



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**ELABORAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE CÂMARA DE CULTIVO  
AUTOMATIZADA PARA USO DOMÉSTICO**

Rodrigo Rezende Monteiro

Orientador: Dr. João José da Silva Júnior

BRASÍLIA – DF

ABRIL/2021



**RODRIGO REZENDE MONTEIRO**

**ELABORAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE CÂMARA DE CULTIVO  
AUTOMATIZADA PARA USO DOMÉSTICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentada à Banca Examinadora da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária como exigência final para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

**Orientador:** Dr. João José da Silva Júnior

BRASÍLIA – DF  
ABRIL/2021

## FICHA CATALOGRÁFICA

Monteiro, Rodrigo Rezende

Elaboração de um protótipo de câmara de cultivo automatizada para uso doméstico. / Rodrigo Rezende Monteiro; orientação de João José da Silva Júnior. – Brasília, 2021.

47 p.: il.

Trabalho de conclusão de curso de graduação – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2021.

### **Cessão de Direitos**

Rodrigo Rezende Monteiro

Título do Trabalho de Conclusão de Curso: Elaboração de um protótipo de câmara de cultivo automatizada para uso doméstico.

Ano: 2021

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

*Rodrigo Rezende Monteiro*

Rodrigo Rezende Monteiro

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: MONTEIRO, Rodrigo Rezende

Título: Elaboração de um protótipo de câmara de cultivo automatizada para uso doméstico.

Trabalho de Conclusão de curso submetido à faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de engenheiro agrônomo.

Aprovado pela comissão examinadora em 24/04/2021

Banca Examinadora

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Selma Regina Maggiotto  
Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - Universidade de Brasília/UnB

---

Dr. Juscimar da Silva  
Embrapa Hortaliças – Brasília/DF

---

Prof. Dr. João José da Silva Júnior  
Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - Universidade de Brasília/UnB

## **AGRADECIMENTOS**

A Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília pela oportunidade concedida à realização do curso de Agronomia.

Ao professor/orientador Dr. João José da Silva Júnior, pela imensurável atenção, paciência e disposição de ensinar e colaborar para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos André Marques e Ricardo Arôso, pela disposição e paciência de compartilhar seus conhecimentos na área de computação, sem os quais não seria possível a elaboração do presente trabalho.

A minha família, em especial Luciene Rosa, José Paulo Monteiro e Mariana Rezende que sempre demonstraram apoio incondicional durante o decorrer do curso e desse trabalho, sem o qual esse trabalho não deixaria o mundo das ideias.

Aos meus amigos, sempre presentes nos dias corridos e cheios, que os tornaram em boas risadas inesquecíveis.

## RESUMO

O cultivo de plantas pela população urbana é uma atividade com diversos benefícios tanto para os cultivadores quanto para os demais habitantes, entretanto demanda conhecimento e tempo para atender corretamente às necessidades da planta. A proposta de uma câmara de cultivo capaz de gerir tais necessidades viabiliza a expansão de hortas urbanas em diferentes espaços, independentemente do ambiente disponível e do nível de conhecimento técnico do cultivador. O presente trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um protótipo para cultivo capaz de prover um ambiente favorável para o desenvolvimento vegetal sem a interferência humana constante e de custo reduzido. O dispositivo foi construído a partir de uma caixa plástica com 40 cm (H) X 70 cm (C) X 51 cm (L), que recebeu revestimento térmico refletivo, sistema de arrefecimento, iluminação com lâmpadas de LED nas bandas azul e vermelho, sistema de hidroponia e automação baseada em Arduino. Os testes incluíram análises da radiação proveniente da luminária em diferentes pontos no interior do dispositivo, além da construção de perfis térmicos com o auxílio de ferramentas da geoestatística para aferição do funcionamento do sistema de arrefecimento. Os resultados obtidos demonstraram eficiência dos sistemas de iluminação e arrefecimento, que foram capazes de manter a temperatura na zona de desenvolvimento inferior às máximas e mínimas estabelecidas na programação do dispositivo, bem como o fornecimento de radiação em níveis favoráveis para o desenvolvimento vegetal, que foi demonstrado com o cultivo de *Lactuca sativa*. O custo estimado para o desenvolvimento foi de R\$980,00 o que demonstra a viabilidade econômica do equipamento.

Palavras-chave:

Automação, ambiente controlado, agricultura urbana, iluminação artificial.

## ABSTRACT

The plant cultivation by the urban population is an activity that brings various benefits for both for the growers and its neighbors, however, it takes time and knowledge to correctly attend the plant necessities. The proposal for a device capable of managing such needs enables the expansion of urban gardens in various spaces, regardless of the environment they offer or the grower's technical knowledge. The present article aimed the development of a low-cost device, that can provide a suitable environment for plant development without constant human interaction. The device was built from a plastic box with 40 cm X 70 cm X 51 cm, that received reflexive thermal insulation, a cooling system, LED lighting both in the blue and red band, hydroponics system and Arduino based automation. The tests included analysis of the LED radiation in various spots on the device's interior, as well as the construction of thermal profiles using geostatistics tools to check the cooling system and its functionality. The results obtained demonstrated the efficiency of the lighting and cooling systems, that could maintain the temperature at the growing zone between the maximum and minimum established, as well as an adequate radiation flux for the plant development, that was demonstrated by the cultivation of *Lactuca sativa*. The estimated cost for such device lays around BRL 980.00, demonstrating the device's economic viability.

Key words:

Automation, controlled environment, urban agriculture, artificial lighting.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>9</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>9</b>
<b>3.1 Histórico das câmaras para cultivo de plantas.....</b>	<b>9</b>
<b>3.2 Características de uma câmara de cultivo.....</b>	<b>13</b>
<b>3.3 Radiação.....</b>	<b>14</b>
3.3.1 Iluminação artificial em plantas.....	15
<b>3.4 Temperatura.....</b>	<b>16</b>
3.4.1 Métodos para o controle da temperatura em ambiente protegido.....	17
<b>3.5 Métodos de cultivo hidropônicos.....</b>	<b>17</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>18</b>
<b>4.1 Construção do dispositivo.....</b>	<b>18</b>
<b>4.2 Montagem do sistema de iluminação.....</b>	<b>20</b>
4.2.1 Testes de luz.....	21
<b>4.3 Montagem do sistema de arrefecimento.....</b>	<b>21</b>
<b>4.4 Montagem do sistema hidropônico.....</b>	<b>23</b>
4.4.1. Solução nutritiva.....	24
<b>4.5 Montagem da central de controle.....</b>	<b>25</b>
<b>4.6. Investigação da temperatura.....</b>	<b>26</b>
4.6.1 Montagem dos perfis de temperatura.....	28
4.7 Análise do desenvolvimento vegetal.....	29
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>29</b>
<b>5.1 Temperatura.....</b>	<b>29</b>
5.1.1 Vazão do sistema de exaustão.....	29
5.1.2 Eficiência do sistema de arrefecimento.....	30
5.1.3 Perfis térmicos.....	32
<b>5.2 Desenvolvimento vegetal.....</b>	<b>39</b>
<b>5.3 Análise de luz.....</b>	<b>42</b>
<b>5.4 Custos.....</b>	<b>43</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>44</b>
<b>7. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O avanço da agricultura nas últimas décadas culminou na obtenção de técnicas de cultivo avançadas e de alta eficiência, fazendo o uso de sistemas automatizados e sensoriamento digital para o uso mais eficiente da terra, características da agricultura de precisão (KING et al., 2017).

Paralelo ao avanço da agricultura rural e da urbanização, houve o desenvolvimento e aperfeiçoamento da agricultura urbana sendo caracterizada pelo aproveitamento de espaços ociosos em ambientes urbanos (CHEEMA et al., 1996).

Comumente, a agricultura urbana em espaços restritos visa suprir a necessidade individual do cultivador, sendo conduzida como um *hobby* para a produção de plantas herbáceas de pequeno e médio portes e utilização de suas folhas, flores ou frutos na culinária e medicina tradicional, além de possuir papel terapêutico para muitos de seus praticantes.

