema de controle de temperatura . . . . .	25
3.2.1 Sensor de temperatura . . . . .	25
3.2.2 Pastilha de Peltier . . . . .	26
3.2.3 Ventiladores . . . . .	28
3.2.4 Funcionamento do sistema de controle de temperatura . . . . .	29
3.3 Sistema de Iluminação . . . . .	31

---

3.3.1	Relógio de tempo real . . . . .	31
3.3.2	LEDs Full spectrum . . . . .	32
3.3.3	Funcionamento do sistema de Iluminação . . . . .	34
3.4	Microcontrolador . . . . .	34
3.5	Fonte . . . . .	36
3.6	Estrutura Física . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Projeto e Fabricação</b>	<b>39</b>
4.1	Sistema de irrigação . . . . .	39
4.1.1	Sistema Hidráulico . . . . .	39
4.1.2	Circuito de acionamento . . . . .	41
4.2	Sistema de controle de temperatura . . . . .	43
4.2.1	Montagem física . . . . .	43
4.2.2	Circuitos de acionamento e controle . . . . .	46
4.3	Sistema de Iluminação . . . . .	49
4.3.1	Montagem física . . . . .	49
4.3.2	Circuito de controle da intensidade luminosa . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>53</b>
5.1	Sistema de irrigação . . . . .	53
5.2	Sistema de Controle de temperatura . . . . .	54
5.3	Sistema de iluminação . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>60</b>
6.1	Conclusões . . . . .	60
6.2	Propostas de continuidade . . . . .	61
<b>A</b>	<b>Matriz de tomada de decisão</b>	<b>62</b>
<b>B</b>	<b>Desenho estrutura de plantio</b>	<b>63</b>
<b>C</b>	<b>Código de Controle</b>	<b>64</b>
	<b>Referências</b>	<b>73</b>

# Lista de Figuras

1.1	Projeção de crescimento populacional . . . . .	1
1.2	Comparativo consumo alimentício: Atual - Projeção 2050 . . . . .	2
1.3	Produção de Grãos: Safra 2010/11 a 2016/17 . . . . .	3
1.4	Consumo de recursos Hídricos por setor . . . . .	4
2.1	Gráfico do espectro de radiação fotossinteticamente ativa . . . . .	14
2.2	Curva de crescimento vegetal em função da concentração de $CO_2$ . . . . .	17
3.1	Sensor de umidade do solo . . . . .	20
3.2	Válvula solenóide . . . . .	22
3.3	Gotejador Agrojet GA-2 . . . . .	23
3.4	Fluxograma do sistema de irrigação . . . . .	24
3.5	Sensor de temperatura e umidade do ar DHT 22 . . . . .	25
3.6	Pastilha de Peltier . . . . .	27
3.7	<i>Coolers</i> de 80 x 80mm . . . . .	29
3.8	Fluxograma do sistema de controle de temperatura . . . . .	30
3.9	Esquema de funcionamento de uma ponte H . . . . .	31
3.10	Relógio de tempo real DS3231 . . . . .	32
3.11	LED <i>full spectrum</i> 10W . . . . .	33
3.12	Fluxograma do sistema de iluminação . . . . .	34
3.13	Arduíno Mega 2560 . . . . .	35
3.14	Fonte chaveada . . . . .	36
3.15	Esboço 3D do ambiente de cultivo . . . . .	37
3.16	Estrutura para cultivo pronta . . . . .	37
3.17	Suporte para os LEDs . . . . .	38
4.1	Sistema de drenagem Implementado . . . . .	40
4.2	Peça de conexão hidráulica . . . . .	40
4.3	Sistema hidráulico fabricado . . . . .	41
4.4	Circuito para acionamento dos Reles . . . . .	42
4.5	Placa para controle da irrigação pronta . . . . .	43
4.6	Aplicação dos <i>coolers</i> na estrutura . . . . .	44
4.7	Pastilha de peltier acoplada no dissipador de calor . . . . .	45
4.8	Afixação do sistema da pastilha de peltier . . . . .	45
4.9	Circuito para controle dos <i>coolers</i> . . . . .	46
4.10	Placa para controle dos <i>coolers</i> . . . . .	46

4.11	Circuito de ponte H . . . . .	47
4.12	Exemplo de sinal com variação da largura de pulso . . . . .	48
4.13	Placa de ponte H com relé de duplo contato . . . . .	48
4.14	Conjunto LED + Dissipador . . . . .	49
4.15	Suporte para os LEDs com placas de poliestireno . . . . .	50
4.16	Circuito para acionamento dos LEDs . . . . .	51
4.17	Placa para controle da iluminação . . . . .	52
4.18	Montagem das PCBs no dissipador . . . . .	52
5.1	Monitoramento da umidade do solo. . . . .	53
5.2	Teste geral do sistema de temperatura . . . . .	54
5.3	Teste do sistema de aquecimento . . . . .	55
5.4	Resultado do sistema de aquecimento . . . . .	56
5.5	Resultado do sistema de arrefecimento . . . . .	57
5.6	Teste de luminosidade . . . . .	58
5.7	Mapa de iluminância . . . . .	58
5.8	Teste de luminosidade . . . . .	59

# Lista de Tabelas

2.1	Variáveis a mensurar e fenômenos relacionados . . . . .	12
3.1	Valores de saída apresentados pelo sensor . . . . .	20
3.2	Especificação técnica sensor de umidade do solo . . . . .	21
3.3	Especificação técnica válvula solenoide 127V . . . . .	22
3.4	Especificações técnicas Agrojet GA-2 . . . . .	23
3.5	Condições de atuação . . . . .	24
3.6	Especificações técnicas sensor DHT 22 . . . . .	26
3.7	Especificação técnica TEC - 12706 . . . . .	27
3.8	Especificação técnica ventilador . . . . .	29
3.9	Especificação técnica relógio de tempo real . . . . .	32
3.10	Especificações técnicas power LED <i>full spectrum</i> . . . . .	33
3.11	Dados técnicos fonte chaveada . . . . .	36

# Lista de Acrônimos e Notação

## Acrônimos

ONU	Organização das Nações Unidas
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> (Organização para a Agricultura e a Alimentação)
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo emissor de luz)
AAC	Agricultura em Ambiente Controlado
CEA	<i>Controlled Environment Agriculture</i> (Agricultura em Ambiente Controlado )
MIMO	<i>(Multiple Inputs-Multiple Outputs)</i> (Múltiplas entradas - Múltiplas saídas)
PID	Proporcional - Integral - Derivativo
NGMA	<i>National Greenhouse Manufacturees Association</i> (Associação nacional dos fabricantes de estufas)
RFA	Radiação Fotossinteticamente Ativa
CA	Corrente Alternada
TEC	<i>Thermoelectric Cooler</i> (Resfriador Termoelétrico)
RPM	Rotação Por Minuto
CC	Corrente Contínua
RTC	<i>Real Time Clock</i> (Relógio de Tempo Real)
MH	<i>Metal Halide</i> (Vapor Metálico)
HPS	<i>High Pressure Sodium</i> (Vapor de sódio)
PWM	<i>Pulse With Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
UART	<i>Universal asynchronous receiver/transmitter</i> (Transmissor/Receptor Assíncrono Universal)
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)
SDA	<i>Serial Data Line</i> (Linha de dados seriais)
SCL	<i>Serial Clock Line</i> (Linha de <i>clock</i> serial)
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de desenvolvimento integrado )
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> (Placa de Fibra de Densidade Média)
PVC	<i>PolyVinyl Chloride</i> (Policloreto de Vinil)
AWG	<i>American Wire Gauge</i> (Escala Americana de Bitolas de Fios)

### Acrônimos

MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> (Transistor de Efeito de Campo Metal Oxido Semicondutor)
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
S.I	<i>Système international d'unités</i> (Sistema Internacional de Unidades)
IHM	<i>Interface Homem Máquina</i>
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet da Coisas)

### Unidades de medida

Kcal	quilocaloria	Energia
mm	Milimetro	Comprimento
ppm	Partes por Milhão	Concentração
V	Volt	Tensão elétrica
A	Ampere	Corrente elétrica
m.c.a	Metro de coluna d'água	Pressão
l	litro	Volume
h	hora	Tempo
°C	Grau Celsius	Temperatura
W	Watt	Potência
$\Omega$	Ohm	Resistência elétrica
dB	Decibel	Energia
KHz	Quilohertz	Frequência
"	Polegada	Comprimento
lx	Lux	Iluminância

## Introdução

Desde a metade do século XX, o crescimento populacional tem sido exponencial. De acordo com a ONU (Organização das Nações Unidas) em 1950 a população do planeta era de 2,5 bilhões de pessoas, saltando para 3,7 bilhões em 1970 e atingindo 7 bilhões em 2010. De acordo com as projeções desta mesma agência, a população mundial poderá chegar a 9,15 bilhões até 2050, como pode ser visto abaixo na Figura 1.1. (ALEXANDRATOS; BRUINSMA *et al.*, 2012)

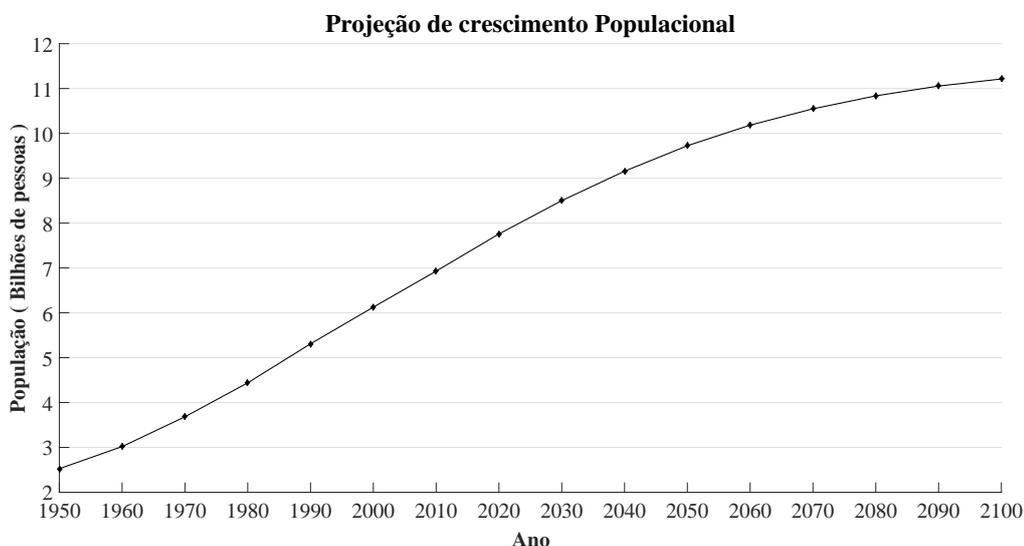


Figura 1.1: Projeção de crescimento populacional

Fonte: Adaptado de ALEXANDRATOS; BRUINSMA *et al.* (2012)

O ritmo de crescimento demográfico - acima de 70 milhões de pessoas por ano - levanta sérios questionamentos sobre a capacidade global de fornecimento de insumos básicos para sobrevivência humana, tais como água e alimentos. (ALEXANDRATOS; BRUINSMA *et al.*, 2012)

De acordo com a FAO (*Food and Agriculture Organization*) a média mundial de alimentos per capita para consumo humano era de 2770 *Kcal/pessoa/dia* em 2007, porém

devido ao desenvolvimento em áreas consideradas “Pobres” o consumo alimentar vem aumentando.

Estima-se que até 2050, 52% da população (o equivalente a 4,7 Bilhões de pessoas) viverá em países cujo consumo alimentício se mantém acima de 3000 *Kcal/pessoa/dia*, um grande aumento em relação ao valor atual de 28% da população (1,9 Bilhões de pessoas). O gráfico na Figura 1.2 apresenta um comparativo do consumo de alimentos em diversas áreas do planeta entre 2005 e 2007, quando foi feito o último levantamento oficial pela ONU, e valores projetado para estas mesmas áreas em 2050.

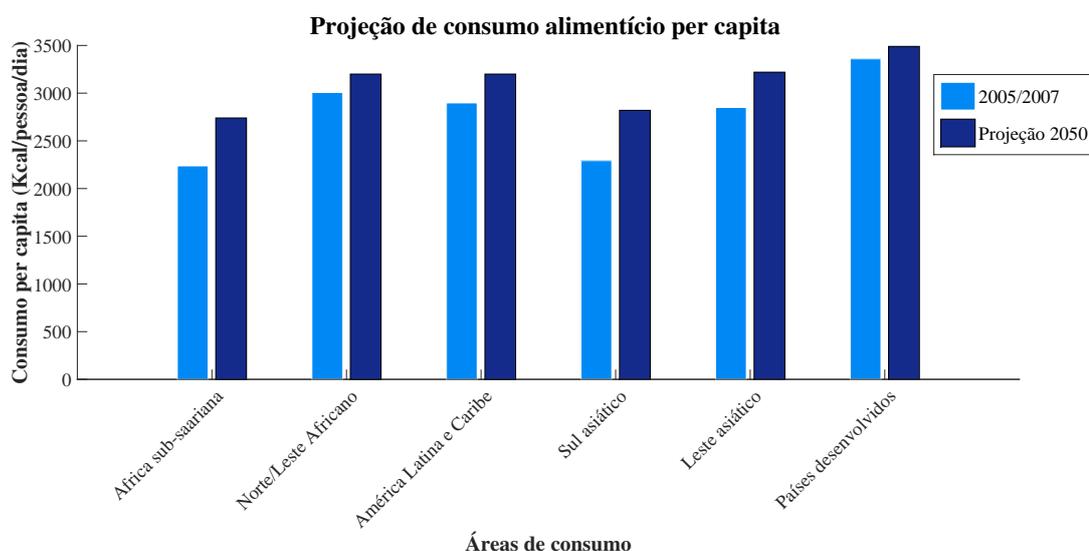


Figura 1.2: Comparativo consumo alimentício: Atual - Projeção 2050

Fonte: Adaptado de ALEXANDRATOS; BRUINSMA *et al.* (2012)

Desconsiderando-se os bolsões de fome nos países africanos, asiáticos e nas parcelas mais pobres do globo, a produção de alimentos tem acompanhado o ritmo do crescimento populacional. Para continuar atendendo a crescente população a FAO projeta que a produção de alimentos deve aumentar em pelo menos 1,1% ao ano, totalizando 60% até 2050.

Um dos principais motivos para o aumento produtivo que sustentou o crescimento populacional foi a chamada “Revolução Verde”, caracterizada pelo aporte em insumos agrícolas tais como fertilizantes minerais, desenvolvimentos de alimentos transgênicos e automação de sistemas para colheita e irrigação.

Embora estas ações tenham garantido a produtividade dos agrossistemas (lavouras, pastagens, etc), um grande impacto ambiental tem se tornado evidente em consequência das interferências. Para a produção de alimentos, os agrossistemas requerem modificações do sistema natural como remoção da cobertura vegetal, revolvimento do solo, aplicação de fertilizantes, compactação do solos e demais processos necessários para plantio, que resultam em diferentes danos ambientais, sendo que vários desses implicam em um futuro

---

impacto na produtividade agrícola .

Soma-se aos impactos ambientais causados pela agricultura as mudanças climáticas que vem sendo percebidas em todo o planeta. Segundo BROWN; CABBAGE; MCCARTHY (2016) a temperatura média da superfície global subiu em cerca de 1 °C desde o final do século XIX, mudança que pode estar em grande parte associada ao aumento de dióxido de carbono e outras emissões de origem humana.

O setor agroalimentar sendo o que mais utiliza recursos naturais, e o que mais é influenciado pelo clima, tem tido grandes impactos devido a variabilidade climática. Em 2016 os produtores rurais sofreram com a quebra da safra, com uma grande redução da produção em relação ao volume orçado, que era de 209 milhões de toneladas de grãos. A Figura 1.3 apresenta o acompanhamento anual da produção de grãos no Brasil, com a projeção para 2017. (CONAB, 2016)

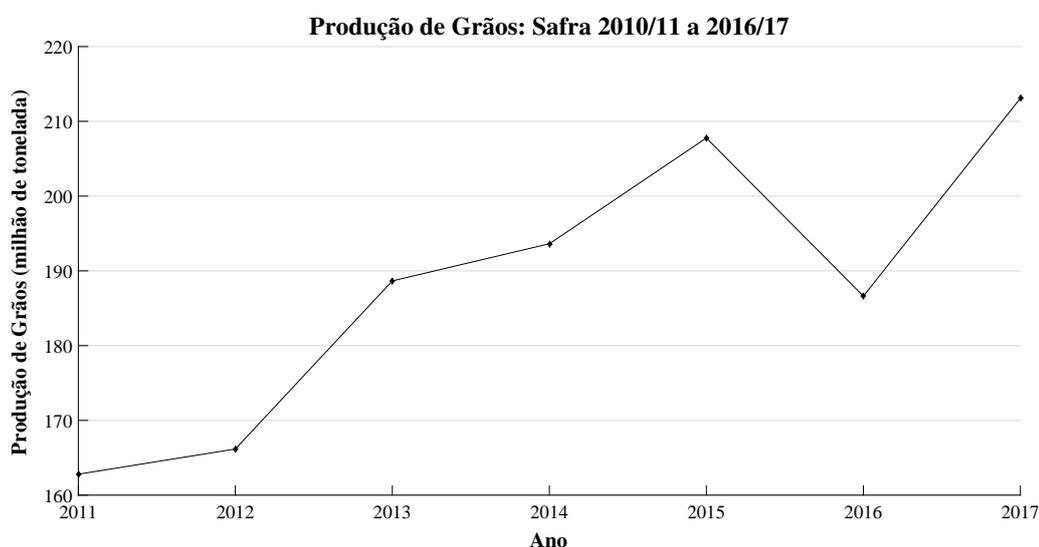


Figura 1.3: Produção de Grãos: Safra 2010/11 a 2016/17

Fonte: Adaptado de CONAB (2016)

De acordo com ANTLE (2015) as mudanças climáticas irão desestabilizar o sistema produção agrícola até a metade do século. Baseando-se no cenário atual, de baixa cooperação internacional e alta emissão de carbono, estima-se que a produção agrícola irá reduzir em cerca de 15% e o preço dos alimentos irá subir em cerca de 30% até 2050.

Junto da variabilidade climática, a escassez de recursos hídricos vem tornando o volume agrícola uma variável incerta. De acordo com a UNWATER (Mecanismo inter-agencias das nações Unidas para todos os assuntos acerca de recursos hídricos) a agricultura é responsável por 70% do consumo de água doce no mundo, como pode ser visto na Figura 1.4.

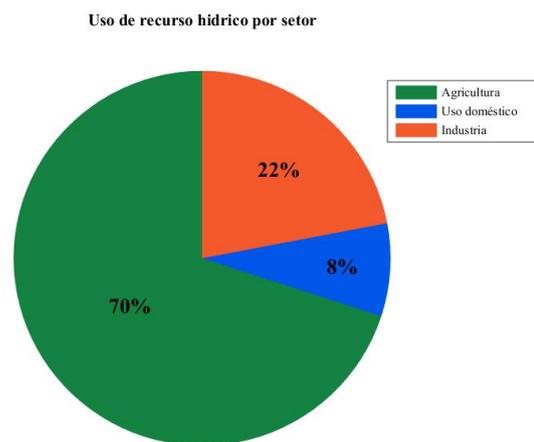


Figura 1.4: Consumo de recursos Hídricos por setor

De acordo com LLAMAS; MARTINEZ-SANTOS (2006) o uso intenso de água dos lençóis freáticos para agricultura em regiões áridas e semi-áridas vem provocando uma grande diminuição do volume dos aquíferos, aumento nos custos de extração de água e no custo de irrigação por hectare.

A crescente variabilidade da agricultura tradicional e necessidade da ampliação produtiva levantam a utilidade da migração para sistemas de produção alimentares mais eficientes, em que o consumo de recursos naturais seja menor, a resiliência às instabilidades climáticas seja maior e a produtividade seja expandida.

O cultivo realizado em ambientes protegidos é uma das tecnologias que tem contribuído para a modernização da agricultura. De acordo com FONTES (1999) e BELTRÃO; FILHO; FIGUEIRÊDO (2002), o cultivo em estufas faz com que seja possível controlar algumas das condições climáticas, tais como: temperatura, umidade do ar, radiação luminosa, solo, vento e composição atmosférica. O plantio protegido também possibilita a economia de recursos hídricos, sendo que de acordo com MOLLE (2008) este tipo de plantio utiliza cerca de 70% menos água do que os métodos convencionais.

A aplicação da automação pode contribuir com a agricultura para a melhoria da qualidade das lavouras, a redução das perdas, o aumento da produtividade. Utilizando-a consegue-se também a redução dos custos produtivos, diminuição do tempo de retorno do investimento e possibilita o planejamento e tomada de decisão. Há também diminuição do impacto ao meio ambiente e a facilitação do trabalho, o que proporciona aumento da qualidade de vida do produtor. (TERUEL, 2010)

A Agricultura em Ambiente Controlado (AAC) é fruto da junção entre o cultivo protegido e a aplicação de automação. Utilizam-se sistemas automáticos nos ambientes protegidos procurando manter o controle de algumas características ambientais. Assim, obtêm-se melhorias na qualidade e produtividade das culturas. RATTIN; ANDRIOLO; WITTER (2003).

## 1.1 Definição do Problema

Dada a necessidade da migração para sistemas produtivos mais eficientes, de forma a garantir o futuro da segurança alimentar e da competitividade produtiva, uma importante questão é levantada: Como a tecnologia pode auxiliar no desenvolvimento de um sistema de cultivo mais eficiente e menos suscetível a instabilidades?

Visando responder esta questão desenvolveu-se um protótipo de sistema de cultivo em ambiente controlado. A construção de um protótipo é um método para se obter respostas iniciais a um problema, através de um modelo funcional do produto esperado (PMBOK, 2008). Este poderá ser utilizado para avaliações do aumento em produtividade do cultivo através da implantação de novas tecnologias, principalmente no que tange a área de automação e controle.

O protótipo consiste em uma caixa fechada na qual são aplicadas lâmpadas de LED (*Light Emitting Diode*) para fornecimento da luminosidade necessária para o crescimento dos vegetais, pastilhas de peltier e ventiladores para o controle da temperatura interna e válvulas solenoides em conjunto com gotejadores para um sistema de irrigação por gotejamento. Para desenvolvimento deste protótipo serão integradas as áreas de eletrônica e computação.