Em países como a Rússia e a França, a agricultura urbana é incentivada pelas autoridades locais, que reconhecem os benefícios que espaços dedicados à agricultura urbana trazem para as cidades, que incluem a melhoria do micro-clima, melhora na saúde mental e redução do estresse entre seus praticantes (BOUKHARAEVA et al., 2005).

Um obstáculo para a expansão da agricultura em grandes centros urbanos é a indisponibilidade de áreas adequadas, fazendo com seja propagada em ambientes restritos e desfavoráveis para o desenvolvimento vegetal como cômodos mal iluminados, janelas ou estantes, exigindo a elaboração de soluções engenhosas relacionadas à automação e robótica que se adequem à realidade do cultivador, demandando tecnologia, e conhecimento para sua adoção.

Entretanto, um gargalo para o avanço no uso da tecnologia no cultivo urbano em pequenos espaços é a dificuldade para se obter a preços razoáveis, sensores e acionadores adequados, de fácil uso e implementação; muitas vezes o cultivador amador abre mão do emprego de tecnologias mais eficientes por falta de conhecimentos aprofundados nas áreas de automação e agronomia.

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento e a análise de um protótipo de um dispositivo capaz de controlar principais fatores relacionados ao desenvolvimento vegetal, avaliando a eficiência e custo do sistema além de sua acessibilidade.

Para atender ao objetivo do estudo, a pesquisa foi estruturada em quatro seções. A primeira compreende a fundamentação teórica, abordando as principais teorias acerca dos fatores ambientais que influenciam no crescimento vegetal; a segunda trata da metodologia de pesquisa e desenvolvimento do projeto; na terceira seção são analisados os dados e informações levantados e observados durante o desenvolvimento da pesquisa; a última apresenta as conclusões finais do estudo, bem como propostas para estudos futuros.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Histórico das câmaras para cultivo de plantas

O fenótipo de um material vegetal é o resultado da interação de sua carga genética com o ambiente, onde condições menos favoráveis dificultam a expressão do máximo potencial produtivo contido no genoma do material (TAIZ; ZEIGER, 2017). Dessa forma, a criação de um dispositivo capaz de simular diferentes condições ambientais proporciona a obtenção de dados acerca da melhor combinação entre fatores ambientais e genéticos para melhor desenvolvimento vegetal (MUNNS, 2017).

As primeiras tentativas bem sucedidas de se criar um dispositivo capaz de simular condições ambientais ocorreram no início do século XX, com a tecnologia que se chamaria *phytotron*. O primeiro *phytotron* foi desenvolvido por Fritz Went e Henry Eversole em 1949, no Instituto Californiano de Tecnologia (Caltech), possuía o tamanho de um pequeno prédio e diversas câmaras de crescimento com diferentes condições ambientais sendo simuladas ao mesmo tempo (MUNNS, 2017).

Com a evolução da tecnologia e seus avanços, a tecnologia *phytotron* tornou-se cada vez mais compacta, sendo possível encontrar modelos menores em que a tecnologia é aplicada em cabines e casas de vegetação.

Porém, esses dispositivos ainda possuem um elevado custo de aquisição, são relativamente grandes, necessitando de espaços dedicados às instalações e tendem a ser encontrados apenas em instituições de pesquisa e ensino, estando distantes do consumidor doméstico (MAUNEY, 2002) (KATAGIRI et al., 2015).

Em sua patente, (Mauney, 2002), descreve a criação de um dispositivo barato capaz de maximizar o desenvolvimento vegetativo de plantas cultivadas em sistema hidropônico (Figura 1), fazendo o uso de componentes para o controle dos diferentes fatores envolvidos no desenvolvimento vegetal.

(Silva, 2020), desenvolveu uma câmara semelhante à proposto por Mauney, obtendo resultados positivos para a produção de um protótipo de baixo custo capaz de controlar o ambiente de cultivo em solo preparado.



Figura 1- Dispositivo automatizado de cultivo de plantas. Fonte: Mauney (2002).

Os protótipos sugeridos por Mauney e Silva possuem a característica de serem pequenas unidades com acoplamentos de controle de ambiente modulares, podendo contar com maior nível de automação e controle conforme a necessidade do usuário, porém com pouca possibilidade de expansão da

câmara de crescimento, ficando restrita ao volume interno do cilindro utilizado para sua elaboração.

Em um outro protótipo, desenvolvido por Katagiri et al. (2015), os autores utilizaram equipamentos existentes no mercado e os adaptaram para cumprir funções relativas ao controle ambiental dentro de uma câmara constituída por estantes de aço revestidas por material isolante, no intuito de obter uma câmara de cultivo com menor custo de obtenção.

Foi constatado que fazendo o uso de ventiladores, movelaria simples, lâmpadas fluorescentes, umidificadores e um sistema de ar condicionado residencial conectados a um micro controlador, é possível a obtenção de um *phyotron* de baixo custo adequado para pesquisas científicas (KATAGIRI et al., 2015).

No cenário brasileiro comumente encontram-se aparatos de cultivo *indoors* compostos por esqueletos rígidos recobertos por lonas de material isolante e alumínio, formando cabines de tamanhos variáveis, que possuem espaços para o acoplamento de ventiladores, luminárias e termostatos (SILVA, 2020).

Apesar de oferecerem uma gama de possibilidades no que tange aos acoplamentos possíveis, além de preços variando entre R\$780,00 até cerca de R\$2000,00 conforme o tamanho da estrutura, tais cabines, referenciadas na Figura 2, ainda carecem de micro controladores capazes de gerir o funcionamento adequado de todos os acoplamentos para que funcionem em conjunto, manejando as condições ambientais conforme a necessidade da cultura ou do cultivador.

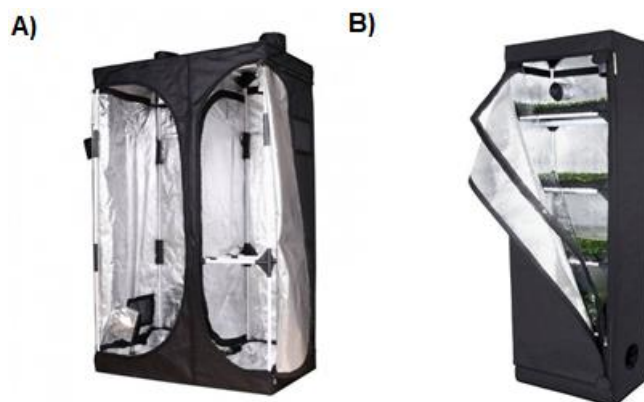


Figura 2 - Dispositivos de cultivo encontrados no mercado brasileiro. A) ProBox, aproximadamente R\$ 1000,00 ; B) Garden Hipro, aproximadamente R\$ 780,00. Fonte: <https://cityfarmers.com.br>; <https://www.megagrow.com.br> (2020).

Em contrapartida, no mercado dos equipamentos importados é possível encontrar dispositivos automatizados capazes de gerir as condições ambientais de forma eficiente, como oferecidas pela israelita Seedo e norte-americana Grobo, apresentadas na Figura 3, ambas com produtos custando em torno de US\$2000,00 US\$3000,00 ou R\$10000,00 à R\$15000,00 em conversão direta (cotação do dólar em 2020 = 5 reais).



Figura 3- Produtos importados. a) Seedo, custo aproximado de R\$12000,00 b) GroboPremium, custo aproximado de R\$11500,00. Fonte: <https://www.seedolab.com>; <https://www.grobo.io> (2020).

Apesar de oferecerem produtos de alta qualidade e de fácil uso, o alto valor de aquisição desses produtos é um fator limitante para o mercado brasileiro (SILVA, 2020). Assim, hobbistas ou cultivadores de hortas em pequenos espaços se veem pouco inclinados a investir em tais equipamentos

### 3.2 Características de uma câmara de cultivo

Quando cultivadas a campo, as plantas são organismos capazes de converter radiação solar em carboidratos por meio da fotossíntese a partir de dióxido de carbono extraído por trocas gasosas com a atmosfera, água e nutrientes captados pelas raízes (RAVEN et al., 2001) (TAIZ; ZEIGER, 2017).

A sequência de reações que compõem da fotossíntese ocorre por meio da atuação de diversas enzimas, sendo sua atividade regulada por fatores como a

temperatura, possuindo uma faixa de atuação entre 10 e 40°C (RAVEN et al., 2001).

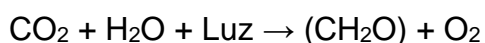
Dessa forma, um dispositivo para o cultivo de plantas deve suprir em quantidades suficientes e em faixa de temperatura adequada, a demanda por energia luminosa, água e nutrientes, além de garantir as trocas gasosas para a fotossíntese (SILVA, 2020).

### 3.3 Radiação

A radiação proveniente do sol possui uma distribuição espectral com comprimentos de onda entre 300 e 2500 nm, sendo o espectro de luz visível contido na faixa que vai de 400 a 750 nm (TAIZ; ZEIGER, 2017).

A captura e canalização da energia da luz solar pelos cloroplastos, que a emprega nas vias fotossintetizantes para a produção de açúcares é o processo pelo qual toda a energia presente na biosfera terrestre se originou (RAVEN et al., 2001).

A equação geral da fotossíntese é descrita a seguir:



Onde CH<sub>2</sub>O representa uma unidade de carboidrato.

Os pigmentos presentes nos cloroplastos são capazes de absorver a energia luminosa e entrar em um maior estado de excitação, liberando a energia absorvida na forma de calor, fluorescência ou reações fotoquímicas (TAIZ; ZEIGER, 2017).

O espectro de radiação visível compreendido entre os valores que vão de 400 nm à 700 nm é denominado de espectro de radiação fotossinteticamente ativa, ou PAR (do inglês *photosynthetic active radiation*), capaz de ser absorvida e utilizada nas reações fotossintéticas (FLUENCE, 2020).

O principal pigmento contido no cloroplasto é a clorofila, que absorve fortemente a energia luminosa do espectro azul (cerca de 430 nm) e do espectro

vermelho (cerca de 660 nm) enquanto o espectro verde e amarelo sofre pouca absorção e é refletido (TAIZ; ZEIGER, 2017).

Outra medida importante para a avaliação da iluminação empregada no cultivo de plantas é a Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos, DFFF, ou PPF (do inglês *photosynthetic photon flux density*), que quantifica as medidas instantâneas da PAR, fornecendo a medida de fótons fotossinteticamente ativos em uma unidade de área por uma unidade de tempo, usualmente  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}$ . Assim, a DFFF é uma medida com maior precisão quando se considera fontes luminosas com diferentes distribuições espectrais (FLUENCE, 2020) (SILVA, 2020).

### 3.3.1 Iluminação artificial em plantas

A iluminação artificial pode ser utilizada tanto para suplementação quanto para fornecimento integral da radiação necessária para o cultivo de plantas em salas de crescimento, visando estimular a fotossíntese, crescimento vegetativo, floração e produção de frutos (TAVARES, 2018).

Para tal, um sistema de iluminação artificial deve ter a distância ajustável em relação ao dossel da planta, controle de fotoperíodo e emissão de luz em um espectro eletromagnético condizente com a absorção e necessidade da planta (TAVARES, 2018).

Em seu experimento Pinho et al. (2008) cultivaram alface (*Lactuca sativa var. crispata*) sob luminárias de sódio de alta pressão e luminárias de LED (do inglês *light-emitting diodes*) azul e vermelho, obtendo plantas com maior acúmulo de massa seca, maiores níveis de atividade fotossintetizante e menor uso de energia elétrica quando comparadas às cultivadas sob lâmpadas de sódio. Além disso, o sistema de iluminação com LED teve menor efeito no incremento da temperatura ambiente, possibilitando a aproximação da luminária em relação à planta, consistindo um fator importante para cultivos em pequenos espaços.

Apesar de terem um maior custo inicial, o uso de iluminação baseada em LED oferece a vantagem de um menor consumo de energia e maior longevidade

das luminárias, além da possibilidade de refinar o espectro de emissão de luz para a realização da fotossíntese (ALMEIDA, 2014).

### 3.4 Temperatura

A temperatura do ar afeta diretamente a fenologia das plantas: temperaturas mais altas aceleram o ciclo de desenvolvimento vegetal e temperaturas mais baixas o prolongam (BERGAMASCHI, 2007).

Muitos processos fisiológicos são afetados pela variação de temperatura, ocorrendo entre 0 e 40 °C, sendo as espécies nativas de zonas temperadas capazes de apresentar divisão e expansão celular nos órgãos vegetativos em temperaturas anteriores a 10°C, enquanto em plantas tropicais esse crescimento não ocorre abaixo de 12 a 15 °C. A temperatura ótima na qual o crescimento se dá mais rapidamente em plantas tropicais situa-se entre 30 e 40 °C, enquanto nas demais espécies, de 15 a 30 °C (LAISK et al., 2005; apud RODRIGUES, 2012).

As temperaturas mínimas, máximas e ótimas para o desenvolvimento de uma planta são chamadas temperaturas cardiais ( $T_{min}$ ,  $T_{opt}$ ,  $T_{max}$ , respectivamente). Assim, o desenvolvimento vegetal aumenta vagarosamente conforme a temperatura ascende partindo de  $T_{min}$ , passando para uma resposta linear conforme temperaturas medianas são atingidas até alcançarem maiores níveis aproximando-se de  $T_{opt}$ . Uma vez que a temperatura ultrapassa  $T_{opt}$ , a resposta diminui, cessando ao atingir  $T_{max}$  (STRECK, 2004).

Com base nas informações sobre as temperaturas cardiais, é possível calcular a soma térmica, que consiste no acúmulo de graus-dia, que podem ser calculados pela soma das diferenças entre as temperaturas médias diárias do ar e a temperatura base inferior de uma espécie (BERGAMASCHI, 2007).

A soma térmica baseada em graus-dia é uma ferramenta que auxilia no planejamento do plantio e colheita (PEDRO JUNIOR et al., 1977). Assim, o conhecimento acerca da soma térmica exigida pela planta cultivada bem como a capacidade de adequação do ambiente de cultivo gera a possibilidade de



prolongar a permanência de uma planta no cultivo e a obtenção de resultados melhores.

#### 3.4.1 Métodos para o controle da temperatura em ambiente protegido

O controle da temperatura do ar no interior de casas de vegetação é fundamental para favorecer o desenvolvimento da cultura, sendo as técnicas mais utilizadas baseadas em sombreamento, ventilação e evaporação, podendo ser aplicadas sozinhas ou em conjunto (MONTERO et al., 1990).

As trocas gasosas que as folhas das plantas exercem com a atmosfera, além de serem a forma como a planta obtém o CO<sub>2</sub>, também auxiliam no controle da temperatura da folha, em que concomitantemente à abertura dos estômatos para a entrada de gases atmosféricos, também ocorre a liberação de vapor de água, que auxilia no resfriamento da folha e do ar em contato com a superfície foliar por meio da troca de calor entre o vapor de água e o ar (ANGELOCCI 2002).

De forma semelhante, o uso de umidificadores aliados à ventilação se mostra um método eficaz de redução da temperatura no interior de casas de vegetação (FURLAN; FOLEGATTI, 2002; AL-JAMAL, 1994). As vantagens de se utilizar sistemas baseados em ventilação em conjunto com a evaporação incluem, além do baixo custo e simplicidade, o fornecimento de CO<sub>2</sub> atmosférico para as trocas gasosas feitas pelas plantas durante a fotossíntese.

### 3.5 Métodos de cultivo hidropônicos

O termo hidroponia tem origem na junção das palavras gregas *hydro* = água e *ponos* = trabalho. A técnica é baseada no cultivo de plantas sem solo, fornecendo nutrientes dissolvidos em uma solução nutritiva em contato com o sistema radicular das plantas. Apesar de ser uma técnica datada desde os jardins da Babilônia, só ganhou relevância na produção agrícola moderna a

partir da década de 1980, permitindo o cultivo em áreas onde o solo é de difícil correção (CARRIJO; MAKISHIMA, 2000).

Conforme a hidroponia comercial foi sendo adotada pelos agricultores, diferentes técnicas de cultivo sem solo foram criadas e adotadas, nas quais as técnicas que empregam o fluxo laminar de nutrientes, cultivos em bandejas flutuantes e cultivo em substratos inertes são as mais populares atualmente (FURLANI et al., 2009).