## 1.2 Motivação

O planeta vem sofrendo o aumento da população e com as mudanças climáticas, a maioria desses problemas estão inter-relacionado com a agricultura, o meio ambiente, a sociedade e os recursos. Como todos estes problemas estão intimamente interligados, é necessário que uma mesma metodologia seja aplicada a todos. Ou seja, é necessário uma solução para produzir grandes quantidades de alimentos de alta qualidade, a fim de melhorar o bem estar da sociedade e melhorar a qualidade de vida da mesma. Esta solução deve consumir o mínimo de recursos e emitir o mínimo de poluentes.

DESPOMMIER (2010) propôs o conceito de fazendas verticais para solucionar estes problemas. Nestas haveria o controle de variáveis ambientais e economia de água e espaço. Desde então diversos pesquisadores abordaram o tema, sobre os mais variados ângulos: de estratégias avançadas de controle até o layout para maximização do espaço de cultivo. A maioria dessas pesquisas foi feita em estufas reais de grande porte, nos quais os custos da implantação de novas tecnologias e da manutenção durante testes são muito altos.

Nesse âmbito, o desenvolvimento de um protótipo em escala faz-se viável para condução de pesquisas relacionadas ao tema, pois através deste é possível avaliar a eficácia da aplicação de novas tecnologias e formas de atuar, com um custo muito inferior ao necessário para o sistema real.

## 1.3 Objetivos do Trabalho

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver e avaliar um sistema automatizado em escala para cultivo de hortaliças em um ambiente protegido. Este sistema deverá ser capaz de manter a demanda de irrigação, a temperatura do ambiente e a iluminação adequada para o cultivo. Os objetivos específicos são:

1. Analisar a influência de parâmetros ambientais no crescimento vegetal;
2. Avaliar métodos de atuação em variáveis ambientais;
3. Desenvolver estrutura para alocação dos vegetais, sensores e atuadores;
4. Desenvolver circuito de controle para os atuadores;
5. Desenvolver código de controle para os atuadores;
6. Avaliar eficácia do sistema desenvolvido no controle das variáveis ambientais;

## 1.4 Estado da Arte

Pelos motivos já definidos acima, os produtores e pesquisadores de diversas áreas tem voltado sua atenção para o que é chamado CEA (Controlled Environment Agriculture), ou seja, agricultura em ambiente controlado. Pesquisas sobre este tema tem tido um significativo impacto na comunidade científica, sendo que uma busca no repositório *IEEE Xplore* pelo tema, entre 2010 e 2017, retorna com mais de 1900 resultados, entre artigos, revistas e livros. Grande parte destes estudos são voltados para otimização e automação de casas de vegetação, nome dado as estruturas de proteção capazes de manter um micro clima local.

BOZCHALUI; CAÑIZARES; BHATTACHARYA (2015) abordou o tópico em um estudo sobre modelos matemáticos de otimização para casas de vegetação, visando utilizar redes elétricas inteligentes de forma a diminuir o consumo energético nesses ambientes, pois o controle de iluminação, produção de  $CO_2$  e o controle da temperatura do ambiente consomem uma grande quantidade de energia. O modelo proposto, que considerou dados meteorológicos, preço da eletricidade, e as necessidades do usuário final e restrições climáticas das estufas, se mostrou eficaz na redução do consumo.

RADOJEVIĆ *et al.* (2014) propôs uma abordagem de controle MIMO (*Multiple Inputs-Multiple Outputs*) para a temperatura e umidade do ar, além da concentração de dióxido de carbono no interior de uma casa de vegetação. A lei de controle sintetizada foi baseada em um modelo não linear do micro clima no interior da casa de vegetação. O controlador

proposto foi capaz de manter as variáveis dentro das especificações mesmo com a aplicação de distúrbios dinâmicos.

Já MAHDAVIAN; WATTANAPONGSAKORN (2014), concentrou seus esforços em uma estratégia para otimizar controladores PID (Proporcional - Integral - Derivativo) aplicados a sistemas de iluminação de casas de vegetação. Abordou-se uma estratégia de otimização multi objetivo, para maximizar os indicadores de performance dos controladores, minimizando o *overshoot* e o tempo de acomodação. Embora os controladores obtidos tenham características ótimas, MAHDAVIAN; WATTANAPONGSAKORN (2014) nota que o tempo computacional aumenta exponencialmente com o número de objetivos, e, uma abordagem com algoritmos multi-objetivo evolucionários poderá melhorar essa situação.

POCOCK (2016) avaliou o efeito da iluminação artificial no crescimento dos vegetais. Através de seu estudo verificou que a distribuição espectral da luz do LED influencia de forma agressiva na resposta fotossintética da planta, sendo que a iluminação com espectro na faixa de 500 a 700nm e alta amplitude tem melhor resposta.

ISHII *et al.* (2016) apresenta um estudo da aplicabilidade de agricultura em ambiente controlado em regiões semi-áridas. Como as regiões tem alta disponibilidade de luz solar durante o ano, o controle de outras variáveis e o fornecimento de água de maneira eficiente tornam estes locais propícios para o plantio. O controle da ventilação interna em um nível baixo auxiliou na manutenção da umidade do ar, e diminuiu o uso de água para o arrefecimento.

TSITSIMPELIS; WOLFENDEN; TAYLOR (2016) desenvolveu um protótipo de sistema de cultivo, que pode ser enquadrado como uma “fábrica da indústria agrícola”. Seu objetivo era a maximização da produção com a minimização do consumo energético. Desenvolveu-se um sistema de irrigação e iluminação otimizados para o projeto. Em relação ao controle climático foi abordado a aquisição de dados para estudo da distribuição de calor no interior do protótipo, visando futuras otimizações.

## 1.5 Organização do Documento

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O presente apresenta a definição do problema estudado, a motivação para realização do projeto, os objetivos do trabalho e a organização deste documento.

No segundo capítulo são abordados os principais conceitos teóricos para a realização deste trabalho.

No terceiro capítulo, nomeado de Materiais e métodos, são apresentados os componentes utilizados no desenvolvimento dos sistemas de irrigação, controle de temperatura e de luminosidade. Neste, também é detalhada a metodologia seguida para atuação sobre

as variáveis ambientais.

No quarto capítulo explana-se o projeto de cada sistema. Também é apresentado neste capítulo a fabricação de cada item dos sistemas de irrigação, controle de temperatura e de luminosidade, detalhando-se os meios e modos que foram utilizados para realizá-la.

O capítulo cinco aborda os testes realizados com o protótipo, e os resultados alcançados nestes. Para cada teste os resultados são discutidos.

No sexto capítulo apresentam-se as considerações finais e as perspectivas de trabalhos futuros.

## Revisão Bibliográfica

Nesse capítulo serão apresentados os conceitos sobre cultivo em ambiente protegido, automação agrícola e cultivo em ambiente controlado, temas que são relevantes para realização deste trabalho. A seguir serão apresentadas as variáveis ambientais que influenciam no processo de crescimentos dos vegetais, e como essa influência ocorre.

### 2.1 Cultivo em ambiente protegido

De acordo com PEREIRA (2006), casas de vegetação são estruturas que têm por finalidade proteger a área plantada, criando um ambiente adequado para o desenvolvimento dos vegetais. Os cultivos em casas de vegetação são amplamente adotados para mercados, relacionando o uso de alta tecnologia e produtos com altos valores aditivos, mantendo o crescimento da plantaçao pelo controle de qualidade e não sendo afetado pelo tempo, insetos ou doenças. (YANG; CHEN; KUO, 2013)

Historicamente os primeiros registros de cultivo em ambiente protegido provém do século I, na antiga roma, onde empregou-se diversos processos de proteção no cultivo de pepinos, de forma a suprir as vontades do imperador Tibérius César de se alimentar do vegetal durante todo o ano. (LARANJEIRA, 2005)

Precusores do cultivo protegido apareceram em regiões de clima frio, como na Inglaterra, Holanda, França, no Japão e na China, com estruturas quadradas ou retangulares de madeira ou bambu cobertas com placas e cúpulas de vidro, para produzir uma variedade de hortaliças e pequenas frutas fora de época.

No século XVII, na Alemanha, surgiu a estrutura primitiva que daria origem às atuais estufas, onde Salomans de Grans cultivava laranjeiras. Nos EUA, a primeira estufa data de 1.800. Gradativamente o uso de cultivo em ambiente protegido migrou também para áreas de clima tropical e por fim chegou a regiões desérticas.

No Brasil, as primeiras culturas em ambiente protegido foram construídas no Instituto de Pesquisa Agropecuária (IAC), em 1889. Mesmo o Brasil sendo uma das maiores potên-

cias agrícolas do mundo, vários produtores ainda desconhecem a técnica de plasticultura, sendo a área de plantio com essa técnica irrisória.

A utilização de estufas como meio de produção agrícola, possibilita obter uma série de vantagens em relação ao meio de produção em campo aberto, pois, em um ambiente fechado, pode-se chegar o mais próximo possível da situação climática ideal que as plantas necessitam para se desenvolver. Assim sendo, pode-se melhorar a sua qualidade, além de diminuir o seu tempo de desenvolvimento e o uso de insumos de produção (REIS; MAKISHIMA, 2001)

## 2.2 Automação agrícola

Segundo Silva et al. (2007), o uso da automação visa monitorar e controlar o funcionamento de um sistema físico de forma segura, rápida e automática, garantindo alta repetibilidade e reprodutibilidade da tarefa.

A automação em ambientes agrícolas vem ganhando espaço e tem gerado grandes avanços no controle de ambientes fechados, pois permite rapidez e confiabilidade na aquisição dos dados, contribuindo para a tomada rápida de decisão (JANSEN *et al.*, 2010).

De acordo com DE QUEIROZ; BOTREL; FRIZZONE (2008), a automação da irrigação tornou-se uma ferramenta fundamental no desenvolvimento de sistemas mais eficientes no uso de água, um dos maiores desafios deste século para a engenharia agrícola, devido a diminuição constante da disponibilidade deste recurso, que é essencial para qualquer cultura.

SUPREM; MAHALIK; KIM (2013) ressalta em seu trabalho que agricultores têm procurado levar máquinas inteligentes para suas culturas de forma a facilitar o trabalho manual, reduzindo custos com mão de obra, dando velocidade ao processo das atividades agrícolas.

Considerando-se a área ocupada pela agricultura, há poucos serviços automatizados, porém este segmento vem ganhando força e em poucos anos espera-se que a maioria dos processos serão realizados sem intervenção humana, gerando mais segurança e qualidade. Aplicações em menor escala já está sendo adotada em várias atividades no Brasil. Exemplos são a eletrônica embarcada em máquinas, a agricultura de precisão, o controle de ambientes, a robótica e o processamento pós-colheita.

A tecnologia disponível é predominantemente importada, sendo necessário um maior esforço nacional para desenvolver tecnologia própria, principalmente sendo o Brasil um dos maiores produtores agrícolas do planeta.

## 2.3 Cultivo em ambiente controlado

Embora o cultivo em ambiente protegido auxilie na manutenção das condições ideais de cultivo, quando se deseja obter um maior controle do desenvolvimento da cultura é preciso atuar sobre as variáveis que a influenciam. Segundo RADOJEVIĆ *et al.* (2014), para que as plantas atinjam um crescimento ótimo, com máximo rendimento, o microclima no interior da casa de vegetação deve ser monitorado por um sistema mecatrônico avançado.

A utilização de automação agrícola nos ambientes protegidos leva a um novo tipo de atividade, o cultivo em ambiente controlado. De acordo com JENSEN (2001) a agricultura em ambiente controlado pode ser definido como uma modificação do ambiente natural para atingir um crescimento ótimo dos vegetais.

A aplicação de controles automatizados em casas de vegetação pode proporcionar vantagens para o desenvolvimento da produção nos seguintes aspectos: melhor controle dos processos, tornando-os mais seguros; redução de mão de obra, pois haverá menos tarefas sendo realizadas pelo operadores, diminuindo o fluxo de trabalho; otimização no consumo de energia elétrica e melhoria na qualidade do produto. (DOMINGUES *et al.*, 2012)

A automação dos ambientes protegidos pode ser feita em diversos níveis, havendo a necessidade do controle de parâmetros como: intensidade luminosa, temperatura do ambiente, temperatura dos aditivos químicos, condutividade elétrica, irrigação das plantas, pH do solo, etc. Através dessas ações obtêm-se as seguintes vantagens:

- Produção durante todo o ano, não ocorrendo entre safra.
- Redução do uso de pesticidas, herbicidas e fertilizantes;
- Uso mais eficiente de recursos hídricos;
- Aumento da produção dos vegetais;
- Aumento da segurança do fornecimento de alimentos.

As diversas vantagens deste sistema produtivo são eclipsadas por alguns problemas graves. O principal destes é o alto investimento inicial necessário para produção em larga escala, o qual é centenas de vezes superior ao necessário para uma cultura tradicional. Outra grave limitação é o fornecimento de energia para os atuadores do ambiente, pois sistemas de iluminação, aquecimento e resfriamento consomem grandes quantidades de energia elétrica.

## 2.4 Fatores de controle

Existem diversas variáveis que podem ser monitoradas e utilizadas no controle de casas de vegetação. Na prática, porém, costuma-se considerar apenas as que influem diretamente no desenvolvimento da planta. Para a INFOAGRO (2002), estas variáveis são a temperatura, a umidade relativa, a radiação luminosa e a concentração de  $CO_2$ .

Segundo YANG; CHEN; KUO (2013), as três grandezas físicas mais importantes a se controlar no ambiente interno de uma casa de vegetação são temperatura, umidade relativa do ar e luminosidade. Já RADOJEVIĆ *et al.* (2014) indica que um sistema de controle para casas de vegetação deve monitorar :

**Dentro da cada de vegetação:** temperatura do solo e do ar, umidade relativa do ar, concentração de  $CO_2$ , condutividade elétrica e umidade do solo;

**Fora da casa de vegetação:** temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento, direção do vento e índice pluviométrico;

**Equipamentos** temperatura das tubulações, estado dos respiradouros, posição das cortinas (sombrite, etc).

Já a NGMA (2010) indica que os parâmetros e processos que devem ser controlados no cultivo em ambiente protegido são: a temperatura, a ventilação, a umidade relativa do ar, a iluminação, a concentração de  $CO_2$ , a carga térmica interna, a irrigação, os tratamentos químicos, a aplicação de nutrientes e o abastecimento de água.

De acordo com TERUEL (2010), as variáveis que devem ser controladas para garantir a qualidade da produção podem ser vistas na 2.1.

Tabela 2.1: Variáveis a mensurar e fenômenos relacionados

Variável	Fenômeno
Temperatura do ar interno	Funções metabólicas das plantas
Temperatura do ar externo	Transferência de calor por condução e convecção
Umidade relativa do ar interno	Transpiração e mecanismos de controle térmico
Umidade relativa do ar externo	umidade interna através de ventilação
Radiação solar externa	Processos de fotossíntese; Aumento da carga térmica
Velocidade do ar	Diferença de potencial de água - ar - Folha
Iluminação interna	Processos de fotossíntese, crescimento vegetal
Concentração de $CO_2$	Crescimento das plantas; desenvolvimento do sistema radicular e absorção de nutrientes
Umidade do solo	Crescimento das plantas; desenvolvimento do sistema radicular e absorção de nutrientes

Fonte: Adaptado de TERUEL (2010)

### 2.4.1 Temperatura

Segundo FONTES (1999), a temperatura influi no desenvolvimento vegetativo, no florescimento, na frutificação, na formação das partes tuberosas ou bulbosas, que são as estruturas das raízes responsáveis por formar reservas de energia, bem como na produção de sementes.

Cada cultura possui uma determinada faixa de temperatura favorável para seu desenvolvimento. Este é um fator de controle que pode ser utilizado tanto para acelerar quanto para retardar o desenvolvimento das plantações. Fora da faixa suportável pela planta, ocorre a perda de viveza e a conseqüente morte dos vegetais. Do ponto de vista da temperatura, há dois parâmetros de principal interesse:

**Temperaturas máximas e mínimas biológicas:** São os valores limites para uma determinada fase do desenvolvimento das hortaliças;

**Temperaturas diurnas e noturnas:** Níveis de temperatura recomendados durante o dia para o correto desenvolvimento dos vegetais.

Segundo HANAN (1998), a faixa de temperatura para a maioria das culturas é relativamente estreita, variando entre 10 e 30 °C. Em relação as temperaturas diurnas e noturnas. HANAN (1998) apresenta a medida “DIF” (Diferença entre a temperatura diurna e noturna), sendo que o DIF positivo, quando a temperatura diurna é maior que a noturna, propicia um crescimento do caule, folhas verdes e mais saudáveis. Já um DIF negativo diminui o alongamento do caule, promovendo o amarelamento e queda das folhas.

Em casas de vegetação industriais, o controle de parâmetros como ventilação e iluminação pode servir como artifícios para o controle de temperatura. Além das técnicas indiretas para o controle desta variável, pode-se atuar diretamente através de resistências elétricas para aumento da temperatura e de sistemas de ar condicionado para o arrefecimento.

### 2.4.2 Umidade do ar

A umidade relativa do ar está intimamente relacionada com o processo de transpiração dos vegetais. Quando ela está elevada, os vegetais reduzem a transpiração, o que acarreta em um crescimento diminuto. Uma alta umidade também pode causar abortos florais e aumento das doenças fúngicas.

Em contrapartida uma umidade relativa baixa faz com que a transpiração das plantas aumente, podendo ocorrer desidratação, o que também causa diminuição do crescimento e, dependendo dos níveis dessa desidratação, pode causar a morte.

Em estufas de grande porte, o controle dessa variável normalmente é realizado por dois meios: A utilização de ventiladores, que realizam a troca do ar, e a utilização de filtros secadores, que condensam a água retida ao passar por eles.

### 2.4.3 Radiação Luminosa

A fotossíntese significa “síntese com o uso de luz”, ou seja, este é um processo que transforma a energia luminosa em energia elétrica, e converte-a, através da fixação do carbono, em energia química. A síntese de compostos de carbono transforma-se em açúcar de reserva ou é utilizado como constituinte da parede celular. (TAIZ; ZEIGER, 2004)

Em termos de luz utilizada para fotossíntese, TAIZ; ZEIGER (2004) cita que há três parâmetros que devem ser levados em consideração: A qualidade do espectro luminoso, a intensidade de luz e a duração.

A qualidade do espectro é um dos fatores de importância pois nem toda luz emitida é absorvida pela planta. Nos vegetais a clorofila é a substância responsável pela absorção da luz. Esta parece verde, pois absorve luz principalmente nas porções vermelha e azul dos espectros, de forma que as porções verdes são refletidas para o olho humano em maior intensidade.

O espectro de luz utilizado especificamente para a fotossíntese é a faixa que varia de 400 a 700  $\eta m$ , em que se encontra a região das luzes azuis e vermelhas. Essa faixa do espectro é conhecida como radiação fotossinteticamente ativa (RFA, do inglês PAR - *Photosynthetically active radiation*). A Figura 2.1 apresenta um gráfico da distribuição ideal do espectro de luz absorvido por plantas.

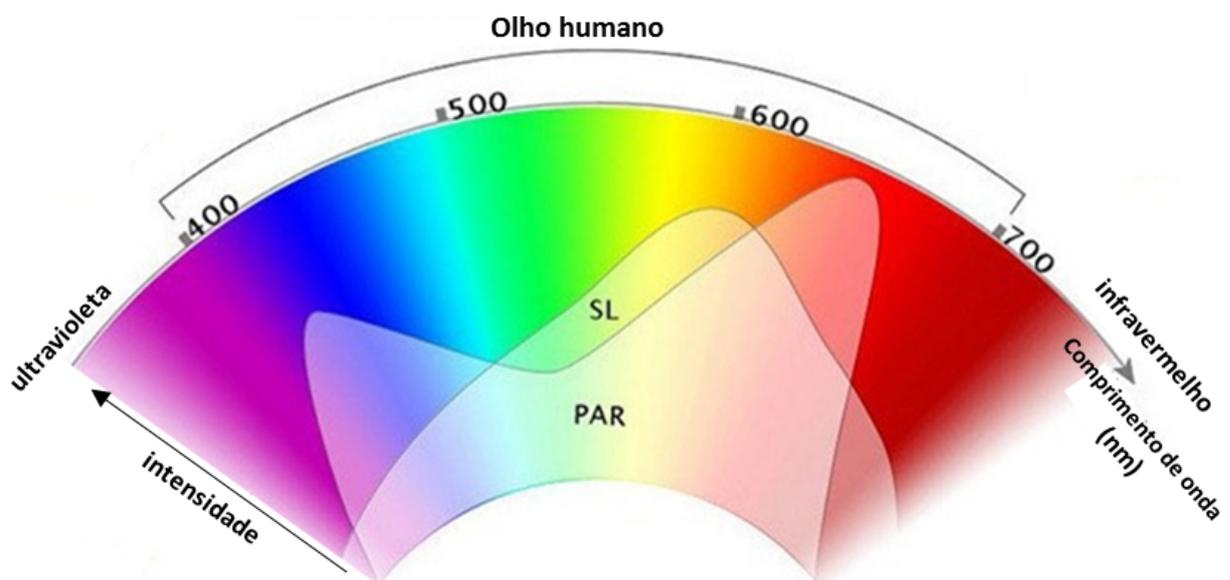


Figura 2.1: Gráfico do espectro de radiação fotossinteticamente ativa

Fonte: Adaptado de Grower Cannabis

A intensidade da luz, também chamada de quantidade de luz, é a quantidade total disponibilizada para os vegetais. Quanto maior a quantidade de luz disponível, mais energia a planta pode gerar através da fotossíntese.

A duração da iluminação, também conhecida como fotoperíodo, é a quantidade de horas por dia que o vegetal recebe luz. O fotoperíodo controla a floração em muitas espécies de plantas, porém de acordo com MATTSON; ERWIN (2005) é o período sem luz que é importante. Esta variável depende da espécie do vegetal pois, algumas plantas tem melhor crescimento com iluminação durante longos períodos, enquanto outras podem ter seu crescimento reduzido nestas mesmas condições.