Apesar das diferenças estruturais presentes entre as técnicas hidropônicas, os sistemas dependem de componentes básicos semelhantes que incluem um sistema hidráulico para a circulação da solução nutritiva, reservatório de solução e tubulação de transporte. O funcionamento se dá pelo bombeamento da solução do tanque até as raízes das plantas, que após banhar as raízes, retorna ao reservatório (FURLANI et al., 2009).

Para o cultivo em ambiente totalmente controlado, as principais vantagens do cultivo hidropônico incluem a redução do ciclo da cultura, maior controle fitossanitário e possibilidade de controlar as doses de nutrientes com maior precisão. Tais vantagens possuem contrapontos, sendo os principais limitantes da hidroponia, a necessidade de acompanhamento do sistema, contaminação da solução, custo elevado de implementação e rápidas perdas por quebra no fornecimento de energia para o sistema (NETO; BARRETO, 2012).

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Construção do dispositivo**

O dispositivo foi construído utilizando-se como base uma caixa plástica com 40 cm de altura, 70 cm de comprimento e 51 cm de largura. A caixa teve seu interior e exterior revestidos com espuma aluminizada para garantir isolamento térmico e reflexão da luz emitida pela luminária no interior.

Em seguida, foram abertos três furos com diâmetro de 42 mm em uma das laterais da caixa para a passagem da tubulação do sistema hidropônico e do

condutor de névoa do umidificador. Também foram feitos 6 furos menores com cerca de 20 mm nas demais laterais para a entrada de ar externo.

Na tampa, uma abertura quadrada com 8 cm de lado serviu para o acoplamento do exaustor utilizado, bem como outros dois furos menores para a passagem de cabos relativos a sensores e fornecimento de energia para a luminária, além do pino rosqueado de sustentação dela.

Os circuitos controladores foram acomodados dentro de uma caixa plástica para proteção, que em seguida foi parafusada à tampa da câmara. O manuseio e observação das plantas no interior da câmara foi feito por uma janela de 55 x 24 cm, aberta em uma das laterais para permitir a observação do cultivo e manuseio das plantas e sensores no interior, além de adicionar um fator estético atraente ao usuário.

O fechamento da janela foi feito por uma cortina transparente que se prendia à face externa da parede da câmara, para funcionar como refletor e impedir trocas de calor e perdas no sistema de iluminação, uma segunda camada feita com o mesmo revestimento interno da câmara podia ser colocada sobre a cortina transparente, também fixada com o auxílio de tiras de velcro.

Na Figura 4, observa-se a câmara de cultivo com sua tampa aberta e visão da parte superior da tampa, janela de manuseio sem proteção e com a calha de hidroponia devidamente posicionada, fora de funcionamento.



Figura 4 – Câmara de cultivo. 1 à 6- aberturas na calha de cultivo para plantio; 7- luminária; 8- abertura para exaustão; 9- furos para entrada de ar; 10- central controladora com pontos de energia acionados por relés; 11- exaustor; 12- pino de ajuste da altura da luminária; 13- fonte de alimentação da luminária.

## 4.2 Montagem do sistema de iluminação

O sistema de iluminação foi elaborado visando à flexibilidade em relação à composição do espectro de luz fornecida, onde foram utilizados LEDs nas cores vermelho e azul monocromáticos (460/470 e 620/630 nm, respectivamente) com potência nominal de 3W por diodo. Ao todo, foram utilizados 18 LEDs, totalizando 52W.

Os LEDs utilizados foram distribuídos e colados em uma barra retangular de alumínio de 30 cm de comprimento e 5 cm de largura, que funcionou como dissipador de calor para o conjunto de diodos, os quais foram fixados com uma mistura de cola epóxi e pasta térmica para garantir a condutividade de calor entre os diodos e a barra de alumínio. Ainda na Figura 4, é possível conferir a luminária.

A luminária foi mantida na altura desejada com auxílio de um pino rosqueado, indicado na Figura 4, que foi preso à luminária e teve seu ajuste feito por meio de um parafuso borboleta na parte superior da tampa da câmara.

Para o fornecimento de energia, foi utilizada uma fonte adequada para o número de LEDs ligados em série, a alimentação da fonte foi conectada à um relé controlado pela central de controle, que por sua vez, liga e desliga de forma automática o conjunto com base na programação feita pelo usuário, o esquemático do circuito da luminária pode ser observado na Figura 5.

A proporção entre os LEDs vermelho e azul utilizada foi de 2:1, sendo 12 vermelhos e 6 azuis, sendo possível que o usuário a mude conforme a necessidade da cultura, destacando os LEDs instalados e substituindo-os.

Durante a condução dos testes, a luminária foi mantida na altura máxima possível, ficando em contato direto com a face interior da tampa do dispositivo, totalizando uma altura de 38 cm entre os LEDs e a superfície inferior da câmara.

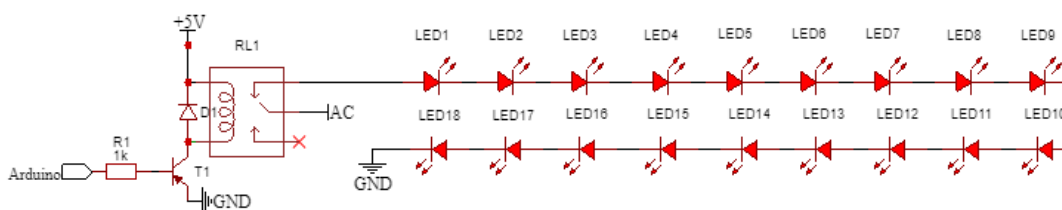


Figura 5 - Esquemático do circuito da luminária.

#### 4.2.1 Testes de luz

Para investigar a qualidade e uniformidade da iluminação recebida em diferentes pontos no interior da câmara, um piranômetro da marca Spectrum 2900ET foi utilizado.

O piranômetro foi posicionado nas 6 localizações previstas para plantio de mudas, em cada posição anteriormente descrita foram coletadas informações com diferentes ajustes da luminária, que ficou em 3 posições de ajuste: Altura máxima, mínima e mediana.

Os valores de irradiância medidos foram convertidos em densidade de fluxo fótons fotossintéticos (DFFF) por meio da equação de Planck-Einstein:

$$E = hf$$

Onde a energia de um fóton é representada por  $E$ ,  $h$ , a constante de Planck e  $f$ , o comprimento de onda emitido.

O uso de um piranômetro ao invés de um sensor quântico, se mostrou adequado visto que as bandas luminosas utilizadas eram previamente conhecidas (470 e 630 nm), dessa forma toda a radiação medida se qualifica como radiação fotossinteticamente ativa.

Ao final de 3 repetições obtiveram-se 18 médias, que foram tabeladas para análise.

### 4.3 Montagem do sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento escolhido foi baseado em trocas de calor entre o ar interno, externo e vapor de água no ambiente. Contou com um umidificador ultrassônico ligado à câmara por um duto condutor, aberturas circulares na base da câmara para a entrada de ar externo e névoa vinda do umidificador, além de um exaustor na porção superior do dispositivo.

O acionamento do sistema foi ajustado para manter a umidade relativa do ar entre 65 e 75%, sendo a ativação do umidificador feita automaticamente por um relé com base na medida de umidade relativa coletada pelo sensor no interior da câmara, enquanto o ventilador responsável pela exaustão foi programado para ser acionado sempre que o sistema de iluminação fosse ligado ou a temperatura interna da câmara superasse a temperatura máxima desejada para a cultura, sendo desligado sempre que a temperatura interna atingisse a temperatura mínima da cultura.

A velocidade do ar na saída do exaustor foi medida por um termo anemômetro modelo 003790 da marca B-MAX (Figura 6B) em quatro pontos distintos, a média da velocidade foi então utilizada para o cálculo da vazão por meio da equação 1:

$$Q = A * v \quad (1)$$

Onde Q indica a vazão em m<sup>3</sup>s, v, a velocidade média aferida na saída do exaustor em m/s e A corresponde a área de passagem do ar na saída do exaustor em m<sup>2</sup>, dada pela equação 2:

$$A = \pi(r^2_{maior} - r^2_{menor}) \quad (2)$$

Onde  $r^2_{maior}$  corresponde ao raio da coroa maior demarcada em vermelho opaco na Figura 6A e  $r^2_{menor}$  corresponde ao raio da coroa menor demarcada na mesma figura com tom avermelhado mais intenso.

Sabendo-se o volume aproximado do interior da câmara de cultivo, podemos determinar o tempo necessário para que ocorra uma renovação completa do ar no interior da câmara por meio da equação 3:

$$n = V/Q \quad (3)$$

Onde  $n$  indica os segundos exigidos para cada renovação completa de ar e o volume interno da câmara em  $m^3$  é representado por  $V$ .

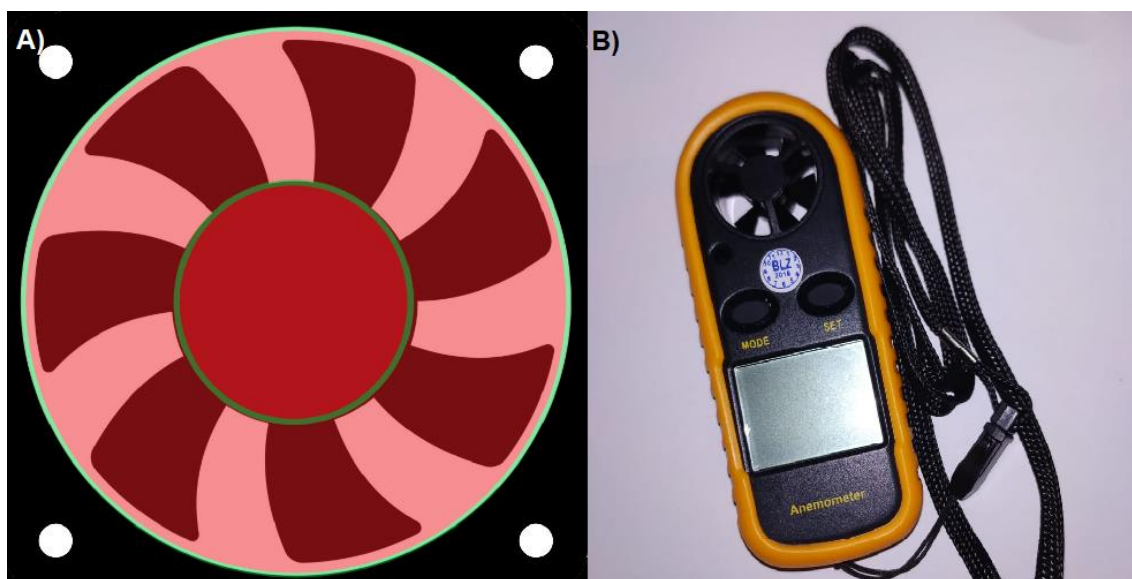


Figura 6 - A) representação do exaustor utilizado. B) Anemômetro utilizado para aferição.

#### 4.4 Montagem do sistema hidropônico

Para garantir um sistema de cultivo livre da maior quantidade possível de fatores limitantes ao desenvolvimento vegetal, juntamente com a racionalização do espaço interno do dispositivo, optou-se pela utilização de um sistema hidropônico.

O sistema implementado foi composto por uma calha de cultivo em “U”, onde a tubulação de admissão de solução e de saída ficaram lado a lado; foram feitos um total de 6 furos para o posicionamento de cestos contendo as mudas das plantas já estabelecidas.

O reservatório de solução nutritiva foi feito a partir de um balde alimentício de 12 litros, em sua tampa foi aberto um recorte com tamanho adequado para

a passagem das mangueiras de saída e retorno de solução circulada, bem como da fiação de acionamento da bomba circuladora.

A Figura 7 apresenta uma ilustração da calha de cultivo elaborada para a estufa de cultivo, onde “A” indica o reservatório de solução nutritiva; “B”, a calha de cultivo e “C” indica um dos 6 furos feitos para a inserção de cestos de hidroponia contendo mudas. Além disso, a seta vermelha indica a saída de solução nutritiva, impulsionada pela bomba (representada por um quadrado azul) e a seta verde, o retorno de solução recém circulada.

O acionamento da bomba foi confeccionado de forma automática por meio de relés conectados ao controlador do sistema, o funcionamento da bomba hidráulica seguiu um regime onde após 5 minutos de acionamento, era desligada por 10 minutos, antes de ser ligada novamente.

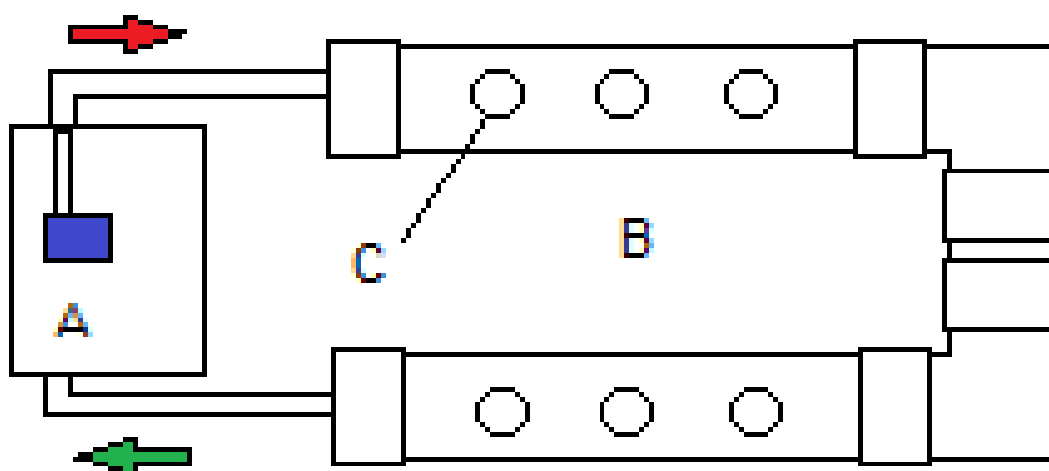


Figura 7 - Esquemático da calha de cultivo. A) Reservatório de solução. B) Calha de cultivo. C) Furo para posicionamento de mudas.

#### 4.4.1 Solução nutritiva

Para a realização do cultivo, foi utilizado um kit para preparo de solução nutritiva da marca *Hobby Verde* elaborada para hortaliças folhosas, composto por; 9,35% nitrato de potássio, 23,36% sulfato de magnésio, 12,62% fosfato



monoamônico, 51,87% nitrato de cálcio, 1,40% ferro quelatizado e 1,40% coquetel de micronutrientes, segundo dados do fabricante.

Após a diluição do concentrado, a solução nutritiva foi trocada a cada 10 dias de cultivo, totalizando duas trocas de solução no decorrer do cultivo, sendo a primeira no décimo dia de cultivo e a segunda, no vigésimo dia, que permaneceu no sistema até o dia da colheita.

#### 4.5 Montagem da central de controle

A unidade denominada *central de controle* foi montada a partir de uma placa de circuito integrado Arduino nano e uma fonte de alimentação para o circuito controlador independente da alimentação dos demais equipamentos, a tomada de energia utilizada para a alimentação do circuito e dos equipamentos foi equipada com um fusível de proteção e chave de desligamento, afim de facilitar o desligamento total do dispositivo.

Os componentes periféricos acoplados incluíam um visor LCD, módulo de horário em tempo real (DS3231), uma placa de relés, unidade de coleta e registro de dados em mídia física (*data logger*) e sensor do tipo AM2301 para leitura da temperatura e umidade relativa do ar, o esquemático do circuito utilizado é apresentado na Figura 9 enquanto os componentes eletrônicos utilizados são apresentados na Figura 8.