A maneira mais usual de se atuar sobre a iluminação é o fornecimento de luz suplementar a solar. Esta iluminação é feita de forma artificial, por meio de lâmpadas próprias, que emitem luz em um espectro mais próximo da solar.

#### 2.4.4 Água e nutrientes

A umidade do solo é a relação, expressa na forma percentual, entre o peso da água contida num certo volume de solo e o peso da parte sólida existente neste mesmo volume. Esta pode ser expressa pela Equação 2.1:

$$h\% = \frac{P_a}{P_s} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Em que  $h\%$  é a umidade do solo apresentada na forma percentual,  $P_a$  é o peso da água e  $P_s$  é o peso das partículas sólidas.

Em relação a este fator as plantas podem sofrer de dois males: o excesso e a falta. O excesso não compromete o crescimento da cultura, podendo auxiliar, porém prejudica a estrutura do solo, torna os vegetais mais frágeis, mais sensíveis à luz solar e causa danos a estrutura radicular. A falta desse insumo ocasiona diminuição da fotossíntese e crescimento, deixa as folhas e caules menores. (HANAN, 1998)

A utilização de um sistema de irrigação tem como principais motivações a melhoria considerável na produtividade, a diminuição de desperdícios e a redução da mão de obra necessária. Um bom método de irrigação garante água as plantas no momento certo na quantidade suficiente, assegurando um boa produção. As principais tecnologias de irrigação são:

**Superfície:** No método de irrigação por superfície, a distribuição da água se dá por gravidade, através da superfície do solo. Geralmente apresenta o menor custo fixo e operacional. Há um maior desperdício de água em relação a outros métodos pois grande parte do recurso não é absorvido pelos vegetais;

**Aspersão:** No método da aspersão, jatos de água aplicados no ar caem sobre a cultura na forma de chuva. É um método facilmente adaptável às diversas condições de solo, culturas e topografia além de possuir maior eficiência potencial. Maior custo de instalação e operação;

**Localizada:** No método da irrigação localizada, a água é, em geral, aplicada em apenas uma fração do sistema radicular das plantas, empregando-se emissores pontuais (gotejadores), lineares (tubo poroso ou “tripa”) ou superficiais (microaspersores). A proporção da área molhada varia de 20 a 80% da área total, o que pode resultar em economia de água;

**Subirrigação:** A subirrigação garante que o lençol freático seja mantido a uma profundidade tal que seja capaz de permitir um fluxo de água adequado à zona radicular da cultura. É o método de menor custo, porém depende muito de fatores naturais não tão facilmente encontrados, como a existência de lençol freático para a manutenção do nível da água.

### 2.4.5 Concentração de $CO_2$

O carbono é um nutriente essencial dos vegetais, sendo o de maior concentração na planta. Este é absorvido pela planta através da síntese do  $CO_2$  pelo processo de fotossíntese.

Devido a sua função como substrato primário na fotossíntese, a quantidade de  $CO_2$  disponível para as plantas tem efeito na taxa fotossintética, que aumenta quando a concentração desse gás é maior. De acordo com TAIZ; ZEIGER (2004) a taxa fotossintética da maioria dos espécimes vegetais aumenta entre 30 a 60% em ambientes que tem concentração de  $CO_2$  entre 600 e 700 ppm, em relação ao mesmo vegetal em ambiente com concentração na faixa de 370ppm.

Embora uma maior quantidade desse composto seja benéfica para o vegetal, um volume muito alto atrapalha no desenvolvimento. A Figura 2.2 mostra um gráfico do crescimento de uma planta baseado nos níveis de  $CO_2$ .

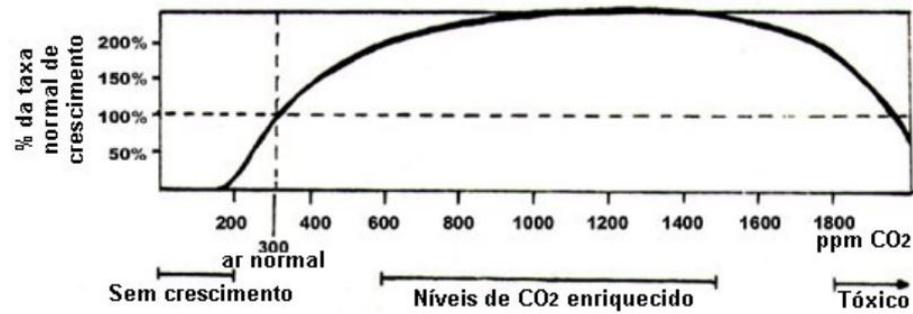


Figura 2.2: Curva de crescimento vegetal em função da concentração de  $CO_2$

Fonte: TAIZ; ZEIGER (2004)

Devido a sua importância, uma boa estratégia de enriquecimento de  $CO_2$  no ar é interessante em cultivos em ambiente controlado. A forma usual de se atuar é a mensuração da quantidade do gás por um sensor, e o acréscimo deste através de tanques de  $CO_2$  com válvulas de controle. Para que a quantidade não ultrapasse os limites ideais utiliza-se a troca de ar através de ventiladores.

## Materiais e métodos

Com a identificação das variáveis ambientais que interferem no processo de crescimento dos vegetais e a importância destas no processo, foi necessária a tomada de decisão sobre quais variáveis seriam monitoradas e sobre quais o sistema atuaria. KEENEY (1994) propõe uma mudança de paradigma saindo da tradicional tomada de decisão orientada a alternativas para a tomada de decisão baseada em valores. Segundo ele, identificar os valores mais importantes para a decisão permite maior controle, evitando tendências.

Foi desenvolvida uma matriz de decisão, na qual foram considerados diversos parâmetros. Para cada parâmetro, atribuiu-se um peso de acordo com seu grau de importância para o projeto. Os parâmetros considerados foram:

- Importância para o crescimento da planta;
- Importância para a sobrevivência da planta;
- Relação com outras variáveis;
- Dificuldade de monitoramento da variável;
- Dificuldade de atuação sobre a variável;
- Custo médio dos sensores.

Após desenvolvimento da matriz, que pode ser vista no Apêndice 6.2, decidiu-se por atuar sobre a iluminação interna, a umidade do solo e sobre a temperatura interna.

Os subcapítulos a seguir tratarão dos materiais a serem utilizados e a metodologia para controlar as variáveis definidas. Cada um dos sistemas de controle serão abordados separadamente.

## 3.1 Sistema de irrigação

Para manter a umidade do solo nos níveis adequados para o plantio de vegetais, fornecendo o insumo em quantidade suficiente para o crescimento ótimo e sem gerar maiores desperdícios, é necessário o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e atuação. Esta seção apresentará os componentes utilizados no sistema de monitoramento de umidade do solo e de atuação sobre a mesma.

### 3.1.1 Sensor de umidade do solo

Inicialmente definiu-se o tipo de sensor a ser utilizado para mensuração da umidade do solo. A determinação da quantidade de água pode ser realizado por métodos classificados como diretos ou indiretos. (BORIM; PINTO, 2015)

De acordo com SILVA; ANDRADE JÚNIOR; SOUZA (2008), a diferença entre os métodos indiretos e diretos é a estimativa do teor de água no solo a partir de outras propriedades relacionadas a esta variável. Devido a possibilidade de determinação instantânea do teor de água, os métodos indiretos tornam-se mais adequados para indicar o início e a duração da irrigação.

Dados os motivos acima, definiu-se a utilização de mensuração indireta da umidade do solo. Avaliou-se então os sensores disponíveis. A maioria dos higrômetros comerciais são analógicos, o que não os inviabilizam para o projeto. Dentre as opções com saída digital o melhor custo benefício foi o sensor de umidade do solo *Grove*.

A condutividade elétrica do solo varia de acordo com a quantidade de água. Quando o solo está seco a condutividade elétrica é inferior a do que quando o mesmo está úmido. O sensor *grove*, que pode ser visto na Figura 3.1, consiste de 2 partes: Uma sonda, que é formada por duas hastes de material condutor, que entra em contato com o solo, e um módulo com um CI LM393, responsável pelo envio de dados ao microcontrolador. A saída deste sensor pode ser digital (0 caso o solo esteja seco e 1 caso ele esteja úmido) ou analógica (variação da tensão de 0 a 5V).

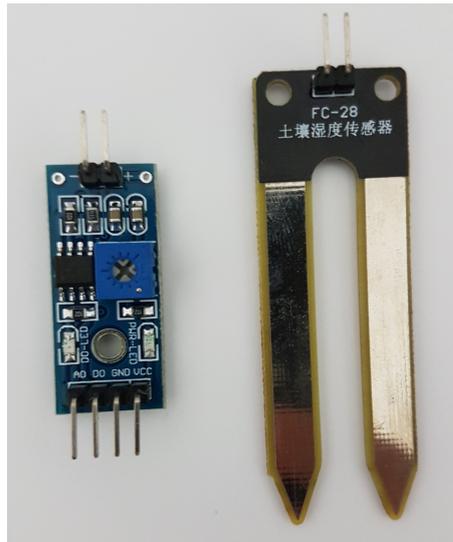


Figura 3.1: Sensor de umidade do solo

Este sensor é comercializado com uma pré-calibração realizada pelo fabricante, indicando qual saída do sensor para diferentes condições de umidade do solo. A Tabela 3.1 resume estes dados.

Tabela 3.1: Valores de saída apresentados pelo sensor

Condição	Min	Max
Solo seco	1023	500
solo úmido	500	100
Sensor em água	100	0

Fonte: FILIPEFLOP (2017)

Considerando-se a ordem dos pinos vista na Figura 3.1, da esquerda para a direita, a conexão do sensor é feita da seguinte forma:

- 1º Pino** - VCC, que deve ser ligado a entrada de 3,3 ou 5V do microcontrolador;
- 2º Pino** - GND, que deve ser ligado ao terra do microcontrolador;
- 3º Pino** - Pino de saída digital, que deve ser ligado a uma porta digital microcontrolador;
- 4º Pino** - Pino de saída analógica, que deve ser ligado a uma porta analógica do microcontrolador.

As especificações técnicas do sensor adquirido podem ser vistas abaixo na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Especificação técnica sensor de umidade do solo

Especificações Técnicas	
Tensão de operação	3,3 - 5V
Corrente	35mA
circuito comparador	LM393
Dimensões PCB (A x L x C)	30 x 15 x 1mm
Dimensões sonda (A x L x C)	60 x 20 x 1mm

Fonte: FILIPEFLOP (2017)

### 3.1.2 Válvulas solenoides

Um solenoide é uma bobina de fio em formato espiral enrolada em torno de um pistão, normalmente de ferro. Quando ocorre passagem de corrente elétrica pelo fio, é gerado então um campo magnético, que faz o pistão deslocar-se para frente ou para trás, dependendo do sentido da corrente.

A válvula solenoide funciona como uma chave ativada eletricamente, na qual quando uma corrente é enviada para a bobina ocorre o deslocamento do pistão, que permite ou não a passagem de fluido pelo circuito hidráulico. Ela é constituída por duas partes principais, o tubo que permite a passagem do fluido e a parte de ativação, composta pela bobina solenoide.

É possível encontrar válvulas com dois tipos de construção, normalmente fechada ou normalmente aberta. A válvula normalmente fechada (NF) abre quando se aplica corrente na bobina, a normalmente aberta (NA) fecha quando a corrente é aplicada. Os termos normalmente aberto ou normalmente fechado se referem à posição antes da aplicação da corrente.

Neste projeto, optou-se pela utilização de válvulas normalmente fechadas. Tal escolha foi feita pois a irrigação dura um período de tempo curto, logo o gasto energético é menor com esta configuração. Optou-se por uma válvula de 127V CA, pois o custo desta é inferior aos do tipo CC. A Figura 3.2 mostra o componente adquirido.



Figura 3.2: Válvula solenóide

Seu corpo é feito de termoplástico, com um filtro plástico removível no tubo de passagem de fluido. As partes metálicas são de aço zincado e os terminais para contato elétrico são de latão. As especificações técnicas podem ser vistas abaixo na Tabela 3.3

Tabela 3.3: Especificação técnica válvula solenoide 127V

<b>Especificações Técnicas</b>	
Pressão de trabalho	2 a 80 m.c.a
Vazão	0 a 2400 litros/hora
Diâmetro de entrada	25mm
Diâmetro de saída	12,7mm
Tensão de funcionamento	127V CA

Fonte: FILIPEFLOP (2017)

### 3.1.3 Gotejadores

Para implementação de um sistema de irrigação econômico no consumo de água, optou-se pela utilização do método de irrigação localizada, empregando-se emissores pontuais, conhecidos como gotejadores.

Escolheu-se utilizar neste trabalho gotejadores ajustáveis, pois seu custo de aquisição é baixo e, através da regulagem, pode-se obter um ponto ótimo para a vazão de água para plantas de diferentes tamanhos e espécies.

Adquiriu-se então o gotejador Agrojet GA-2, que pode ser visto abaixo na Figura 3.3, que é manualmente regulável. Este é feito de polipropilenos, um material inerte capaz de resistir a fertilizantes e outros tipos de produtos químicos agrícolas que podem estar veiculados pela água.



Figura 3.3: Gotejador Agrojet GA-2

Na Tabela 3.4 pode-se ver as especificações técnicas desse gotejador.

Tabela 3.4: Especificações técnicas Agrojet GA-2

<b>Especificações Técnicas</b>	
Pressão de trabalho	6 a 50 m.c.a
Vazão	0 a 25 litros/hora
Espaçamento mínimo indicado	50mm

Fonte: Adaptado de AGROJET (2017)

### 3.1.4 Funcionamento do sistema de irrigação

Algumas considerações foram feitas para definição dos parâmetros de funcionamento deste sistema. Verificou-se que a irrigação não deve ser realizada a qualquer momento do dia pois no período diurno, em que a temperatura média é mais alta, a água é utilizada tanto para a absorção pelos vegetais quanto para o controle da temperatura. No período noturno a média de temperatura é mais amena e a umidade no ambiente se mantém mais alta devido a evaporação durante o dia. Dessa maneira a oferta artificial de água no período diurno traz mais vantagens ao sistema.

Avaliou-se também a necessidade de irrigação em relação a umidade do solo. Quando este está úmido não há necessidade do fornecimento, mesmo que tenha se passado um período de tempo longo sem irrigação, pois as plantas podem retirar do solo a água necessária. Uma importante consideração realizada foi o tempo de absorção de água pelo solo, já que durante a irrigação do solo nem toda água é prontamente absorvida e espalhada pelo substrato. Devido a esta característica, manter a irrigação enquanto o sensor de umidade indica que o solo está seco pode encharcar o solo.

Foi necessário então a definição de um tempo mínimo entre irrigações, de forma que a água tenha tempo de penetrar pelo solo e alterar a condição do sensor. Definiu-se então

três níveis de atuação quando o solo for indicado como seco, e um período de espera, no qual nenhuma atuação é realizada pelo sistema, estes podem ser vistos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Condições de atuação

Condição	Tempo de ação	Tempo de espera
Solo seco - Sem irrigação no dia	1 minuto	5 minutos
Solo seco - Com irrigação no dia	30 segundos	5 minutos
Solo pouco úmido - Sem irrigação no dia	30 segundos	5 minutos

A condição de irrigar o solo quando ele estiver pouco úmido, em um dia que ainda não foi realizada esta ação, garante que o solo não ficará seco durante um período noturno caso a leitura do sensor esteja perto do limite de ser considerado seco. A diferença do tempo de acionamento dos solenoides em relação ao dia da ultima irrigação se relaciona com o tempo de absorção de água pelo solo, liberando uma quantidade menor do liquido e dando um maior tempo para absorção e consequente mudança da leitura do sensor. A Figura 3.4 apresenta o fluxograma de funcionamento do sistema.

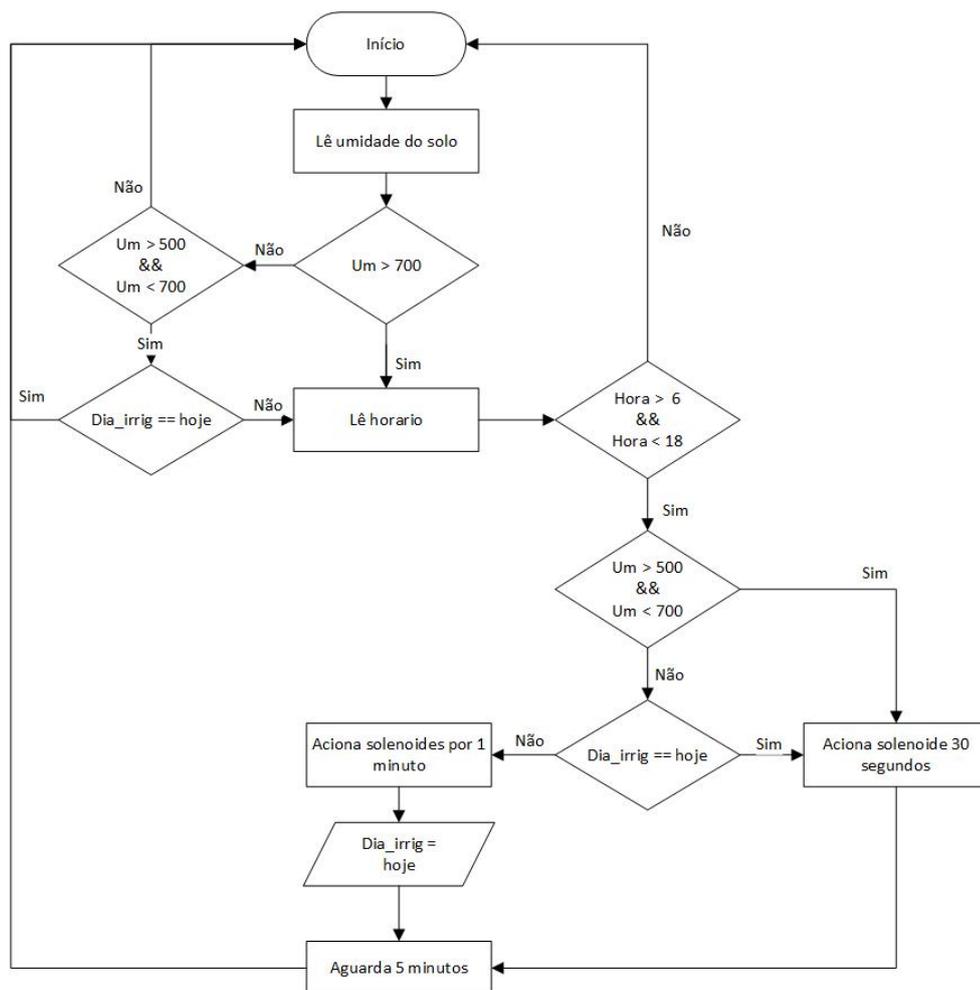


Figura 3.4: Fluxograma do sistema de irrigação

## 3.2 Sistema de controle de temperatura

O monitoramento e atuação sobre a temperatura do ambiente se mostra essencial, devido a importância dessa variável nas funções metabólicas dos vegetais. Esta seção apresentará os componentes utilizados no sistema de atuação e monitoramento da temperatura do ambiente, assim como a metodologia de atuação sobre a mesma.

### 3.2.1 Sensor de temperatura

Para aferição da temperatura do ambiente, decidiu-se pela utilização de um sensor que pudesse ser utilizado de maneira simples, e que oferecesse um bom custo benefício. O sensor escolhido foi o DHT 22, pois este realiza mensuração da temperatura e umidade do ar. Pode-se ver o mesmo na Figura 3.5.

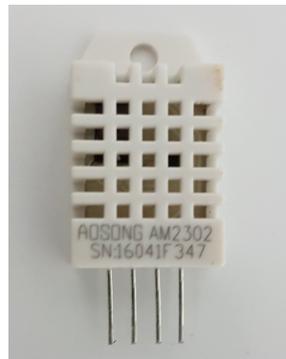


Figura 3.5: Sensor de temperatura e umidade do ar DHT 22

Considerando-se a ordem dos pinos vista na Figura 3.5, da esquerda para a direita, a conexão do sensor é feita da seguinte forma:

- 1º Pino** - VCC, que deve ser ligado a entrada de 5V do microcontrolador;
- 2º Pino** - Pino de dados, que deve ser ligado a uma porta digital microcontrolador;
- 3º Pino** - Função estrutural;
- 4º Pino** - GND, que deve ser ligado ao terra do microcontrolador.

O sensor realiza leitura de temperaturas através de um termistor de alta precisão, que diminui sua resistência com o aumento da temperatura. A umidade é lida através de um sensor do tipo capacitivo. Ambos estão conectados a um microcontrolador de alta performance de 8 bits. A Tabela 3.6 apresenta as especificações técnicas do sensor.

Tabela 3.6: Especificações técnicas sensor DHT 22

Especificações Técnicas	
Variável	valor
Tensão de funcionamento	3,3 - 5V
Corrente máxima	2,5mA
Faixa de medição de temperatura	-40 a 80°C
Resolução da medição de temperatura	0,1°C
Exatidão da medição de temperatura	± 0,5°C
Faixa de medição de umidade ar	0 a 100% UR
Resolução de medição de umidade ar	0,1% UR
Exatidão da medição de umidade do ar	±2,0% UR
Tempo de resposta	2s
Dimensões (A x L x C)	25 x 15 x 7mm

Fonte: Adaptado de FILIPEFLOP (2017)

A utilização deste componente é simples, já existindo uma biblioteca dedicada aos sensores DHT. Esta converte os dados de temperatura em graus célsius e, a umidade do ar em porcentagem.

### 3.2.2 Pastilha de Peltier

De acordo com OLIVEIRA (2014), pastilhas termoelétricas são aquelas que são capazes de converter energia elétrica em um gradiente de temperatura (efeito peltier), e também conseguem realizar a conversão de um gradiente de temperatura em energia elétrica (efeito Seebeck). Quando uma corrente contínua é aplicada em pastilhas de peltier, um dos lados desta sofre redução de temperatura, enquanto o lado oposto tem um aumento de temperatura.

As pastilhas de peltier são extremamente leves, possuem controle de temperatura preciso, são silenciosas e ocupam pouco espaço. Além disso devido a propriedades físico-químicas das pastilhas, ao se inverter polaridade da corrente enviada, há também a inversão do lado quente e do lado frio.

Dada estas características, o uso de pastilhas de peltier torna-se a opção mais interessante, já que se pode usar o mesmo atuador para esquentar e esfriar o ambiente.

Adquiriu-se as pastilhas termoelétricas do tipo TEC (*Thermoelectric cooler*) modelo 12706, cuja potência máxima é de 63W. Este modelo possui um total de 127 pares termoelétricos, que são as estruturas de telureto de bismuto que funcionam como junção P e N, em uma dimensão total de 40mm de largura por 40mm comprimento, tendo 3,3mm de espessura. A Figura 3.6 mostra o componente adquirido.



Figura 3.6: Pastilha de Peltier

Na tabela 3.7 pode-se ver as especificações da pastilha de peltier adquirida.

Tabela 3.7: Especificação técnica TEC - 12706

Especificações Técnicas		
Temperatura lado quente	25 °C	50°C
Q <sub>max</sub>	50W	57W
ΔT máximo	66°C	75°C
Corrente máxima	6,4A	6,4A
Tensão máxima	14,4V	16,4V
Resistência interna	1,98Ω	2,30Ω

Fonte: FILIPEFLOP (2017)

Os principais dificuldades encontradas para desenvolvimento de sistemas de controle de temperatura que utilizam pastilhas de peltier são:

- Desenvolvimento de circuitos de acionamento que possibilitem a passagem de correntes de alta magnitude;
- Desenvolvimento de sistemas de controle e reversão do sentido da corrente;
- Dissipação de calor de ambas faces.
- Isolamento térmico entre as faces da pastilha;

Para realizar a dissipação de calor da face externa, a que não irá ser utilizada para controle da temperatura do ambiente de cultivo, adquiriu-se um dissipador de bebedouro. Este é feito em alumínio com dimensões de 113 x 160 x 29mm (L x A x C), contém 15 aletas triangulares rugosas, em que a base tem 3mm e as pontas 1mm, o espaçamento entre aletas é de 4mm. Adquiriu-se também 2 *coolers* de computador de dimensão 70 x 70 x 12mm (L x A x C) para realizar convecção forçada nas aletas do dissipador, melhorando a eficiência do trocador de calor.

Na face interna, utilizada para controle da temperatura do ambiente de cultivo, acoplou-se um dissipador de calor para processadores de computador. Este é feito de alumínio e tem como dimensões 79 x 125 x 35mm (L x A x C). Possui 39 aletas com 1mm de espessura e, em sua base, há tubos de cobre que melhoram a distribuição de calor ao longo do dissipador, tornando-o mais eficiente.

A fixação da pastilha de peltier no dissipador foi realizada por meio de pasta adesiva térmica. Esta pasta é um composto de óxido de alumínio e silicone que é isolante elétrico e que tem condutividade térmica de aproximadamente  $0,671 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

O isolamento entre faces é importante pois, conforme a temperatura do “lado quente” aumenta, ocorre troca de calor entre as duas faces por condução, convecção e irradiação, prejudicando a eficiência do sistema. Dessa forma é necessário um bloqueio externo capaz de reduzir estas trocas de calor.

Utilizou-se uma placa de poliestireno expandido, popularmente conhecido como isopor, para isolar as faces da pastilha. Este material foi escolhido pois tem baixa condutibilidade térmica (cerca de  $0,033 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ), baixa absorção de umidade e baixa densidade.

### 3.2.3 Ventiladores

Para realizar circulação do ar no interior do ambiente e melhorar a troca de calor, adquiriu-se *coolers* de gabinetes de computador. Estes serão utilizados em 3 posições:

**Ventilador:** Impulsiona o ar do ambiente externo para dentro do ambiente de cultivo;

**Exaustor:** Expele o ar de dentro da estrutura de cultivo para fora;

**Ventilador térmico:** Impulsiona o ar do trocador de calor da pastilha de peltier para dentro da estrutura.

Adquiriu-se então 3 ventiladores de 80 x 80mm da Dong Guan Zhan Yu, como pode ser visto na Figura 3.7.

Figura 3.7: *Coolers* de 80 x 80mm

A especificação técnica dos ventiladores adquiridos pode ser vista na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Especificação técnica ventilador

Especificação Técnica	
Variável	valor
Tensão	12V CC
Corrente	0,13A
velocidade de rotação	2500 RPM
Fluxo de ar	26 CFM
Ruído	28 dB
Dimensões (A x L x C)	80 x 80 x 25mm

Fonte: Adaptado de FILIPEFLOP (2017)

### 3.2.4 Funcionamento do sistema de controle de temperatura

Para manter a temperatura do ambiente dentro das especificações de cada espécie algumas considerações foram feitas. Definiu-se que a faixa ideal de temperatura como sendo de 23 a 27 °C, sendo o valor ótimo de 25°C. Dessa forma os atuadores irão ser acionados para manter a temperatura dentro dessa faixa.

Para proteção do sistema de atuação foi necessária a definição de um sistema de histerese, pois sempre que a temperatura atinge o limite superior ou inferior os atuadores são acionados, mesmo quando a variação de temperatura está dentro da resolução do sensor. Por exemplo, caso a temperatura atinja o valor de 27°C, o sistema de refrigeração será acionado e, com 26,9°C ele será desativado. Como a diferença é muito pequena os atuadores serão acionados com muita frequencial, diminuindo a vida útil.

Para evitar este problema configurou-se histerese no controlador. Quando a temperatura atinge um valor igual ou menor que 23°C o sistema de aquecimento é ligado, e

somente é desligado ao atingir o valor de 25°C. Caso a temperatura atinja um valor maior ou igual a 27°C o sistema de arrefecimento é ligado e, só é desativado ao atingir 25°C.

Como forma de manter a temperatura dentro da faixa desejada sem atuação constante da pastilha de peltier, definiu-se que entre 25 e 27°C serão acionados os *coolers* de forma a melhorar a circulação de ar. Através desta prática há redução do consumo energético, pois o consumo dos *coolers* é de 0,012KWh enquanto que o do peltier é de 2,5KWh.

A Figura 3.8 apresenta o fluxograma de atuação do sistema de controle de temperatura.

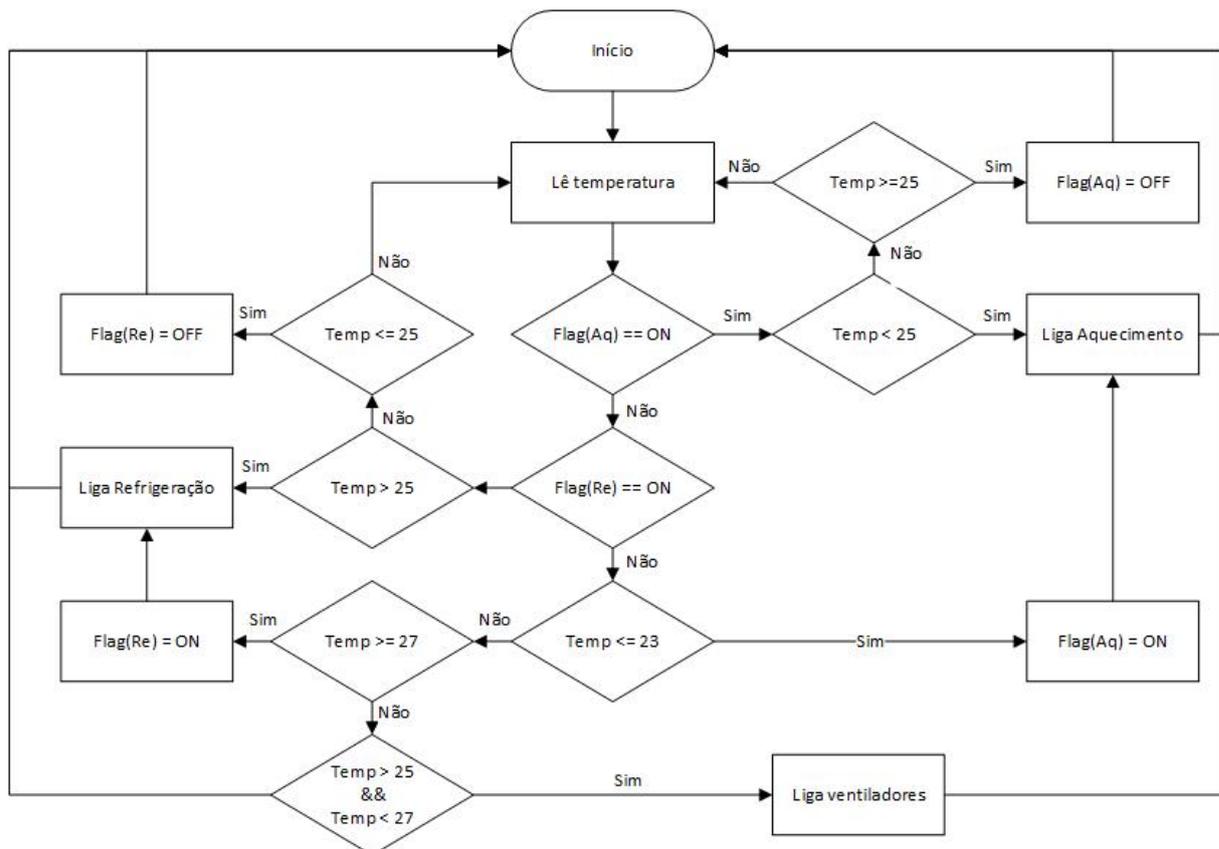


Figura 3.8: Fluxograma do sistema de controle de temperatura

Como tanto o arrefecimento, quanto o aquecimento, serão realizados por meio da pastilha de peltier, é necessário que ocorra a inversão do sentido da corrente quando se desejar a mudança no tipo de atuação. Para realizar tal inversão desenvolveu-se uma ponte H.

Uma ponte H é um circuito de eletrônica de potencia tipo chopper de classe E (converte uma fonte CC fixa em uma de tensão de CC variável abrindo e fechando diversas vezes), portanto, pode determinar o sentido da corrente, a polaridade da tensão e a tensão em um dado sistema ou componente. A Figura 3.9 demonstra o funcionamento do circuito.

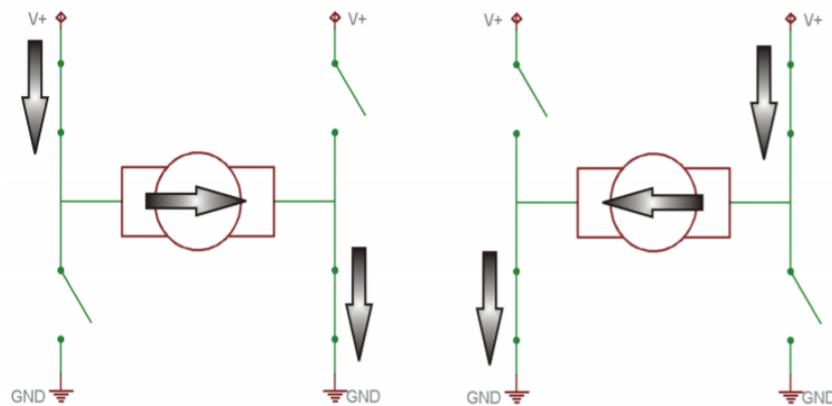


Figura 3.9: Esquema de funcionamento de uma ponte H

Na imagem acima pode-se observar que através da escolha de quais chaves se mantém abertas e quais se mantém fechadas pode-se definir qual o sentido da corrente, e no caso da pastilha de peltier, conseqüentemente qual lado irá esquentar e qual lado irá resfriar.

### 3.3 Sistema de Iluminação

O sistema de iluminação tem como funções manter a iluminação em uma intensidade adequada por um período de tempo pré determinado. O funcionamento deste sistema é de suma importância para a cultura em ambiente protegido, pois a luz é o fator fundamental para a fotossíntese. Esta seção apresentará os componentes utilizados no sistema de iluminação assim como a metodologia de atuação sobre a mesma.

#### 3.3.1 Relógio de tempo real

Para mensuração do fotoperíodo foi necessária a aquisição de um circuito capaz de medir de maneira precisa variações de tempo. Um relógio de tempo real, ou RTC (*Real Time Clock*), é um relógio utilizado em equipamentos eletrônicos que mantém controle do tempo presente.

Este tipo de dispositivo tem como principais características um baixo consumo de energia, a capacidade de liberação do microcontrolador para realização de tarefas mais críticas e a maior precisão em relação a outros métodos de controle de tempo.

Adquiriu-se o módulo de RTC DS3231, como pode ser visto abaixo na Figura 3.10, pois este possui um sensor de temperatura interno, utilizado para compensação das variações no cristal oscilador causadas pelas mudanças de temperatura. Este módulo é capaz de fornecer informações como segundo, minutos, dia, data, mês e ano. Correções como meses com menos de 31 dias e anos bissextos são realizadas de forma automática.



Figura 3.10: Relógio de tempo real DS3231

A especificação técnica do módulo adquirido pode ser vista abaixo na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Especificação técnica relógio de tempo real

Especificações Técnicas	
Tensão de operação	3,3 - 5V
Precisão entre 0 e 40°C	±2ppm
Precisão entre -40°C e 85°C	±3.5ppm
Dimensões PCB (A x L x C)	38 x 22 x 14mm

Fonte: FILIPEFLOP (2017)

### 3.3.2 LEDs Full spectrum

Avaliou-se através de pesquisa bibliográfica os tipos de sistema de iluminação que podem ser utilizados em cultivo protegido. Os principais tipos são:

**Fluorecente compacta:** Lâmpadas utilizadas em iluminação doméstica. Estas produzem luz branca. Não tem o mesmo resultado em relação a produtividade da cultura, porém é bastante econômica;

**Vapor de Alta pressão:** Lâmpadas mais utilizadas em cultivo em ambiente protegido. Divide-se em duas categorias: vapor metálico (MH - *Metal halide*) e vapor de sódio (HPS - *High Pressure Sodium*). As de vapor metálico emitem luz mais próxima ao espectro azul, e geram maior resultado na fase de crescimento das plantas. As de vapor de sódio emitem luz mais próxima do espectro vermelho, obtendo melhor resposta no período de floração. Seu consumo energético é muito alto em ambas categorias.

**LED:** Lâmpadas de LED possuem inúmeras vantagens. São as mais econômicas. Possibilitam a alteração da luminosidade através do controle da corrente elétrica. Têm vida útil longa (em torno de 40000 horas).

Escolheu-se a utilização de LEDs para iluminação dos vegetais, devido a sua alta durabilidade, menor emissão de calor, maior confiabilidade e a sua capacidade variar a iluminância com base na corrente elétrica. A emissão de calor reduzida é um dos principais motivos para a escolha pois, como os vegetais estarão próximos ao sistema de iluminação, há possibilidade de queima dos mesmos.

Verificou-se que a utilização de leds *full spectrum* é ideal para cultivo em ambiente protegido. A principal vantagem destes leds é que eles emitem uma grande quantidade de radiação fotossinteticamente ativa. Estes são formados com uma combinação de LED's brancos, azuis, vermelhos, violetas e infravermelhos, em uma proporção adequada para fotossíntese.

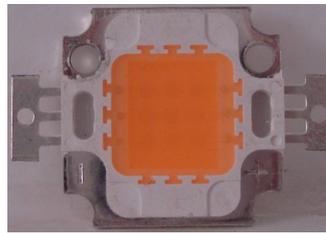


Figura 3.11: LED *full spectrum* 10W

A especificação técnica dos LED's de potência adquiridos pode ser vistas abaixo na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Especificações técnicas power LED *full spectrum*

Especificações Técnicas	
Potência	10W
Tensão	9 a 12V CC
Corrente	1,05A
Comprimento de onda	400 a 840 $\eta$ m
Ângulo de visão	160°
temperatura máxima de operação	60 °C
Vida útil	50.000 horas

Fonte: Adaptado de FILIPEFLOP (2017)

De acordo com LIMA (2013), todas as fontes que geram luminosidade através de eletricidade convertem a energia elétrica em luz e calor, em diferentes proporções. Para LEDs a proporção de potência elétrica que é transformada em energia calorífica é de aproximadamente 76,6%.

Ao contrário das lâmpadas incandescentes e fluorescentes, os LEDs não emitem calor na forma de radiação infravermelha, mas sim através do aumento de temperatura de junção, causada pelas altas correntes que passam pelo semicondutor. Este aumento da

temperatura altera características ópticas e elétricas do componentes, dessa forma o acoplamento de dissipadores de calor capazes de melhorar a extração do calor da junção e de diminuir o estresse termomecânico são imprescindíveis para estes componentes. (DIAS, 2012)

Adquiriu-se então dissipadores de microprocessador de computador para utilização em conjunto com os LED. Os dissipadores utilizados são feitos em alumínio e, tem dimensão de 69 x 83 x 45mm (L x A x C). Seu corpo é formado por 28 aletas espaçadas entre si em 1mm.

### 3.3.3 Funcionamento do sistema de Iluminação

O sistema de iluminação é o de mais simples controle pois sua variável de controle, o tempo, altera seu valor de maneira constante. Definiu-se que o fotoperíodo ideal seria de 18 horas, sendo que para manter essa oferta de iluminação os LEDs *full spectrum* serão acionados com 100% de intensidade no período de 4 horas da manhã até as 22 horas. O fluxograma na Figura 3.12 apresenta a forma de atuação.

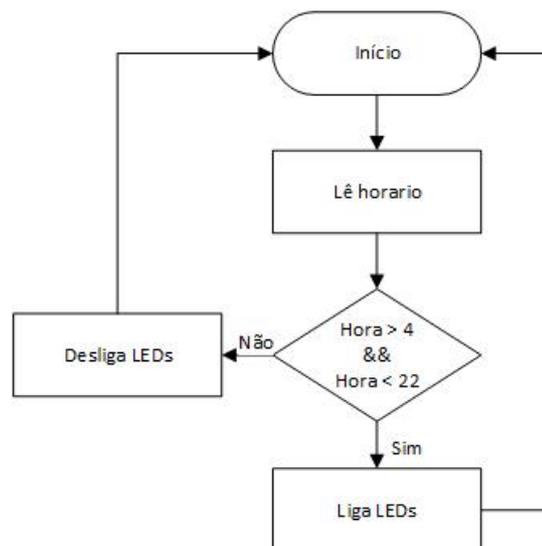


Figura 3.12: Fluxograma do sistema de iluminação

## 3.4 Microcontrolador

Para realização da aquisição de dados e a atuação sobre o ambiente é necessária a utilização de um microcontrolador, que é um circuito integrado, o qual contém um núcleo de processamento, memória e periféricos programáveis de entrada e saída.

Utilizou-se no projeto o *Arduino Mega 2560*, que é uma placa microcontroladora baseada no microcontrolador ATMEGA 2560. Escolheu-se este modelo pois tem 54 pinos digitais, que tem função de entrada e saída, destas portas 15 podem ser usadas como saída

PWM (*Pulse With Modulation*). Possui também 16 entradas analógicas, 4UARTs (portas seriais de *hardware*) um cristal oscilador de 16Mhz, uma conexão USB e um botão de reset. A placa pode ser vista abaixo na Figura 3.13.

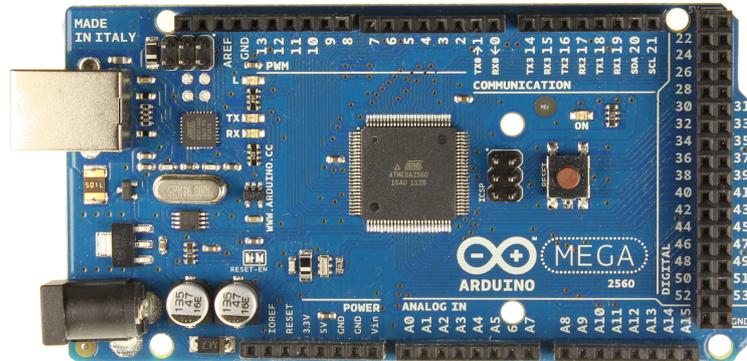


Figura 3.13: Arduíno Mega 2560

Fonte: FILIPEFLOP (2017)

Neste projeto utilizou-se os seguinte pinos da placa:

- Pinos Digitais
  - **20** Pino SDA (transmissão de dados via protocolo I2C) para comunicação do RTC;
  - **21** Pino SCL (clock do barramento via protocolo I2C) para comunicação do RTC;
  - **24 e 26** Acionamento das válvulas solenoides;
  - **15 e 14** Acionamento dos *coolers*;
  - **6** Definição do sentido da corrente na pastilha de peltier;
  - **2** Entrada de dados do sensor DHT22.
- Pinos Analógicos
  - **A0** Acionamento dos *coolers* para a pastilha de peltier;
  - **A3** Entrada de dados do sensor *grove*;
- Pinos PWM
  - **8, 9, 11 e 12** Controle dos LEDs *full spectrum*;
  - **7** Controle da pastilha de peltier.

O software que controla os pinos e as ações do microcontrolador pode ser desenvolvido na IDE (*Integrated Development Environment*) proprietária deste, que conta com uma interface gráfica simples e intuitivas, e aceita códigos em C/C++.

## 3.5 Fonte

Para realizar a alimentação de todos os atuadores do sistema, utilizou-se uma fonte chaveada estabilizada que fornece tensão contínua de 12V com corrente de até 30A. A mesma pode ser vista abaixo na Figura 3.14.



Figura 3.14: Fonte chaveada

As especificações técnicas desse equipamento podem ser vistas abaixo na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Dados técnicos fonte chaveada

<b>Especificações Técnicas</b>	
Tensão de entrada	127 240V CA
Frequência	50/60Hz
Corrente máxima	30A
Tensão de saída	12V
Potência	360W
Dimensões (A x L x C)	50 x 114 x 215mm

## 3.6 Estrutura Física

A estrutura para cultivo foi projetada a partir de especificações dos sistemas de controle e espaço mínimo para o desenvolvimento de mudas. Em relação as dimensões da estrutura considerou-se para a altura a necessidade de no mínimo 100mm de solo para crescimento radicular dos vegetais, sendo que foi adicionado mais 10mm para o sistema de drenagem. Definiu-se uma altura total dos vegetais de no máximo 250mm, dessa forma o ar aquecido ou resfriado pelo sistema de controle de temperatura deve passar acima desta altura. Dessa forma, optou-se pela altura total de 500mm.