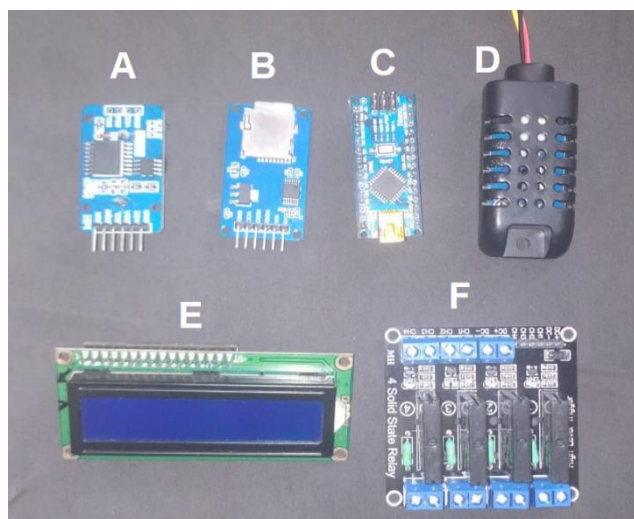


Figura 8 – Componentes utilizados na montagem do circuito da central controladora: A-Módulo de horário em tempo real; B- data logger; C- Arduino Nano; D- Sensor de umidade e temperatura do ar; E- módulo visor LCD; F- Módulo de relés. Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

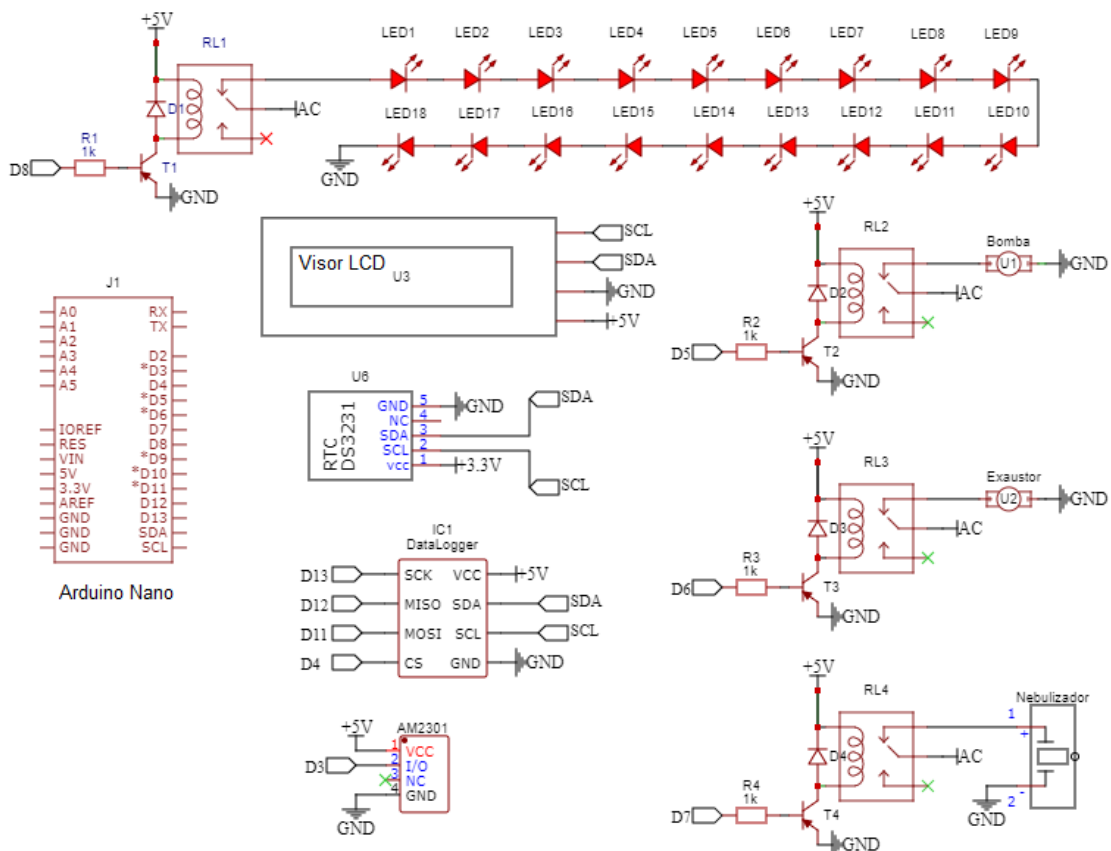


Figura 9 – Esquemático do circuito da central controladora.

Para assegurar proteção contra respingos, poeira e demais causadores de interferências, o conjunto foi isolado no interior de uma caixa de plástico transparente, onde apenas foram feitos furos para a saída de cabos para conexão de sensores.

A programação foi feita utilizando o software “Arduino IDE 1.8.13” desenvolvido e disponibilizado pela empresa Adafruit.

#### 4.6 Investigação da temperatura

Para a obtenção de dados acerca do comportamento da temperatura no interior do dispositivo, foram utilizados sensores Dallas DS18B20; ao todo foram utilizados 20 sensores individuais conectados à duas placas Arduino Uno R3 independentes da utilizada para a central de controle do dispositivo.

Os dados referentes à leitura de temperatura foram registrados em dois cartões de memória conectados aos circuitos, as coletas foram feitas com um intervalo de trinta minutos entre si, em seguida as informações foram tabeladas para posterior análise e montagem de um perfil térmico com auxílio do software *surfer*, da desenvolvedora Golden Software.

Os sensores foram distribuídos em quatro grupos com cinco sensores cada, em um arranjo espacial em forma de cruz, os conjuntos foram então distribuídos no interior da câmara com o auxílio de armações de arame em quatro posições com 22 centímetros entre si, mantendo um vão de dois centímetros entre uma sonda e as paredes internas do dispositivo.

A Figura 10 demonstra a distribuição dos sensores utilizados no mapeamento da temperatura no interior da câmara de cultivo, nela é possível ver a distribuição planejada dos sensores na vista superior e frontal da câmara (ponto de vista partindo da tampa e da janela, respectivamente), também é possível visualizar um esquemático tridimensional dos sensores, bem como uma foto da câmara em funcionamento, a partir da janela de manuseio, caracterizando a visão frontal.

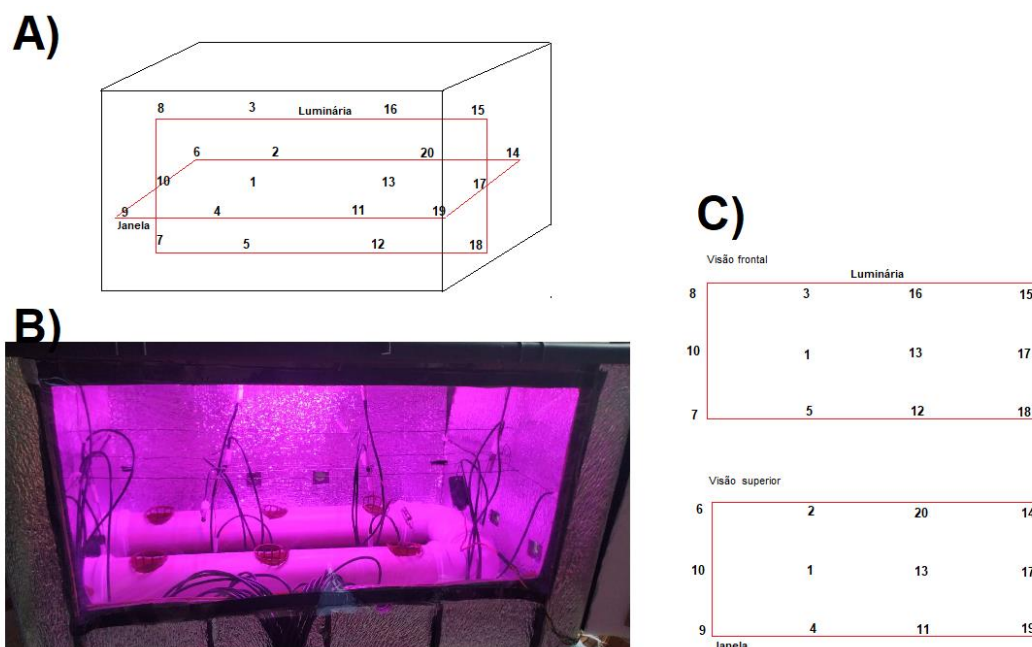


Figura 10 - Disposição dos sensores no interior da câmara. A) mapeamento tridimensional da câmara com sensores. B) Foto da câmara com sensores posicionados. C) Distribuição planejada dos sensores utilizados, em vista frontal (a cima) e vista superior (abaixo).