Em relação a largura da estrutura, optou-se por criar vegetais com até 250mm de diâmetro, adicionando-se mais 100mm para inserção do sistema de irrigação. Para definição do comprimento decidiu-se pelo plantio de 2 mudas, totalizando a distância de 500mm.

Para alocar os sistemas de controle ambiental foram realizados furos na estrutura. Estes foram feitos para: os exaustores do sistema de controle de temperatura, as mangueiras do sistema de irrigação e furos para o sistema de drenagem. O desenho técnico da estrutura consta no Apêndice 6.2. A Figura 3.15 apresenta o esquemático 3D da estrutura.

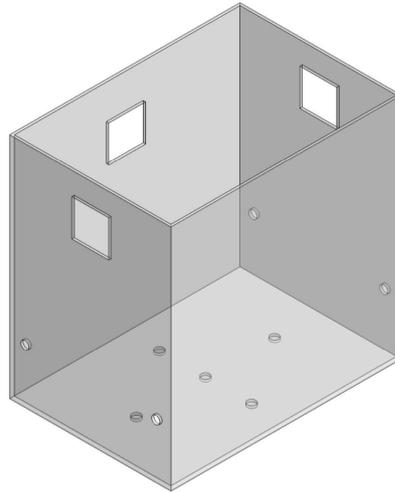


Figura 3.15: Esboço 3D do ambiente de cultivo

Optou-se pela fabricação da estrutura em um material transparente, de forma a facilitar a visualização dos processos que ocorrem no interior desta. Definiu-se pela utilização de vidro devido a seu menor custo, alta durabilidade, não reatividade com compostos orgânicos, impermeabilidade a fluídos, boa isolamento elétrica e baixa condutividade térmica.

A fabricação foi feita por empresa do setor vidreiro de Divinópolis em vidro cristal incolor de 6mm de espessura, a colagem foi feita com cola UV e silicone, de forma que suporte maiores temperaturas. A figura 3.16 apresenta a estrutura pronta.



Figura 3.16: Estrutura para cultivo pronta

Para suportar a estrutura de iluminação, desenvolveu-se um suporte em alumínio. Este foi colocado na parte superior da estrutura de cultivo, tendo então as mesmas dimensões.

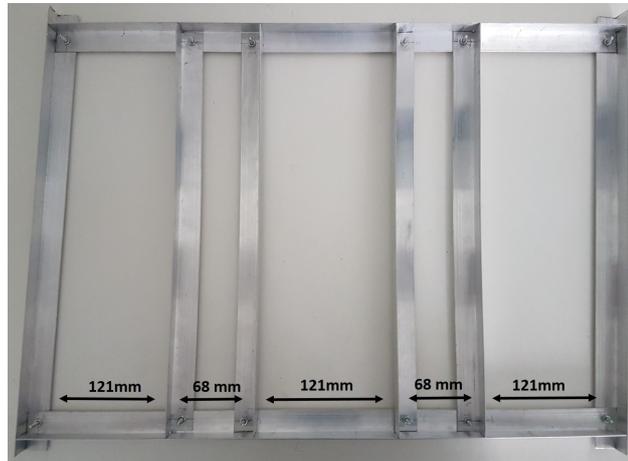


Figura 3.17: Suporte para os LEDs

Fabricou-se também uma estrutura em MDF (*Medium Density Fiberboard*) para suportar todos os sistemas de acionamento e fontes de energia. Esta foi alocada na parte frontal da estrutura, face em que há furo para encaixe de um *cooler*, facilitando seu acesso para encaixe dos sistemas e diminuindo a distância entre os atuadores e sensores das placas de controle.

## Projeto e Fabricação

Após definição dos componentes a serem utilizados, e da metodologia para monitoramento e controle das variáveis ambientais, realizou-se o projeto dos sistemas. As características e necessidades de cada sistema foram avaliadas individualmente para esta etapa e, após sua conclusão, fabricou-se todas as placas de controle e elementos físicos necessários.

As seções a seguir tratam do projeto e fabricação de cada sistema, iniciando pelo de irrigação, apresentando a seguir o de controle de temperatura e, por fim, o sistema de iluminação.

### 4.1 Sistema de irrigação

O projeto e fabricação do sistema de irrigação contou com 2 fases de trabalho bem distintas. Inicialmente foi desenvolvido o circuito de atuação e sua programação, na qual utiliza-se os valores lidos pelo sensor de umidade do solo e o horário atual para ligar, ou desligar a irrigação. Após a fabricação do acionamento, desenvolveu-se o sistema hidráulico e demais adaptações físicas necessárias ao projeto. Esta seção trata do projeto e fabricação de ambas as fases. Inicialmente será apresentado o sistema hidráulico, e a seguir o projeto e fabricação do sistema eletrônico.

#### 4.1.1 Sistema Hidráulico

Desenvolveu-se na estrutura de cultivo um sistema para drenagem da água. Este consiste de uma camada de argila expandida após a de terra. O interior desta argila é formado por uma espuma cerâmica microporosa, e o exterior por uma casca firme e resistente, que absorve parte da água excedente do solo garantindo que este não fique encharcado. Na parte inferior da estrutura há furos de 18mm de diâmetro, que permitem o escoamento da água não absorvida pela argila. A Figura 4.1 abaixo apresenta as camadas de terra e de argila.



Figura 4.1: Sistema de drenagem Implementado

Fabricou-se em PVC uma peça para realizar a ligação entre a torneira de água e as mangueiras do sistema de irrigação. Para montagem foram utilizados os seguintes itens:

- 500mm de cano de PVC de 25mm de diâmetro;
- 1 tê de 25mm de diâmetro;
- 2 joelhos de 25mm de diâmetro;
- 3 luvas de 3/4" roscada para saída de 25mm ;
- um conector de 3/4" roscado para saída de 12,7mm.
- cola de PVC

Cortou-se o tubo em 5 partes, sendo: 3 com comprimento de 40mm, 1 com 230mm e 1 com 150mm. Este foram lixados e então colados com as conexões através da cola de PVC. Afixou-se as válvulas a tubulação utilizando fita veda-rosca para diminuir a possibilidade de vazamentos na conexão. A peça pronta pode ser vista na Figura 4.2.



Figura 4.2: Peça de conexão hidráulica

Para realização efetiva da irrigação foi fabricado um sistema de distribuição utilizando os seguintes materiais:

- 16 gotejadores Agrojet GA-2;

- 2 mangueiras de  $1/2''$  com comprimento de 700mm;
- 2 mangueiras de  $3/8''$  com comprimento de 200mm;
- 1 mangueira de  $3/8''$  com comprimento de 500mm;
- 1 conector hidráulico de aço carbono com revestimento de zinco;
- 6 abraçadeiras com rosca sem fim de  $3/4''$ .

Furou-se as mangueiras de  $0,5''$  com uma broca de 5mm, para afixação dos gotejadores, sendo que a distancia entre furos foi de 60mm. Cada gotejador foi inserido sobre pressão de forma manual. Uma das extremidades da mangueira foi então afixada as válvulas solenoides e presas através de abraçadeira. Para realizar a coleta da água não utilizada na irrigação, acoplou-se na extremidade oposta das mangueiras de  $0,5''$  às de  $0,375''$  de 200mm de comprimento e, por fim, estas nas saídas horizontais do conector hidráulico. Na saída vertical do conector uniu-se a mangueira de 500mm. A Figura 4.3 mostra o sistema hidráulico pronto e acoplado ao protótipo, a imagem a esquerda demonstra as conexões das válvulas, a imagem no canto superior direito apresenta as mangueiras com os gotejadores e, a imagem no canto inferior direito, o sistema de coleta de água.



Figura 4.3: Sistema hidráulico fabricado

#### 4.1.2 Circuito de acionamento

Para realizar o acionamento das válvulas solenoides foi desenvolvido um circuito que liga a válvula, liberando o fluxo de água, quando um sinal digital é enviado pelo Arduino.

Decidiu-se por utilizar o acionamento através de relés, que é um componente eletromecânico que funciona como uma chave liga/desliga. O circuito projetado pode ser visto abaixo na Figura 4.4.

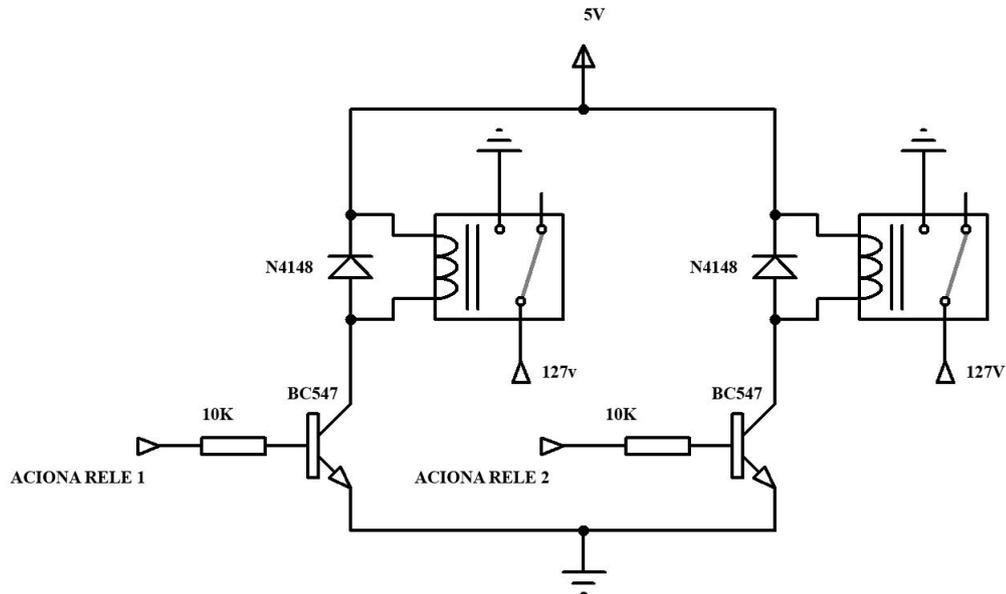


Figura 4.4: Circuito para acionamento dos Relés

Neste circuito as bobinas dos relés estão ligadas entre a fonte de 5V do Arduíno e o terra, sendo que há um transistor do tipo NPN modelo BC547 entre os dois polos. As bases dos transistores estão ligadas a entradas digitais do microcontrolador. O contato comum dos relés foi ligado ao fio de fase da instalação elétrica, enquanto que os contatos NA foram ligados a um dos contatos da bobina das válvulas solenoide. O outro contato das válvulas foi conectado ao neutro da instalação elétrica.

Quando se deseja acionar um relé, envia-se um sinal que passa o pino do Arduíno para o estado alto. Essa mudança faz com que ocorra polarização da junção base coletor, liberando a passagem de corrente pela bobina do relé. A passagem de corrente liga o contato NA ao fio de fase da instalação elétrica, energizando as válvulas. O acionamento da bobina dos relés pode induzir corrente no sentido contrário, o que pode causar danos ao microcontrolador. Inseriu-se então um diodo de corte rápido do tipo N4148 para bloquear a passagem desta corrente induzida.

Através do software proteus desenhou-se o esquemático no ambiente ARES, que auxilia no projeto de PCBs (*Printed Circuit Board - Placa de circuito Impresso*). O layout desenvolvido foi impresso e passado para uma placa de fenolite através de transferência térmica. A remoção das camadas de cobre foi feita através de banho em perclorato de ferro. A soldagem dos componentes foi realizada manualmente com ferro de solda de 40W. A placa pronta pode ser vista abaixo na Figura 4.5.



Figura 4.5: Placa para controle da irrigação pronta

Realizou-se as conexões elétricas utilizando fios de 0,3mm para as ligações eletrônicas (tensão de 5V CC) e de 4mm (AWG 10) para conexões elétricas (tensão de 127V CA). Para conectar os fios de 4mm entre si, utilizou-se conectores cerâmicos. Para conexão destes com as válvulas utilizou-se conectores com terminal de latão do tipo fêmea.

Após a fabricação da placa de controle, e da montagem de todo o sistema de irrigação no protótipo, desenvolveu-se o código de controle na IDE do Arduino. O código, que pode ser visto no Apêndice C, segue o fluxograma apresentado na seção 3.1.4.

## 4.2 Sistema de controle de temperatura

O controle de temperatura conta com duas necessidades claras, o acionamento dos sistema de atuação através das leituras do sensor e a capacidade de inversão da corrente para a pastilha de peltier. O projeto deste sistema foi focado nestas necessidades. Nesta seção será apresentado o projeto do sistema, sua fabricação e montagem no protótipo.

### 4.2.1 Montagem física

No sistema de controle de temperatura proposto a primeira frente de atuação, ou seja, aquela que atuará em pequenas dispersões da variável em relação ao *set point*, são os *coolers*. A posição destes foi definida como sendo a 100 mm do topo do vidro nas extremidades mais estreitas da estrutura, por dois principais motivos: Primariamente, pois ar mais quente tende a estar na parte superior da estrutura, dessa maneira o posicionamento na parte superior auxilia no expurgo do ar quente. Como segundo motivo está o auxílio na refrigeração do sistema de iluminação, pois o aquecimento deste causa diminuição da vida útil dos LEDs e também insere mais calor no ambiente.

Os dois componentes foram colados com silicone acético na estrutura de vidro em duas posições diferentes. Um destes foi colocado como ventilador, jogando o ar do ambiente externo para dentro da estrutura, enquanto que o outro foi alocado como exaustor, retirando

o ar de dentro. A Figura 4.6 mostra o posicionamento dos *coolers*.

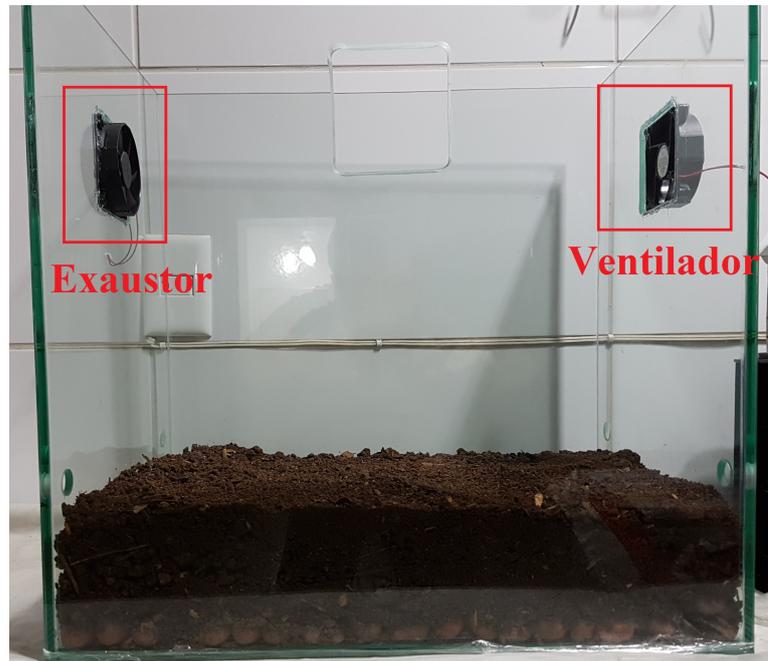


Figura 4.6: Aplicação dos *coolers* na estrutura

Utilizou-se os furos do *cooler* posicionado como exaustor, para a passagem dos fios dos sensores de temperatura e de umidade do solo. Este posicionamento possibilitou que os fios percorressem um caminho menor até o microcontrolador, facilitando a montagem.

Como segundo método para atuação, tem-se a pastilha de peltier. Para utilização deste componente é necessário a fixação em dissipadores de calor de grande magnitude. Na seção 3.2 detalha-se os dissipadores utilizados. Colou-se cada lado da pastilha em um elemento utilizando a cola térmica, mantendo-se a placa de poliestireno expandido entre os dois. No dissipador de calor de bebedouro, acoplou-se dois *coolers* de computador de 70 x 70mm por meio de cianoacrilato.

No dissipador que será utilizado para atuação no ambiente foi acoplado um *cooler* de 80 x 80mm, igual aos colados nas laterais da estrutura. O acoplamento foi feito por meio de parafusos  $\frac{5}{32}$ " de 70mm de comprimento, que foram inseridos entre as aletas. A Figura 4.7 apresenta a pastilha de peltier já colada no dissipador e, ao lado, a placa de poliestireno sobre o conjunto.

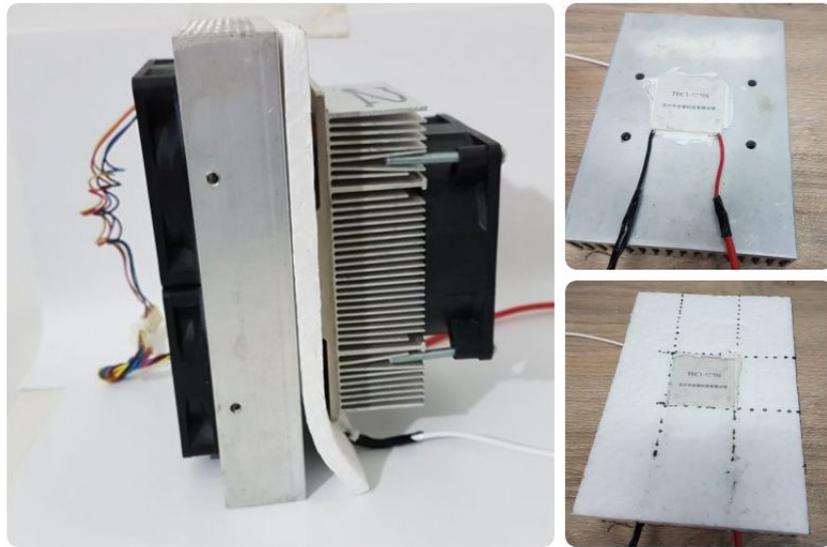


Figura 4.7: Pastilha de peltier acoplada no dissipador de calor

A fixação deste sistema na estrutura de vidro foi feita utilizando silicone acético. Como a maior parte do sistema se mantinha suspensa no ar, presa apenas pelas laterais do *cooler*, fabricou-se duas hastes de alumínio para apoiar o dissipador maior, diminuindo o esforço sobre o silicone e garantindo que este não se soltaria. A Figura 4.8 mostra o sistema aplicado a estrutura.



Figura 4.8: Afixação do sistema da pastilha de peltier

### 4.2.2 Circuitos de acionamento e controle

Para o acionamento tanto dos *coolers* da estrutura, quanto os utilizados no sistema da pastilha de peltier, projetou-se um circuito utilizando relés. O funcionamento deste circuito é similar ao apresentado na Seção 4.1 para controle das válvulas solenoides. Definiu-se que a necessidade de controlar apenas três entradas, pois todos os componentes do sistema da pastilha de peltier devem trabalhar simultaneamente, dessa forma o acionamento conjunto evita falhas. A Figura 4.9 mostra o circuito desenvolvido.

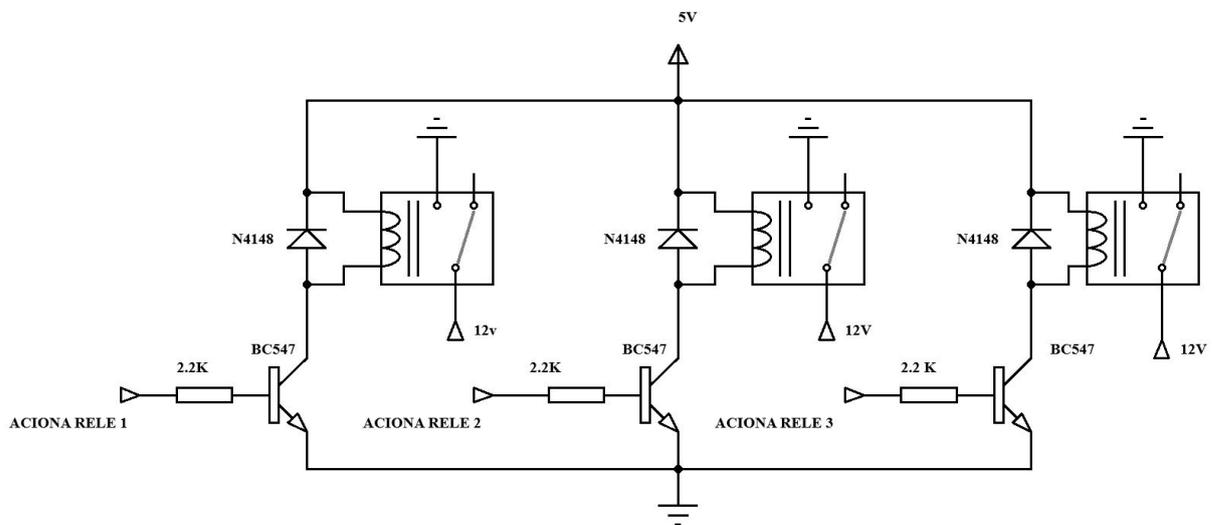


Figura 4.9: Circuito para controle dos *coolers*

Assim como na placa para controle das válvulas solenoides, desenhou-se o esquemático no ambiente ARES do *software* Proteus. O layout foi impresso e passado para uma placa de fenolite através de transferência térmica. A remoção das camadas de cobre foi feita através de banho em perclorato de ferro. A soldagem dos componentes foi realizada manualmente com ferro de solda de 40W. A placa pronta pode ser vista abaixo na Figura 4.10.

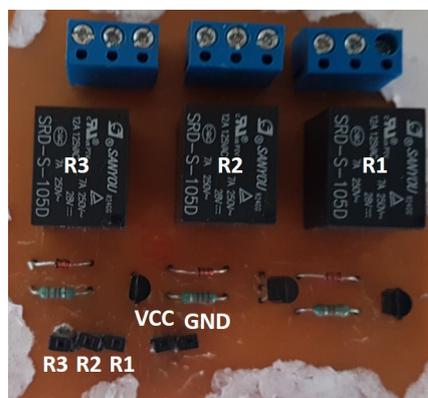


Figura 4.10: Placa para controle dos *coolers*

Para controlar a direção e amplitude da corrente na pastilha de peltier desenvolveu-se um circuito de ponte H. Optou-se por desenvolver o circuito utilizando-se um relé de duplo contato pois este suporta maiores correntes sem a necessidade de muitos dissipadores de calor. A desvantagem do uso de relés é a velocidade do chaveamento e a possível fadiga do componente devido ao chaveamento contínuo, porém o ambiente a ser controlado tem uma grande inércia térmica, dessa forma não haverá a necessidade de alterações contínuas dos contatos. O circuito projetado pode ser visto na Figura 4.11

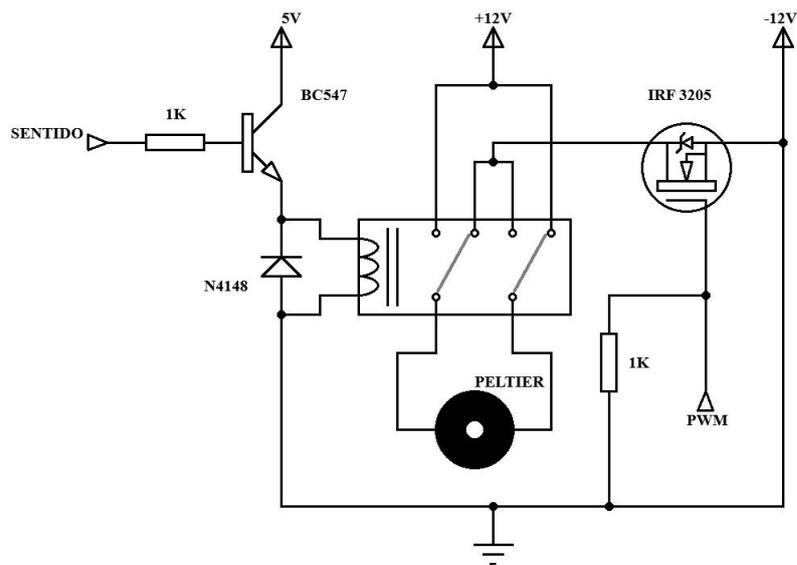


Figura 4.11: Circuito de ponte H

No circuito acima definiu-se o sentido da corrente através de uma saída digital do microcontrolador. Quando o pino de sentido está no estado “baixo” não há passagem de corrente pela bobina do relé e então o comum que está conectado ao pino NF mais a direita se mantém conectado aos +12V da fonte de alimentação, enquanto que o NF na esquerda mantém-se conectado ao MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) e conseqüentemente aos -12V da fonte. Ao alterar o estado do pino de sentido para “alto” há então passagem de corrente pela bobina, conectando aos pinos NA a pastilha de peltier. Quando ocorre esta comutação o contato comum mais a direita se conecta ao pino NA, que está ligada aos -12V da fonte, enquanto que o comum, mais a esquerda, conecta-se a outra entrada NA, que está nos +12V. Esta mudança inverte o sentido da corrente, conseqüentemente mudando o lado da pastilha que está aquecendo.

Além do controle do sentido de aquecimento e resfriamento, o circuito permite modular a amplitude da corrente por um sinal PWM. Através da largura do pulso de uma onda quadrada, ou seja, de acordo com o tempo que o sinal se mantém em nível alto, é possível controlar a intensidade da tensão fornecida. A Figura 4.12 demonstra a variação do ciclo ativo em um sinal.

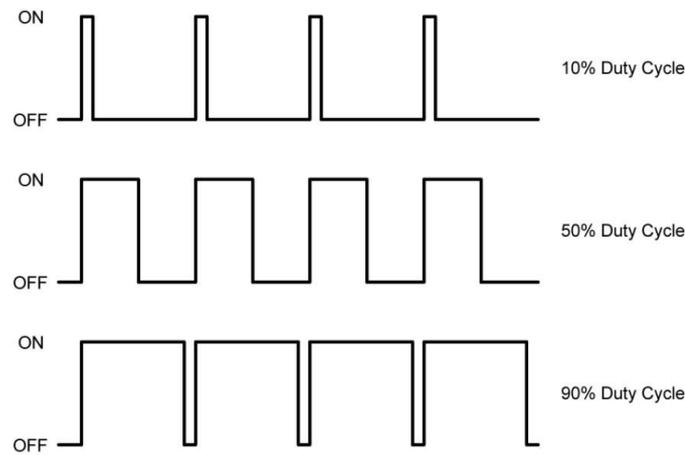


Figura 4.12: Exemplo de sinal com variação da largura de pulso

No circuito da Figura 4.11 polariza-se o *gate* do MOSFET com uma tensão média gerada pelo PWM. De acordo com a largura do ciclo ativo libera-se mais, ou menos, corrente para fluir dos +12V até os -12V da fonte, passando pela pastilha de peltier.

Da mesma forma que para as demais placas, o layout foi desenvolvido no ambiente ARES, este foi passado para uma placa de fenolite através de transferência térmica. A remoção das camadas de cobre foi feita através de banho em percloroeto de ferro. A soldagem dos componentes foi realizada manualmente com ferro de solda de 40W. A placa pronta pode ser vista abaixo na Figura 4.13.

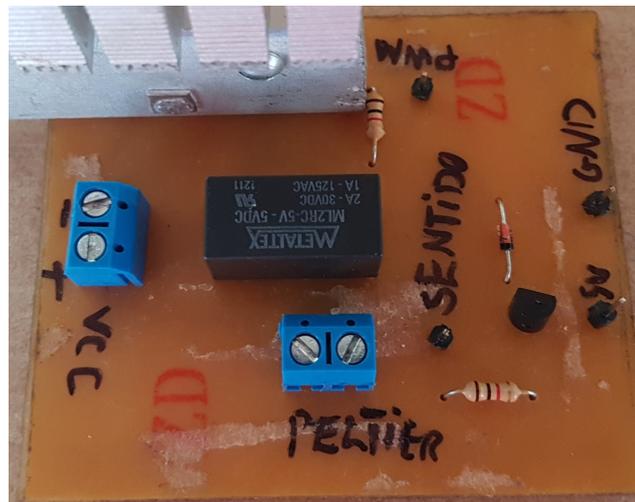


Figura 4.13: Placa de ponte H com relé de duplo contato

Para esta placa foi necessário o acoplamento de um dissipador de calor de alumínio no MOSFET pois este esquenta bastante devido a magnitude da corrente.

Após a fabricação da placa de controle, e da montagem de todo o sistema no protótipo, desenvolveu-se a parte do código de controle para a temperatura, a mesma pode ser visto no Apêndice C, segue o fluxograma apresentado na seção 3.2.4.

## 4.3 Sistema de Iluminação

Embora a metodologia de atuação sobre o sistema de iluminação seja a mais simples, seu projeto apresentou desafios em relação a forma de acionamento. Definiu-se que, embora o foco deste sistema seja a manutenção do fotoperíodo adequado, a capacidade de variar a intensidade da iluminação pode ser utilizada para futuros estudos que visem gerar economia energética. A presente seção trata do projeto e fabricação do conjunto LED - dissipador e circuitos de acionamento.

### 4.3.1 Montagem física

Utilizou-se no projeto dissipadores de microprocessadores acoplados aos LEDs, pois estes tem alta eficiência para troca de calor. A fixação foi feita com a mesma cola térmica utilizada para na pastilha de peltier. Para realizar a passagem dos fios das placas de controle para os LEDs realizou-se furos com uma broca de 4,5mm no dissipadores. Os fios soldados aos terminais foram então passados através dos furos feitos e agrupados através de espaguete termo retrátil. A Figura 4.14 exhibe o componente aplicado ao dissipador.



Figura 4.14: Conjunto LED + Dissipador

Produziu-se 4 conjuntos LED-Dissipador como o visto acima. Estes foram posicionados no suporte de alumínio fabricada com cantoneiras L, que foi vista na Figura 3.17. Como este suporte irá ser a tampa do ambiente de cultivo foi necessário a inserção de um material isolante térmico entre os vãos, de forma a diminuir a troca de calor não desejada. Utilizou-se novamente placas de poliestireno expandido, que foram cortadas 1mm maior que os espaçamentos em todas as direções, estas placas foram então encaixadas no suporte, como pode ser visto na Figura 4.15.



Figura 4.15: Suporte para os LEDs com placas de poliestireno

### 4.3.2 Circuito de controle da intensidade luminosa

No projeto de sistemas com mais que um LED a primeira etapa é a definição de qual o arranjo será feito, ou seja, se estes serão posicionados em série ou em paralelo.

O acionamento em série garante um brilho uniforme, pois é exatamente a mesma corrente que percorre todos os componentes. As principais características deste arranjo são:

- Menor confiabilidade
- Brilho uniforme entre os elementos
- Rendimento alto
- Necessidade de apenas um circuito de controle
- Menor custo

A configuração em paralelo possui confiabilidade mais alta, porém o brilho emitido pelos LEDs não é tão uniforme. As características desse arranjo são:

- Menor confiabilidade
- Brilho uniforme entre os elementos
- Rendimento alto
- Necessidade de apenas um circuito de controle
- menor custo

Definiu-se que, como um brilho uniforme não é uma necessidade primordial para a eficácia da iluminação dos vegetais, então o acionamento em paralelo é uma melhor escolha para o projeto. Através desta escolha pode-se definir o melhor circuito para acionamento pois como os LEDs estarão em paralelo, cada um deste deverá ser alimentado com uma corrente de 1,05A e a tensão de 12V será comum a todos.

Projetou-se então um driver que regula corrente que passa pelos LEDs através de um MOSFET de canal N, modelo IRF 540N, e de um “sensor de corrente” composto por um transistor BC547 e uma resistência de 0,6Ω, que realiza a realimentação negativa. A Figura 4.16 apresenta o circuito projetado.

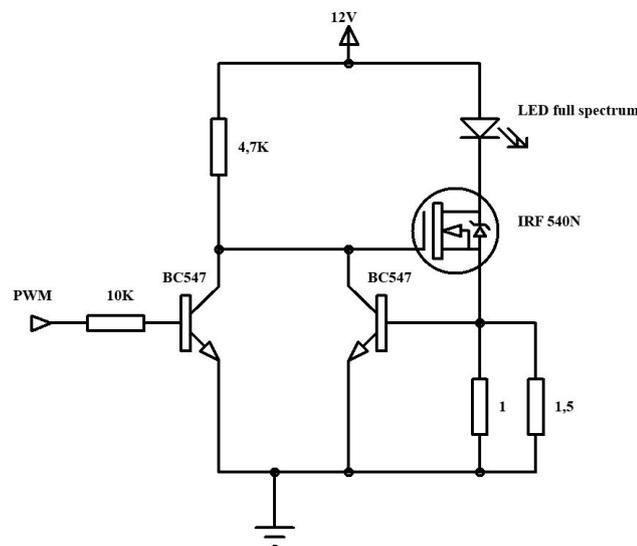


Figura 4.16: Circuito para acionamento dos LEDs

Ao se energizar o circuito, os transistores, que não recebem nenhum sinal, não trabalham e, então o *gate* do MOSFET recebe uma tensão positiva através da resistência de 4,7Ω, que o faz conduzir. Esta condução acende o LED e produz uma queda de tensão sobre a associação de resistores de 0,6Ω, que se encontra em série com o LED.

Quando ocorre aumento da corrente há também um aumento na queda de tensão na resistência, o que rompe o limiar de tensão da base do BC547, que é de 700mV. Com o início da condução do transistor, há diminuição da tensão no *gate* do MOSFET, o que conseqüentemente reduz a corrente que passa pelo LED. A associação de resistores foi escolhida com base na corrente máxima que pode passar pelo LED utilizando-se a relação dada pela Equação 4.1:

$$R = \frac{0,625 \cdot V_{LED}}{P_{LED}} \quad (4.1)$$

Essa escolha de resistor faz com que a corrente sempre se mantenha em no máximo 1,05A, mesmo quando o restante do circuito está desligado. Este restante do circuito é responsável pelo controle da intensidade da corrente e conseqüente intensidade da iluminação. Através de um sinal PWM, enviado pelo microcontrolador, há polarização da

junção base-coletor do BC547 mais a esquerda, levando-o a conduzir e desviando parte da corrente que iria para o LED. Quanto maior a largura de pulso do PWM, mais corrente fluirá por esse ramo do circuito, diminuindo o fornecimento do fotodiodo.

Optou-se por atuar através de lógica inversa pois o fotoperíodo desejado é de 75% do dia. Atuando através de lógica direta seria necessário fornecer o sinal de nível alto durante as 18 horas, o que representa um gasto de energia desnecessário, já que através da lógica inversa pode-se manter a iluminação em nível máximo sem o envio de qualquer dado. Fabricou-se a PCB do circuito da mesma forma que as demais, esta pode ser vista na Figura 4.17.



Figura 4.17: Placa para controle da iluminação

Fabricou-se 4 PCBs, um para o acionamento de cada LED. Assim como na placa de ponte H, os MOSFETs desta placa esquentam bastante, porém a utilização de um dissipador para cada PCB tornaria complexa a organização na estrutura do protótipo. Utilizou-se então uma única placa de alumínio como dissipador comum. Para poder conectar todas as placas foi necessário a utilização de folhas de mica flexíveis, que são condutoras térmicas mas isolantes elétricas. O conjunto pode ser visto na Figura 4.18.

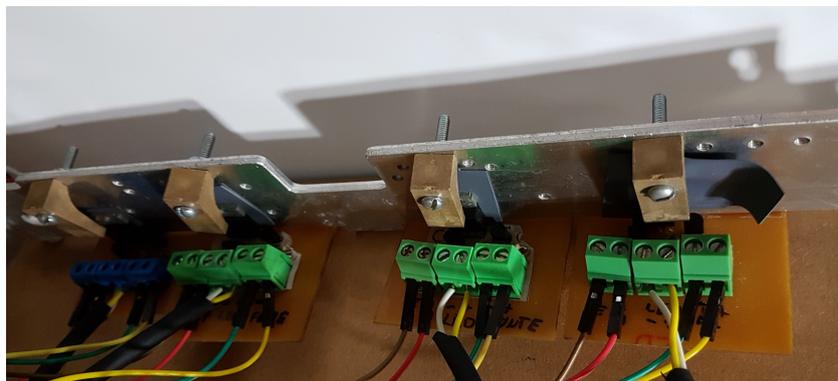


Figura 4.18: Montagem das PCBs no dissipador

A seguir, desenvolveu-se a parte do código de acionamento dos LEDs, baseado no fluxograma apresentado na seção 3.3.3. O código pode ser visto no Apêndice C.

## Resultados

Este capítulo apresenta os testes realizados e resultados encontrados neste projeto. Serão apresentados e discutidos os resultados de cada subsistema de forma individual, iniciando-se pelo sistema de irrigação, tratando-se a seguir do controle de temperatura, e, por fim, detalhando-se o de sistema de iluminação.

Não foram realizadas averiguações do crescimento dos vegetais no interior do ambiente pois o tempo disponível para etapa de testes foi curta.

### 5.1 Sistema de irrigação

Para avaliar o funcionamento do sistema de irrigação monitorou-se durante 24 horas o protótipo. Para tal teste foi utilizado um módulo para cartão de memória acoplado ao Arduino, implementando-se através deste um sistema de *datalogger*. O gráfico da Figura 5.1 apresenta o monitoramento do sinal do sensor de umidade do solo no período de 05/04/2017 a 06/04/2017

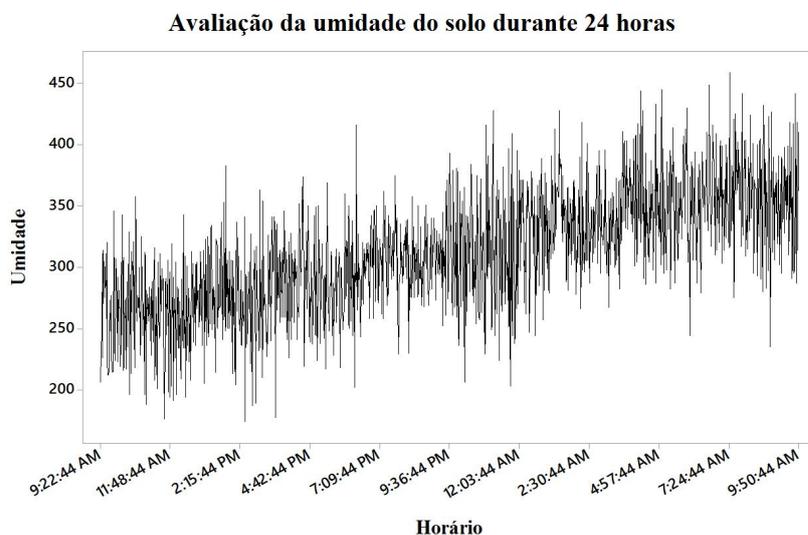


Figura 5.1: Monitoramento da umidade do solo.

Durante esse teste, o sistema de irrigação não foi acionado nenhuma vez, pois a terra do protótipo se mantinha úmida. Pode-se observar que o sensor utilizado tem alta variabilidade, não sendo possível realizar uma calibração para retornar através da leitura do conversor analógico digital um valor de umidade na forma de densidade de água. Dessa forma a utilização dos parâmetros recomendados pelo fabricante mantém-se como boa opção para o protótipo.

Para averiguar o funcionamento da irrigação forçou-se o início desta através da retirada do sensor do solo, o que fez com que fosse enviado um sinal referente a solo seco. Após a retirada do componente da terra a válvula manteve-se ligada por um período de 1 minuto. A seguir posicionou-se o sensor novamente na terra, o que fez com que as válvulas não voltasse a ser acionadas após o período de 5 minutos. Toda a água que não foi utilizada na irrigação foi redirecionada para baldes de armazenamento através das mangueiras.

## 5.2 Sistema de Controle de temperatura

Para avaliação do sistema de controle de temperatura avaliou-se os dados adquiridos durante o teste de funcionamento de 24 horas, já explicado na seção 5.1. A Figura 5.2 apresenta os dados do período de 05/04/2016 as 9:22 da manhã até as 9:50 do dia 06/04.

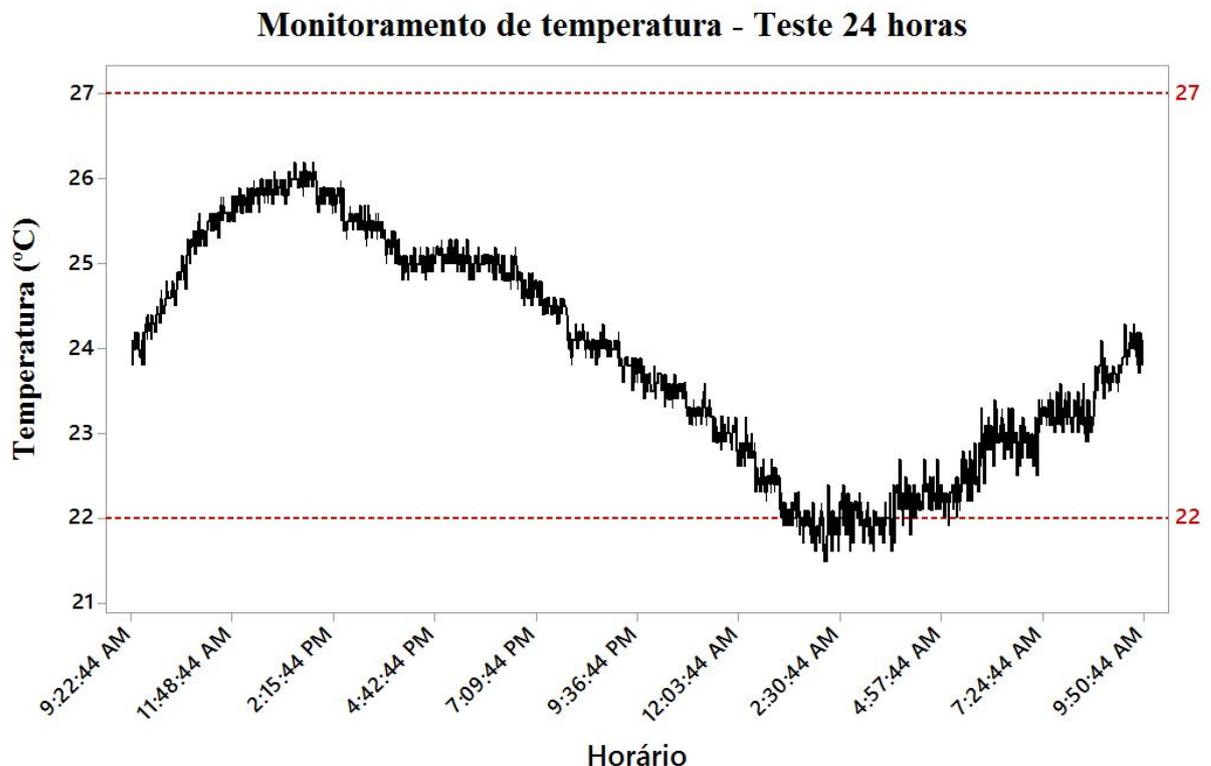


Figura 5.2: Teste geral do sistema de temperatura

Observa-se no gráfico acima que o sistema manteve a temperatura dentro da faixa

de operação durante as 24 horas em que se manteve ativo. No período diurno do dia 05/04/2017 ocorreu atuação através do sistema de *coolers*, que se mantiveram ativos durante cerca de 3 horas, quando ocorreu a queda da temperatura para uma faixa abaixo de 25°C. Esta redução não pode ser associada somente com a atuação do sistema, pois ocorreu chuvas no período da tarde, o que reduziu a temperatura do ambiente externo.

Durante esse tempo a atuação através da pastilha de peltier se iniciou durante o período da madrugada do dia 06/04/2017, a partir das 2 da manhã. O sistema de manteve ativo durante 6 horas, não atingindo a temperatura limite para desativação, que é de 25°C.

Para averiguar de maneira mais assertiva o tempo gasto pelo sistema de aquecimento para elevar a temperatura, realizou-se um segundo teste, com duração de 2 horas, em que forçou-se a queda da temperatura interna através da inserção de gelo no sistema. A Figura 5.3 mostra este teste.



Figura 5.3: Teste do sistema de aquecimento

O teste foi realizado no período noturno devido as médias de temperatura mais baixas. Alocou-se pedras de gelo em toda a extensão do protótipo e esperou-se 10 minutos antes do início do teste. Conforme pode ser visto na Figura 5.4 a primeira temperatura medida foi de 23,3°C a qual caiu abaixo de 22°C em cerca de meia hora, sendo que nesse momento já não havia gelo no interior do ambiente.