A coleta de dados de temperatura foi feita em condições compatíveis com a aplicação esperada do dispositivo, ocorrendo em ambiente doméstico sem aparelhos de ar condicionado. O dispositivo ficou protegido de luz solar direta e não foi movido durante o período em que foi utilizado.

Além disso, para investigar o funcionamento do sistema em condições de cultivo, foram plantadas mudas de alface crespa em todos os espaços disponíveis na calha de hidroponia.

Dessa forma, os sensores foram capazes de fornecer dados acerca da temperatura na zona de desenvolvimento vegetal e da influência do calor vindo da luminária diretamente acima, bem como a capacidade do dispositivo em criar um ambiente adequado para o desenvolvimento vegetal.

#### 4.6.1 Montagem dos perfis de temperatura

Os dados acerca da temperatura no interior do dispositivo foram coletados com intervalos de 30 minutos entre si durante toda a permanência das plantas no interior do dispositivo.

Para representar os efeitos do incremento de área foliar no comportamento da temperatura no interior da câmara com o decorrer do tempo, foram feitas análises em 5 datas diferentes após o plantio, com incrementos de 6 dias entre uma análise e outra.

Além disso, cada dia analisado foi dividido em 3 turnos de 8 horas cada; T1: das 00h às 8h; T2: das 8h às 16h; T3 das 16 às 23:59 h. As médias das temperaturas aferidas pelos sensores em cada turno foram utilizadas para a construção de gráficos diários.

Dessa forma, as 5 datas utilizadas na aferição de temperatura geraram 30 gráficos, capazes de demonstrar o comportamento térmico no interior da câmara conforme o passar do dia e do desenvolvimento da cultura cultivada.

## 4.7 Análise do desenvolvimento vegetal

Para avaliar a eficiência da câmara de cultivo, foi escolhida a cultura da alface crespa (*Lactuca sativa var. crispata*), por ser amplamente cultivada em sistemas de hidroponia, de fácil obtenção de mudas e ciclo curto, permanecendo 30 dias no interior do dispositivo, além de ser uma planta popularmente consumida no Brasil.

As mudas foram transplantadas com aproximadamente 30 dias de desenvolvimento e 4 folhas verdadeiras, sendo cultivadas em substrato convencional que foi parcialmente removido antes de ser introduzido no sistema de hidroponia.

O material vegetal foi analisado em duas ocasiões: uma ao plantio, após a retirada de todo o substrato vindo do viveiro por meio de enxague em água corrente e outra após 30 dias de cultivo, ponto em que foi realizada a colheita.

As análises incluíram peso e altura da planta e comprimento máximo das raízes, feitas com régua milimetrada e balança de campo, com precisões de 0,1cm e 0,1g respectivamente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Temperatura

#### 5.1.1 Vazão do sistema de exaustão

A velocidade média de saída de ar aferida diretamente acima do exaustor em 4 pontos distintos foi de 5,6 m s<sup>-1</sup> enquanto a área de passagem do ar foi calculada por meio da equação 2:

$$A = \pi(3,6^2 - 1,75^2)$$

$$A = 31,094\text{cm}^2$$

Dessa forma, por meio da equação 1 em conjunto com a velocidade média aferida anteriormente, temos a vazão do exaustor (Q):

$$Q = 0,0031094\text{m}^2 \times 5,6 \text{ m s}^{-1}$$

$$Q = 0,01741 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$$

Sabendo que o volume útil do interior da câmara é de cerca de  $0,1266 \text{ m}^3$ , por meio da equação 3 temos os segundos necessários para uma renovação de ar (n):

$$n = 0,1266\text{m}^3 \div 0,01741 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$$

$$n = 7,27 \text{ Segundos}$$

Com tais resultados, é possível afirmar que o ar no interior da câmara é completamente renovado a cada 7,27 segundos, totalizando cerca de 8,25 renovações de ar por minuto durante o acionamento do sistema de exaustão.

Os valores obtidos demonstram a renovação de gases no interior da câmara, além de servirem como base para propostas de redimensionamento do sistema de exaustão.

### 5.1.2 Eficiência do sistema de arrefecimento

A avaliação do sistema de arrefecimento se deu a partir de dados apresentados na tabela 1.

Em T1, o acionamento do sistema de iluminação e arrefecimento ocorreu apenas nas duas últimas horas desse turno, isso se reflete nas observações exibidas na tabela 1, no qual é possível verificar temperaturas externas e internas mais amenas, que tenderam a apresentar menores variações.

Durante T2, turno onde houve acionamento constante do sistema de iluminação e arrefecimento, verificou-se tendência de redução da temperatura interna em relação à externa, apesar do calor emanado pela luminária e do aumento da temperatura externa. Esses dados são promissores, demonstrando tendência de controle eficiente da temperatura por parte do sistema de arrefecimento.

Tabela 1 – Dados coletados em cinco datas durante o cultivo, separados em turnos de 8 horas e médias em 24 horas

DATA	Turno	Temperatura externa (°C)	Temperatura interna (°C)	Umidade relativa do ar (%)
17/01/2021	1	24,23	26,89	78,86
	2	25,67	26,54	70,57
	3	26,76	27,57	76,72
	24h	25,55	27,00	75,39
23/01/2021	1	26,77	25,97	72,38
	2	27,98	25,65	67,82
	3	29,97	27,58	72,20
	24h	28,25	26,40	70,80
29/01/2021	1	25,67	24,93	74,68
	2	28,43	25,63	67,97
	3	28,73	27,44	78,65
	24h	27,94	26,00	73,77
04/02/2021	1	27,09	26,69	82,23
	2	27,56	26,39	75,51
	3	28,37	28,23	77,82
	24h	27,67	27,10	78,52
10/02/2021	1	24,48	24,10	95,11
	2	25,35	24,20	81,82
	3	27,12	25,89	89,58
	24h	25,65	24,73	88,84

Média dos dados coletados durante o período de cultivo agrupadas em turnos 00h às 07:59h (Turno 1), 08h às 15:59h (turno 2), 16 às 23:59 (turno 3), umidade relativa do ar no interior da câmara de cultivo, temperatura interna da câmara e temperatura do ambiente ao redor da câmara (temperatura externa).

De forma semelhante à T1, T3 conta com apenas duas horas de funcionamento dos sistemas de exaustão e iluminação, sendo possível verificar incrementos da temperatura interna neste turno em decorrência do aumento de temperatura externa e não acionamento do sistema de exaustão.

As exceções ao comportamento descrito se deram nos dias 17 de janeiro e 10 de fevereiro, já que no primeiro houve baixas temperaturas externas e no segundo, elevada umidade relativa do ar em decorrência do incremento de área foliar e conseqüentemente evapotranspiração das plantas cultivadas, tais resultados coincidem com os obtidos por Silva (2020), que verificou influências

diretas partindo da temperatura externa e do crescimento vegetal sobre o comportamento térmico no interior de uma câmara de cultivo.

Os dados apontam que o sistema de arrefecimento tendeu a manter a temperatura interna similar ou até mesmo inferior à externa durante seu funcionamento, gerando um ambiente compatível com o desenvolvimento vegetal durante o período e condições analisadas.

### 5.1.3 Perfis térmicos

Os perfis térmicos montados a partir dos dados coletados nas 5 datas previamente descritas são apresentados nas Figuras 11 a 15.

Nas Figuras 11A,12A,13A,14A,15A observa-se pouca influência do sistema de arrefecimento e de iluminação sobre os perfis térmicos de vista frontal e vertical, entretanto, devido ao acionamento destes sistemas nas horas finais do primeiro turno, é possível constatar mudanças sutis no comportamento térmico no interior da câmara, que se tornam mais pronunciadas no segundo turno de avaliações.

Nas Figuras 11B,12B,13B,14B,15B é possível observar perfis térmicos montados a partir de dados do segundo turno, que se deu durante as horas mais quentes do dia e contou com o funcionamento da luminária e exaustor.

Nos perfis de vista frontal observa-se um aumento de temperatura na parte superior da câmara, que fica cada vez mais pronunciado conforme aproxima-se da fonte de calor (luminária), em contrapartida, na parte direita de cada perfil frontal, observa-se contornos de menor temperatura que partem da parte inferior em direção à superior.