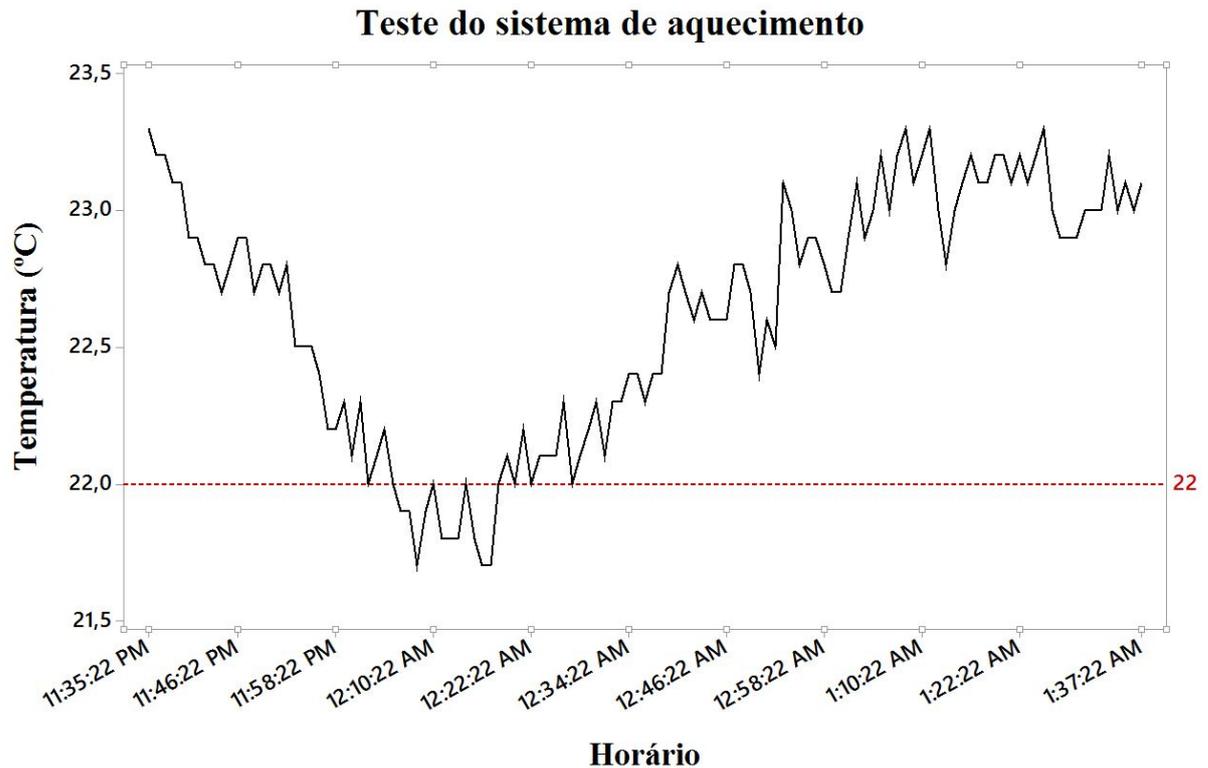


Figura 5.4: Resultado do sistema de aquecimento

A temperatura externa ao final do teste era de aproximadamente 21°C. Observa-se no gráfico acima que em cerca de 50 minutos o sistema de controle elevou a temperatura do ambiente em 1°C, normalizando após esse momento.

Comparando-se as respostas do teste de 24 horas com a do teste acelerado, pode-se verificar que o sistema de controle de temperatura utilizando a pastilha de peltier consegue manter a temperatura interna do protótipo apenas 2°C acima da externa.

Para avaliação da capacidade de resfriamento realizou-se um teste acelerado através de abafamento do protótipo. Utilizou-se um toldo plástico para recobrir o protótipo durante meia hora no período matutino. Avaliou-se a temperatura no interior do protótipo e verificou-se que a mesma já estava em 27,4°C, valor ideal para o teste. A Figura 5.5 apresenta um gráfico de acompanhamento.

### Teste do sistema de arrefecimento

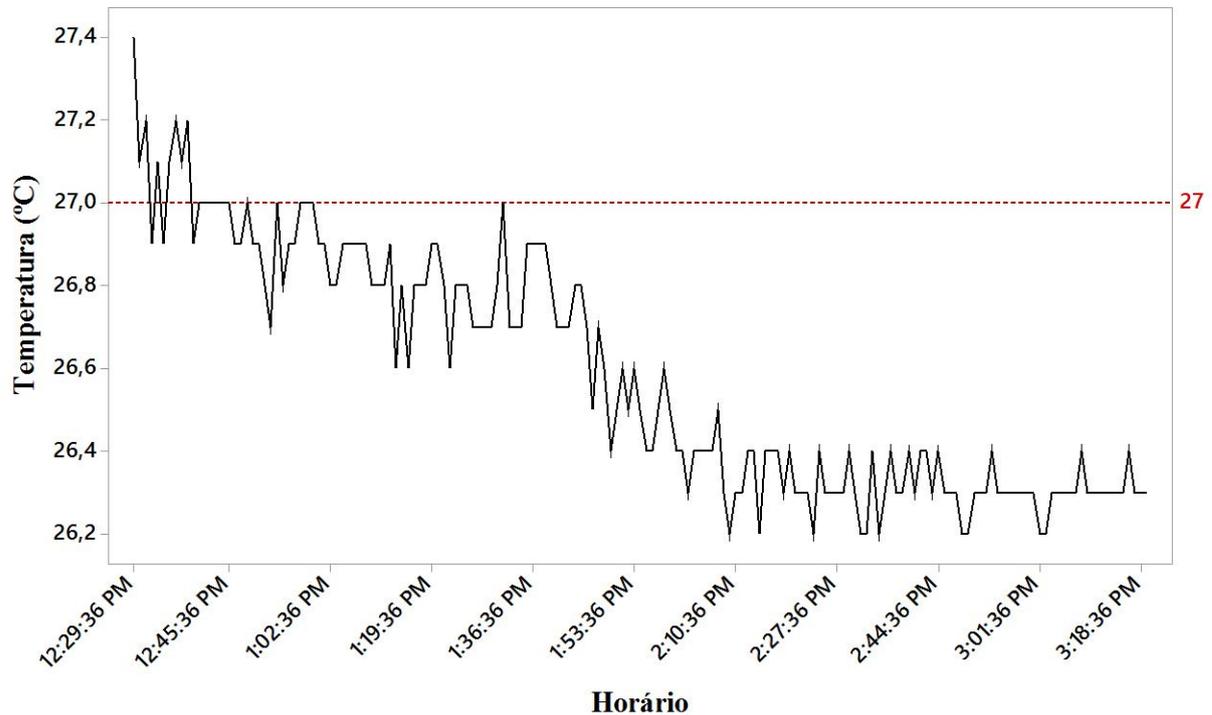


Figura 5.5: Resultado do sistema de arrefecimento

Observa-se que a temperatura cai até o nível de  $26,3^{\circ}\text{C}$  em um período de 2 horas sobre o abafamento do toldo. Este resultado, demonstra a capacidade de resfriamento do sistema, porém há outros fatores que influenciam a diminuição da temperatura, como o clima externo. Devido ao protótipo não ter sido 100% isolado, a troca de calor com o meio ambiente é grande, influenciando diretamente na capacidade de se manter os parâmetros de temperatura dentro dos níveis estipulados.

## 5.3 Sistema de iluminação

Para avaliar a qualidade da iluminação do ambiente, realizou-se um teste de iluminação. Expressa em lux, esta característica indica o fluxo luminoso numa superfície por unidade de área. Pelo S.I (Sistema Internacional) um lux corresponde a incidência perpendicular de 1 lúmen em uma superfície de 1 metro quadrado.

Utilizou-se um sensor BHI1750FVI para determinar a iluminação em uma determinada área do ambiente de cultivo. Este sensor é capaz de medir uma faixa de 1 a 65.345 lux com resolução de  $\pm 1$  lux.

Demarcou-se em uma placa de poliestireno expandido, de dimensões de 350x500mm, quadrados de 50 x 50mm. Inseriu-se esta placa na estrutura de cultivo, afixando-se o sensor de luminosidade nesta. Inicialmente desligou-se todas as luzes do ambiente, garantindo

que não ocorreria interferência de outra fonte luminosa nos resultados. A seguir acionou-se os LEDs com PWM em 0% do ciclo ativo, o que devido a lógica inversa do circuito de acionamento, garante máxima corrente. A Figura 5.7 apresenta o teste sendo realizado.

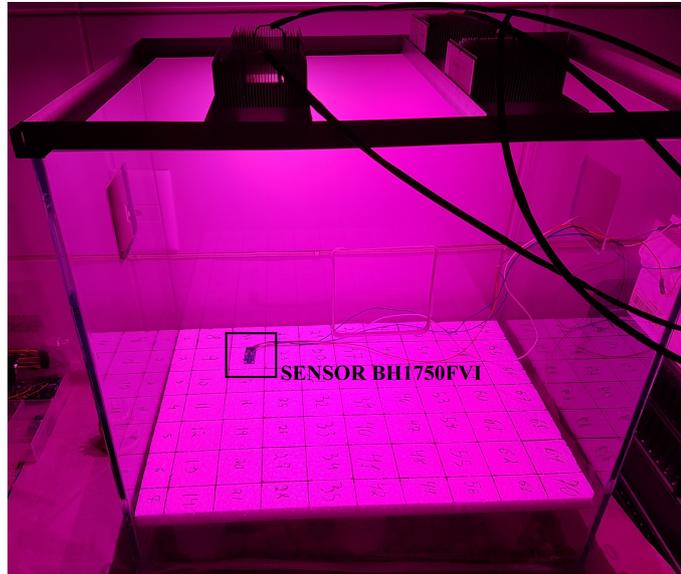


Figura 5.6: Teste de luminosidade

Para cada posição na placa obteve-se 15 medições, estas foram compiladas em uma tabela, e então foi calculada a média para cada uma. O resultado do teste pode ser resumido ao gráfico da Figura 5.7, em que se pode observar a iluminância pontual em toda a área do ambiente de cultivo.

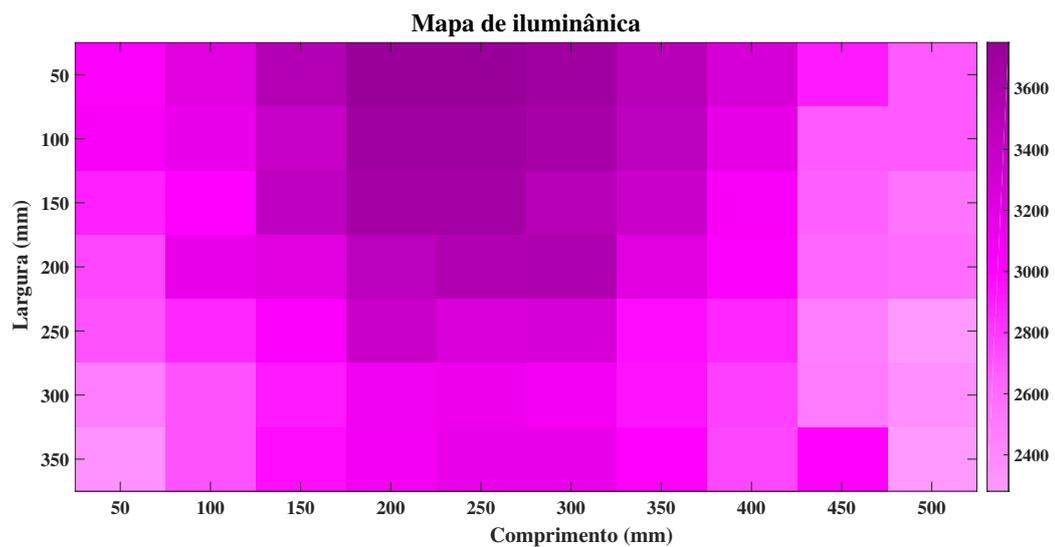


Figura 5.7: Mapa de iluminância

Pode-se notar que o menor valor encontrado foi de 2281 lx, na região mais a direita da estrutura. Esta quantidade está pouco acima do recomendado para cultura de vegetais folhosos, que é de 2000 lx. A área com maior iluminância encontra-se na parte inferior da estrutura, onde encontrou-se o valor de 3750 lx. Avaliando-se a área de plantio como um todo, verifica-se que a iluminância média é de 3061 lux, com desvio padrão de  $\pm 389$  lx.

Avaliou-se também a capacidade de variação do fluxo luminoso através de um teste qualitativo. Para tal definiu-se o sinal do PWM como com 0% do ciclo ativo, com 25%, 50% e com 75%. Como a lógica do circuito é inversa, quanto menor o ciclo ativo, maior a luminosidade. A Figura 5.8 apresenta o resultado deste teste.

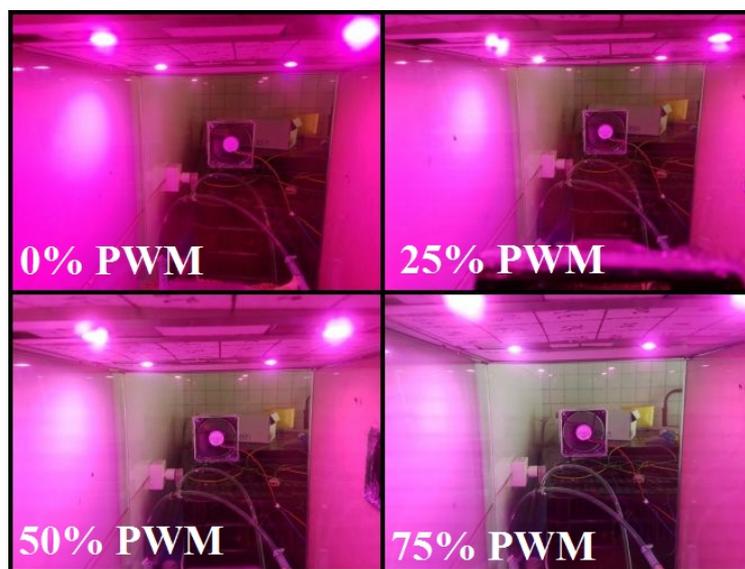


Figura 5.8: Teste de luminosidade

Pode-se observar que na imagem do canto superior esquerdo, que mostra o sistema com 0% de PWM, a iluminância é maior, sendo que o tom de magenta, que é a principal característica dos LEDs *full spectrum*, mostra-se mais forte. Já na imagem do canto inferior direito, relativa ao sinal com 75% do ciclo ativo, tanto a intensidade da luz, quanto o tom magenta mostram-se mais fracos.

## Considerações Finais

Analisando as premissas do projeto e realizando um comparativo com os resultados obtidos com a metodologia seguida, é possível apresentar as seguintes constatações.

### 6.1 Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um protótipo em escala de sistema de cultivo em ambiente controlado. O sistema apresentado visa ser uma solução para realização de estudos de aplicação de novas tecnologias para aprimoramento dos resultados da plantação, controlando certas variáveis ambientais.

Nesse trabalho de conclusão de curso foi fundamentado, projetado e construído o protótipo. Foram realizadas as especificações dos componentes necessários, definida a metodologia de atuação e realizada a programação do microcontrolador.

Em relação ao sistema de irrigação proposto, objetivava-se que este pudesse suprir as necessidades hídricas da plantação sem a necessidade de intervenção humana. Através dos testes realizados constatou-se que essa especificação foi atendida. Quando o sensor de umidade envia um sinal referente a solo seco, imediatamente as válvulas solenoides são acionadas, mantendo-se ligadas pelo tempo predeterminado. Observou-se nos testes realizados que a variabilidade de leituras do sensor utilizado é muito grande, não possibilitando um ajuste através de curva de calibração.

Em relação ao sistema de controle de temperatura pode-se verificar que o mesmo consegue elevar a temperatura interna do ambiente de cultivo em até 2°C acima da ambiente. Para o resfriamento obteve-se resultados similares, conseguindo-se resfriar o ambiente em 1°C. Ambos os resultados atestam que a utilização da pastilha de peltier para aquecimento ou resfriamento de grande volumes não é viável.

Embora a atuação por meio da pastilha não tenha obtido os resultados desejados, pode-se observar que a temperatura externa influenciou de maneira significativa os testes. Para evitar tais interferências é adequado que se modifique a estrutura para maior isolamento,

permitindo a troca de calor apenas por meio dos sistemas de controle.

O sistema de iluminação visava fornecer luz para as plantas durante um período pré determinado. Averiguou-se que esta especificação foi cumprida, sendo que os LEDs são acionados nos horários pré-programados. Em relação a iluminância, verificou-se que há variações consideráveis, ocorrendo “Hot spots” de iluminação. Tal característica se deve a dois principais motivos: Primeiramente os fotodiodos foram adquiridos de fornecedores diferentes, o que pode gerar pequenas diferenças no brilho. Também é uma causa contributiva a forma de acionamento em paralelo, pois a corrente enviada para cada LED pode variar.

Em suma, o protótipo construído foi capaz de agir sobre as variáveis ambientais propostas, porém o sistema de controle de temperatura não obteve os resultados desejados. Como todo o protótipo foi projetado pensando em possíveis modificações e incrementos, a troca do sistema de controle de temperatura, e a implementação de um sistema de isolamento térmico mais eficiente, se fazem viáveis em um futuro trabalho.

## 6.2 Propostas de continuidade

O desenvolvimento do projeto permitirá uma vasta lista de futuras implementações. Analisando a metodologia atual e a estrutura física desenvolvida, é possível apresentar algumas propostas para trabalhos futuros.

O primeiro aprimoramento proposto é a inserção do controle de mais variáveis. Neste trabalho abordou-se o controle de temperatura, iluminação e fornecimento de água. Outras variáveis como a umidade do ar, a concentração de  $CO_2$  e o Ph da terra influenciam amplamente no desenvolvimento vegetal. A implantação de uma estrutura de monitoramento e atuação sobre estas, pode gerar um grande impacto no aumento produtivo.

Propõe-se também o desenvolvimento de um sistema de controle MIMO, capaz de melhorar as respostas de todos os sistemas de controle e minimizar o gasto energético. Essa abordagem caracteriza pesquisa a nível do estado da arte do tema, sendo de imensa relevância.

Como já explanado na conclusão, o sistema de controle de temperatura proposto não apresentou os resultados desejados. Dessa forma o desenvolvimento de um sistema térmico de baixo custo, capaz de modificar de maneira efetiva a temperatura do interior do protótipo seria um grande aprimoramento.

Em relação a exibição e controle da informação, sugere-se o desenvolvimento de uma IHM (Interface Homem Máquina) que facilite a entrada dos parâmetros de controle. Tal sistema poderá ser um projeto IoT (*Internet of Things*), no qual os dados de diversos usuários poderão ser utilizados para otimização dos parâmetros de controle.

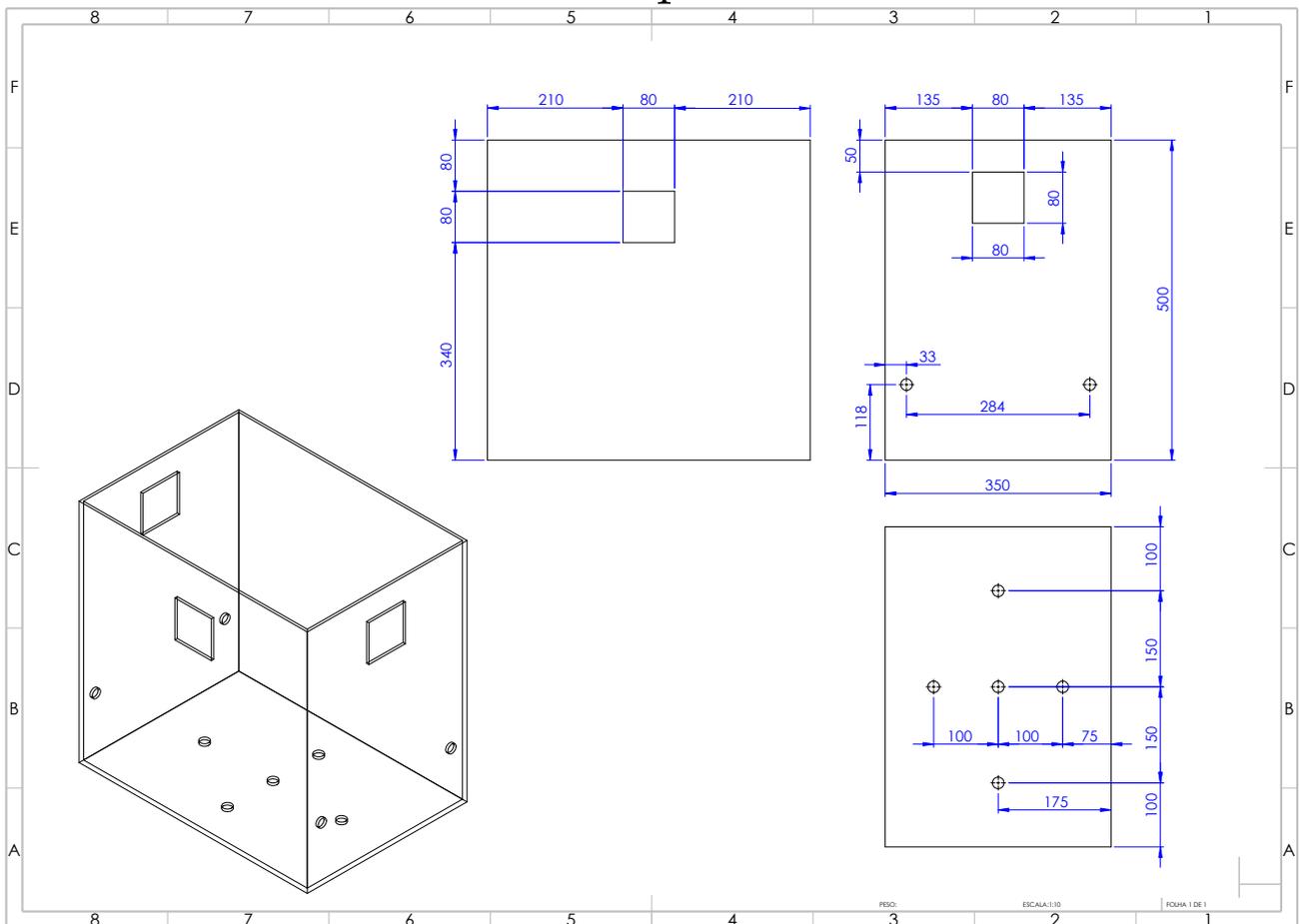
# Apêndice A

## Matriz de tomada de decisão

Matriz de tomada de Decisão TCC													
Critério	Peso	Temperatura interna		Umidade do solo		Umidade do ar		CO <sup>2</sup>		Velocidade do ar		Iluminação interna	
		nota	Ponderada	nota	Ponderada	nota	Ponderada	nota	Ponderada	nota	Ponderada	nota	Ponderada
Importancia para o crescimento	5	3	15	5	25	3	15	5	25	2	10	5	25
Importancia para a sobrevivencia	4	5	20	3	12	3	12	3	12	3	12	4	16
Relação com outras variáveis	3	4	12	4	12	3	9	4	12	3	9	3	9
Dificuldade de monitoramento	4	5	20	5	20	5	20	2	8	3	12	5	20
Dificuldade de atuação sobre a variável	5	4	20	4	20	4	20	2	10	4	20	4	20
Custo médio de sensores	3	4	12	5	15	4	12	2	6	4	12	5	15
<b>Total</b>			<b>99</b>		<b>104</b>		<b>88</b>		<b>73</b>		<b>75</b>		<b>105</b>

# Apêndice B

## Desenho estrutura de plantio



## Código de Controle

```
// TCC - Desenvolvimento de um sistema de cultivo em ambiente controlado
// Gustavo Barros Castro
// Divinópolis, Abril 2017

// Inclusão de Bibliotecas
#include "DHT.h"
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
#include <math.h>

// Definição de variáveis

// Sensor de temperatura e umidade 1
#define DHTPIN 2 // Pino Digital a ser utilizado para medicao
#define DHTTYPE DHT22 // Define que o sensor usado e o DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // Define para a biblioteca o pino e o sensor a
    serem utilizados

// Define RTC
RTC_DS3231 rtc; // Define novo objeto
char daysOfTheWeek[7][12] = {"Domingo", "Segunda", "Terca", "Quarta",
    "Quinta", "Sexta", "Sabado"};

int hora_prox; // declaracao de variavel para medir tempo
int minuto_prox; // declaracaode variavel para medir tempo
int segundo_prox; // declaracao de variavel para medir tempo

// Irrigação
#define sensor_um_solo A3 // seta sensor de umidade do solo no pino A3
int um_solo=0;
const int solenoide_1 = 24;
const int solenoide_2 = 26;
int dia_irrig=0;
```

---

```

int hora_irrig=0; // declaracao de variavel para medir tempo
int minuto_irrig=0; // declaracao de variável para medir tempo
int segundo_irrig=0; // declaracao de variavel para medir tempo
int hora_irrig_2=0; // declaracao de variavel para medir tempo
int minuto_irrig_2=0; // declaracao de variavel para medir tempo
int segundo_irrig_2=0; // declaracao de variavel para medir tempo
int hora_teste_irrig=0;
int minuto_teste_irrig=0;
int segundo_teste_irrig=0;
int periodo_espera = 0;
int solenoide_ligado_1 =0;
int solenoide_ligado_2 =0;
// Controle temperatura

const int sentido_peltier = 6; // Pino de escolha de sentido da ponte H (1
    esquentando, 0 esfria )
const int saida_peltier = 7; //Pino de saida PWM para a pastilha de peltier
int pwm_peltier = 0; // define que o pwm inicia com 0
int flag_aq = 0;
int flag_re=0;

const int Rele_vent_1 = 15; // Pino ligado ao cooler posicionado como exaustor
const int Rele_vent_peltier = A0; // pino ligado aos coolers de arrefecimento
    dos dissipadores do peltier
const int Rele_vent_2 = 14; // Pino ligado ao cooler posicionado como
    ventilador

// Iluminação

const int led1 = 8; // Pino ligado ao led 1
const int led2 = 9; // Pino ligado ao led 2
const int led3 = 11; //Pino ligado ao led 3
const int led4 = 12; //Pino ligado ao led 4

int pwm_led1 = 255; // inicia pwm do led 1 com valor 255 (desligado)
int pwm_led2 = 255; // inicia pwm do led 1 com valor 255 (desligado)
int pwm_led3 = 255; // inicia pwm do led 1 com valor 255 (desligado)
int pwm_led4 = 255; // inicia pwm do led 1 com valor 255 (desligado)

int leds_ligados=0;

File myFile;

void setup() {
Serial.begin(9600); // Baud rate
pinMode(10, OUTPUT);
digitalWrite(10, HIGH); // Se este pino estiver baixo o chip Wiznet corrompe o
    barramento SPI, necessario para usar cartao SD

```

---

```

while (!Serial) {
; // espera conexao da porta serial;
}

// Define os pinos como entradas e saídas

pinMode(sensor_um_solo, INPUT);
pinMode(sentido_peltier, OUTPUT);
pinMode(saida_peltier, OUTPUT);
pinMode(Rele_vent_1, OUTPUT);
pinMode(Rele_vent_peltier, OUTPUT);
pinMode(Rele_vent_2, OUTPUT);
pinMode(solenoide_1,OUTPUT);
pinMode(solenoide_2,OUTPUT);
pinMode(led1, OUTPUT);
pinMode(led2, OUTPUT);
pinMode(led3, OUTPUT);
pinMode(led4, OUTPUT);

Serial.println("Iniciando a leitura de dados");

// Inicializa sensores
dht.begin();
if (! rtc.begin()) {
Serial.println("RTC nao encontrado");
while (1);
}

if (rtc.lostPower()) {
Serial.println("Ocorreu falta de enrgia no RTC, e necessario redefinicao do
    horario");
}

Serial.print("inicializando cartao SD");

if (!SD.begin(4)) {
Serial.println("Falha na inicializacao!");
return;
}
Serial.println("Inicializacao completa");

// Le horario pela primeira vez
DateTime now = rtc.now();
int hora = now.hour();
int minuto = now.minute();
int segundo = now.second();

// seta gravacao no datalogger para o proximo minuto
hora_prox=hora;
minuto_prox=minuto+1;
segundo_prox=segundo;

```

---

```

hora_teste_irrig=hora;
minuto_teste_irrig=minuto+1;
segundo_teste_irrig=segundo;
}

void loop() {

String dataString = "";
DateTime now = rtc.now();
int dia = now.day();
int mes = now.month();
int ano = now.year();
int hora = now.hour();
int minuto = now.minute();
int segundo = now.second();

// Leitura do sensor de umidade e temperatura
// leitura gasta cerca de 250 milisegundos e pode pegar dados atrasados em
// mais de 2 segundos
float um_ar = dht.readHumidity(); // Le a umidade do ar e grava na variavel
float um_ar_1
float temp_ar = dht.readTemperature();// Le a temperatura do ambiente em graus
celsius e grava na variavel float temp_1
temp_ar=round(temp_ar);

// Verifica Leituras incorretas
if (isnan(um_ar) || isnan(temp_ar)) {
Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
return;
}
// Verifica o indice de calor(efeito da umidade relativa sobre a temperatura
// aparente do ar)em graus celsius
float ind_calor_1 = dht.computeHeatIndex(temp_ar, um_ar, false);

//Umidade do solo
um_solo = analogRead(sensor_um_solo);

//Atuação iluminacao

// Atuacao da temperatura (ver fluxo no texto)

if(flag_aq==1){
if (temp_ar < 25) {
pwm_peltier = 255;
analogWrite(sentido_peltier,255);
digitalWrite(Rele_vent_peltier, HIGH);
analogWrite(saida_peltier,pwm_peltier);
}
}

```

---

```

else if(temp_ar>=25){
analogWrite(sentido_peltier,0);
pwm_peltier = 0;
analogWrite(saida_peltier,pwm_peltier);
digitalWrite(Rele_vent_peltier, LOW);
flag_aq=0;
}
}
else if (flag_re==1){

if (temp_ar > 25) {
pwm_peltier = 255;
analogWrite(sentido_peltier,0);
digitalWrite(Rele_vent_peltier, HIGH);
analogWrite(saida_peltier,pwm_peltier);
}
else if(temp_ar<=25){
analogWrite(sentido_peltier,0);
pwm_peltier = 0;
analogWrite(saida_peltier,pwm_peltier);
flag_re=0;
}

}
else{

if(temp_ar<=23){

pwm_peltier = 255;
analogWrite(sentido_peltier,255);
digitalWrite(Rele_vent_peltier, HIGH);
analogWrite(saida_peltier,pwm_peltier);
flag_aq=1;
}
else if (temp_ar>=27){
pwm_peltier = 255;
analogWrite(sentido_peltier,0);
digitalWrite(Rele_vent_peltier, HIGH);
analogWrite(saida_peltier,pwm_peltier);
flag_re=1;
}
else if ((temp_ar >25) && (temp_ar<27)){
digitalWrite(Rele_vent_1,HIGH);
digitalWrite(Rele_vent_2, HIGH);
}

}

// Atuação sobre a irrigacao

```

---

```

if(periodo_espera==1){
if((hora==hora_teste_irrig)&&(minuto==minuto_teste_irrig)&&(segundo>=segundo_teste_irrig))
periodo_espera=0;
}
} //fim da comparacao se esta no periodo de espera
else{
if(solenoide_ligado_1==1){
if((hora==hora_irrig)&&(minuto==minuto_irrig)&&(segundo>=segundo_irrig)){
digitalWrite(solenoide_1,LOW);
digitalWrite(solenoide_2,LOW);
solenoide_ligado_1=0;
if (minuto>=55){
hora_teste_irrig=hora+1;
minuto_teste_irrig = minuto-55;
segundo_teste_irrig = segundo;
}
else{
hora_teste_irrig=hora;
minuto_teste_irrig = minuto+5;
segundo_teste_irrig = segundo;
}
periodo_espera=1;
}
} // FIM solenoide_ligado_1
else if(solenoide_ligado_2==1){
if((hora==hora_irrig_2)&&(minuto==minuto_irrig_2)&&(segundo>=segundo_irrig_2)){
digitalWrite(solenoide_1,LOW);
digitalWrite(solenoide_2,LOW);
solenoide_ligado_2=0;
if (minuto>=55){
hora_teste_irrig=hora+1;
minuto_teste_irrig = minuto-55;
segundo_teste_irrig = segundo;
}
else{
hora_teste_irrig=hora;
minuto_teste_irrig = minuto+5;
segundo_teste_irrig = segundo;
}
periodo_espera=1;
}
} //FIM solenoide_ligado_2

if(um_solo>700){
if ((hora>= 6)&&(hora<=18)){
if(dia_irrig==dia){
digitalWrite(solenoide_1,HIGH);
digitalWrite(solenoide_2,HIGH);
solenoide_ligado_1=1;
if ((minuto>=59)&&(segundo>=30)){

```

---

```

hora_irrig=hora+1;
minuto_irrig = 0;
segundo_irrig = segundo-30;
}
else{
hora_irrig=hora;
minuto_irrig = minuto;
segundo_irrig = segundo+30;
}
} // FIm condicional se tiver irrigado hoje e terra seca
else{
digitalWrite(solenoide_1,HIGH);
digitalWrite(solenoide_2,HIGH);
solenoide_ligado_2=1;
dia_irrig=dia;
if (minuto>=59){
hora_irrig=hora+1;
minuto_irrig = 0;
segundo_irrig = segundo;
}
else{
hora_irrig=hora;
minuto_irrig = minuto+1;
segundo_irrig = segundo;
}
} // FIm else se não tiver irrigado hoje e terra seca

} //Fim condição de estar dentro do horario
} //fim condição de umidade maior que 700
else if((um_solo>550) && (um_solo<700)){
if(dia_irrig!=dia){
digitalWrite(solenoide_1,HIGH);
digitalWrite(solenoide_2,HIGH);
solenoide_ligado_1=1;
dia_irrig=dia;
if ((minuto>=59)&&(segundo>=30)){
hora_irrig=hora+1;
minuto_irrig = 0;
segundo_irrig = segundo-30;
}
else{
hora_irrig=hora;
minuto_irrig = minuto;
segundo_irrig = segundo+30;
}
} // FIm condicao de solo entre 500 e 700 e ja tiver sido irrigado hoje

} // fim condicao de umidade entre 500 e 700

} //fim do else geral da leitura de umidade

```

---

```

// Atuacao sobre a iluminacao
//intervalo de horas para ligar os LEDs. fotoperiodo de 18 horas

if ((hora>= 4)&&(hora<=22)){
analogWrite(led1, 0);
analogWrite(led2, 0);
analogWrite(led3, 0);
analogWrite(led4, 0);
leds_ligados=1;
}
else{
analogWrite(led1, 255);
analogWrite(led2, 255);
analogWrite(led3, 255);
analogWrite(led4, 255);
leds_ligados=0;
}

if((hora==hora_prox)&&(minuto==minuto_prox)&&(segundo>=segundo_prox)){
dataString += "Temperatura: ";
dataString += String(temp_ar);
dataString += " - ";
dataString += "Umidade ar: ";
dataString += String(um_ar);
dataString += " - ";
dataString += "Umidade terra: ";
dataString += String(um_solo);
dataString += " - ";
dataString += "Status LEDs: ";
dataString += String(leds_ligados);
dataString += " - ";
dataString += "Ultima Irrigacao: dia ";
dataString += String(dia_irrig);
dataString += " as ";
dataString += String(hora_irrig);
dataString += ":";
dataString += String(minuto_irrig);
dataString += ":";
dataString += String(segundo_irrig);
dataString += " - ";
dataString += String(dia);
dataString += "/";
dataString += String(mes);
dataString += "/";
dataString += String(ano);
dataString += " - ";
dataString += String(hora);
dataString += ":";

```

---

```
dataString += String(minuto);
dataString += ":";
dataString += String(segundo);
dataString += ";";

// Abre o arquivo datalog.txt no cartao SD na na opcao de escrita
File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

// Se o arquivo estiver disponivel escreve nele os dados de datastring
if (dataFile) {
dataFile.println(dataString);
dataFile.close();
Serial.println(dataString); // Exibe no serial monitor os dados salvos no
    datalogger:
}
// Caso nao consiga abrir exibe mensagem de erro
else {
Serial.println("Erro ao abrir o arquivo datalog.txt");
}

// Seta o novo horario para salvar informacoes
if (minuto==59){
hora_prox=hora+1;
minuto_prox = 0;
segundo_prox = segundo;
}
else{
hora_prox=hora;
minuto_prox = minuto+1;
segundo_prox = segundo;
}
}

}
```

---

# Referências

- AGROJET. *Gotejador GA-2*. Disponível em [http://www.agrojet.com.br/produtos\\_detalhes.php?cat=51&l=br&pro=611](http://www.agrojet.com.br/produtos_detalhes.php?cat=51&l=br&pro=611) Acessado em: 17 Mar 2017.
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. *et al.* *World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision*. [S.l.]: ESA Working paper Rome, FAO, 2012.
- ANTLE, J. *Climate change may bring global food insecurity, impacts on U.S.* Disponível em <http://oregonstate.edu/ua/ncs/archives/2015/dec/osu-researcher-climate-change-may-bring-global-food-insecurity-impacts-us> Acessado em: 12 Mar 2017.
- BELTRÃO, N. E. M.; FILHO, J. F.; FIGUEIRÊDO, I. C. M. Uso adequado de casa de vegetação e de telados na experimentação agrícola. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [S.l.], v.6, n.3, p.547–552, 2002.
- BORIM, A. C. A.; PINTO, C. A. R. Medição de umidade no solo através de sensores capacitivos. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia*, [S.l.], v.1, n.1, p.51–60, 2015.
- BOZCHALUI, M. C.; CAÑIZARES, C. A.; BHATTACHARYA, K. Optimal Energy Management of Greenhouses in Smart Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, [S.l.], v.6, n.2, p.827–835, March 2015.
- BROWN, D.; CABBAGE, M.; MCCARTHY, L. *Analyses reveal record-shattering global warm temperatures in 2015*. Disponível em <https://climate.nasa.gov/news/2391/analyses-reveal-record-shattering-global-warm-temperatures-in-2015/> Acessado em: 12 Mar 2017.
- CONAB. *Indicadores da Agropecuária*. Brasília, Ano XXV, n. 12, Dezembro 2016.
- DE QUEIROZ, T. M.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A. Desenvolvimento de software e hardware para irrigação de precisão usando pivô central. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [S.l.], v.28, n.1, p.44–54, 2008.

- DESPOMMIER, D. *The vertical farm: feeding the world in the 21st century*. [S.l.]: Macmillan, 2010.
- DIAS, M. P. *Avaliação do emprego de um pré-regulador Boost de baixa frequência no acionamento de LEDs de iluminação*. 2012. Dissertação de mestrado apresentada ao programa de pós graduação em Engenharia Elétrica — Universidade Federal de Juiz de Fora.
- DOMINGUES, D. S. *et al.* Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and electronics in agriculture*, [S.l.], v.84, p.53–61, 2012.
- FILIFELOP. *Loja online*. Disponível em <http://www.filipeflop.com/> Acessado em: 17 Mar 2017.
- FONTES, P. Produção de hortaliças em ambiente protegido: uma técnica a ser aprendida. *Informe Agropecuário*, [S.l.], v.20, n.200/201, p.1–2, 1999.
- HANAN, J. J. *Greenhouses: advanced technology for protected horticulture*. [S.l.]: CRC press, 1998.
- INFOAGRO. *Control climatico de invernadores*. Disponível em [http://www.infoagro.com/industria\\_auxiliar/control\\_climatico.htm](http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm) Acessado em: 09 Mar 2017.
- ISHII, M. *et al.* Controlled Environment Agriculture for Effective Plant Production Systems in a Semiarid Greenhouse. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, [S.l.], v.50, n.2, p.101–113, 2016.
- JANSEN, R. *et al.* Automated signal processing applied to volatile-based inspection of greenhouse crops. *Sensors*, [S.l.], v.10, n.8, p.7122–7133, 2010.
- JENSEN, M. H. Controlled Environment agriculture in deserts, tropics and temperate regions-A World Review. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DESIGN AND ENVIRONMENTAL CONTROL OF TROPICAL AND SUBTROPICAL GREENHOUSES 578. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2001. p.19–25.
- KEENEY, R. L. Creativity in decision making with value-focused thinking. *Sloan Management Review*, [S.l.], v.35, n.4, p.33, 1994.
- LARANJEIRA, E. G. *Modelo computacional para supervisão e controle de casas de vegetação*. 2005. Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de pós graduação em Engenharia Agrícola — Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

- LIMA, V. A. A. *Estudo comparativo entre lâmpada com led de alta potência e lâmpadas comuns, considerando a viabilidade econômica*. 2013. Monografia apresentada ao Departamento de Eletrotécnica — Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- LLAMAS, M.; MARTINEZ-SANTOS, P. Significance of the Silent Revolution of intensive groundwater use in world water policy. *Water crisis: myth or reality*, [S.l.], p.163–80, 2006.
- MAHDAVIAN, M.; WATTANAPONGSAKORN, N. Optimizing PID controller tuning for greenhouse lighting control system by varying number of objectives. In: ELECTRICAL ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER, TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY (ECTI-CON), 2014 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2014. p.1–6.
- MATTSON, N. S.; ERWIN, J. E. The impact of photoperiod and irradiance on flowering of several herbaceous ornamentals. *Scientia Horticulturae*, [S.l.], v.104, n.3, p.275 – 292, 2005.
- MOLLE, F. Water for Food, Water for Life: a comprehensive assessment of water management in agriculture. *Natures Sciences Sociétés*, [S.l.], v.16, n.3, p.274–275, 2008.
- NGMA. *Environmental Controls*. Disponível em <https://www.ngma.com/standardpdf/Environmental2010.pdf> Acessado em: 18 Jan 2017.
- OLIVEIRA, K. S. M. d. *Avaliação numérica do desempenho termodinâmico de células termoelétricas*. 2014. Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de pós graduação em Engenharia Mecânica — Universidade Federal do Paraná.
- PEREIRA, G. A. *Sistema experimental de monitoramento e controle para casas de vegetação baseado em redes de controle distribuído LonWorks*. 2006. Dissertação de mestrado apresentada ao programa de pós graduação em Engenharia de Computação e Sistemas Digitais — Universidade de São Paulo.
- PMBOK, G. *Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK®)*. Em português. [S.l.]: Project Management Institute, Inc. EUA., 2008.
- POCOCK, T. Advanced lighting technology in controlled environment agriculture. *Lighting Research & Technology*, [S.l.], v.48, n.1, p.83–94, 2016.
- RADOJEVIĆ, N. *et al.* Microclimate control in greenhouses. *FME Transactions*, [S.l.], v.42, n.2, p.167–171, 2014.

- RATTIN, J. E.; ANDRIOLO, J. L.; WITTER, M. Acumulação de massa seca e rendimento de frutos de tomateiro cultivado em substrato com cinco doses de solução nutritiva. *Horticultura Brasileira*, [S.l.], v.21, n.1, p.26–30, 2003.
- REIS, N.; MAKISHIMA, N. Uma visão geral sobre as oportunidades com os cultivos protegidos diante das condições climáticas do Brasil. *EMBRAPA: Irrigação & Tecnologia Moderna*, Brasília, DF, n.52/53, p.13–17, 2001.
- SILVA, C.; ANDRADE JÚNIOR, A.; SOUZA, C. Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem. *Aplicações de Técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental*, [S.l.], v.1, p.25–45, 2008.
- SUPREM, A.; MAHALIK, N.; KIM, K. A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector. *Computer Standards & Interfaces*, [S.l.], v.35, n.4, p.355–364, 2013.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 3.ed. [S.l.]: Artmed, 2004.
- TERUEL, B. J. Controle automatizado de casas de vegetação: variáveis climáticas e fertigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi*, [S.l.], v.14, n.3, 2010.
- TSITSIMPELIS, I.; WOLFENDEN, I.; TAYLOR, C. J. Development of a grow-cell test facility for research into sustainable controlled-environment agriculture. *Biosystems Engineering*, [S.l.], v.150, p.40 – 53, 2016.
- YANG, M.-T.; CHEN, C.-C.; KUO, Y.-L. Implementation of intelligent air conditioner for fine agriculture. *Energy and Buildings*, [S.l.], v.60, p.364–371, 2013.