Esses contornos ocorrem em decorrência do exaustor posicionado na parte superior direita da câmara, demonstrando de forma visual a eficiência do sistema proposto, que impediu que o calor vindo da luminária se espalhasse por todo o interior da câmara.

As análises dos perfis do terceiro turno, representados pelas Figuras 11C,12C,13C,14C,15C demonstram os efeitos do desligamento do sistema de iluminação antes da chegada das horas mais frias do dia; o sistema permaneceu



ligado nas duas primeiras horas do turno e em seguida foi desligado, enquanto o exaustor passou a ser acionado somente caso a temperatura externa ultrapassasse 30°C.

O aumento de temperatura no interior do dispositivo se mostrou semelhante ao do turno anterior, porém com o calor entrando de forma menos acentuada, vindo das aberturas para ventilação e eventual acionamento do exaustor.

Em todos os perfis de vista vertical é possível observar contornos de maior temperatura na parte inferior das imagens, isso se justifica pela presença da janela de manuseio, que apesar de possuir uma cobertura com isolante térmico, ainda permitiu a troca de ar e entrada de calor.

Estes resultados são compatíveis com os observados por Silva (2020) e Katagiri et. al. (2015), que também citam distorções na temperatura interna de suas câmaras em decorrência de fatores externos e presença de luminárias.

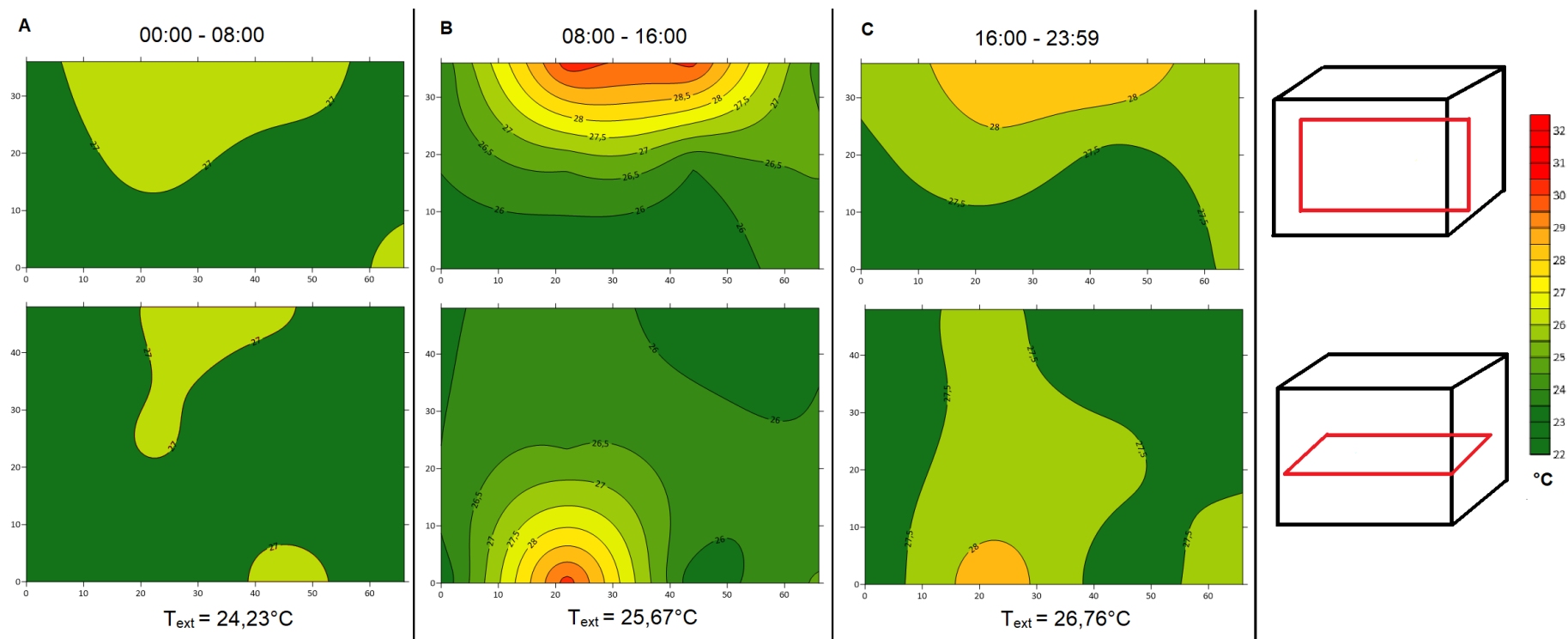


Figura 11 - Perfis térmicos dia 17 jan. 2021. A) Vista frontal e vertical para T1. B) Vista frontal e vertical para T2. C) Vista frontal e vertical para T3.

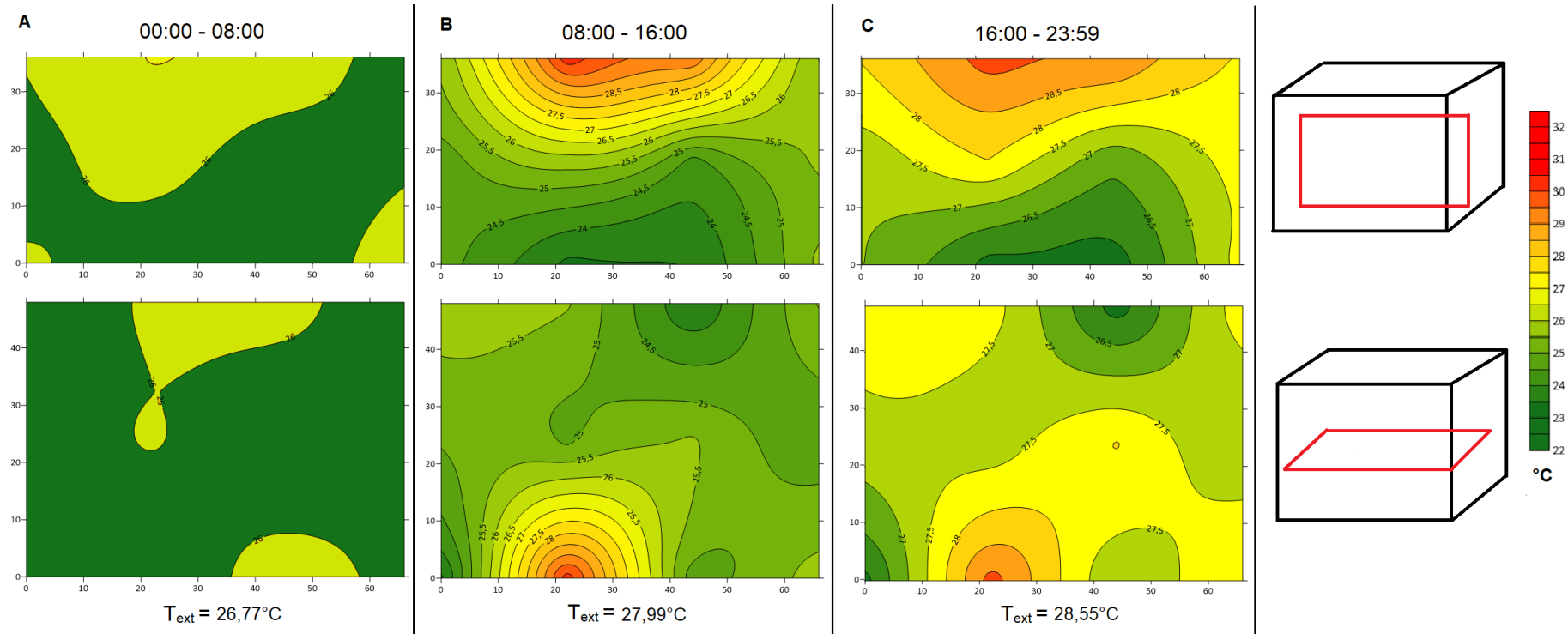


Figura 12 - Perfis térmicos dia 23 jan. 2021. A) Vista frontal e vertical para T1. B) Vista frontal e vertical para T2. C) Vista frontal e vertical para T3.

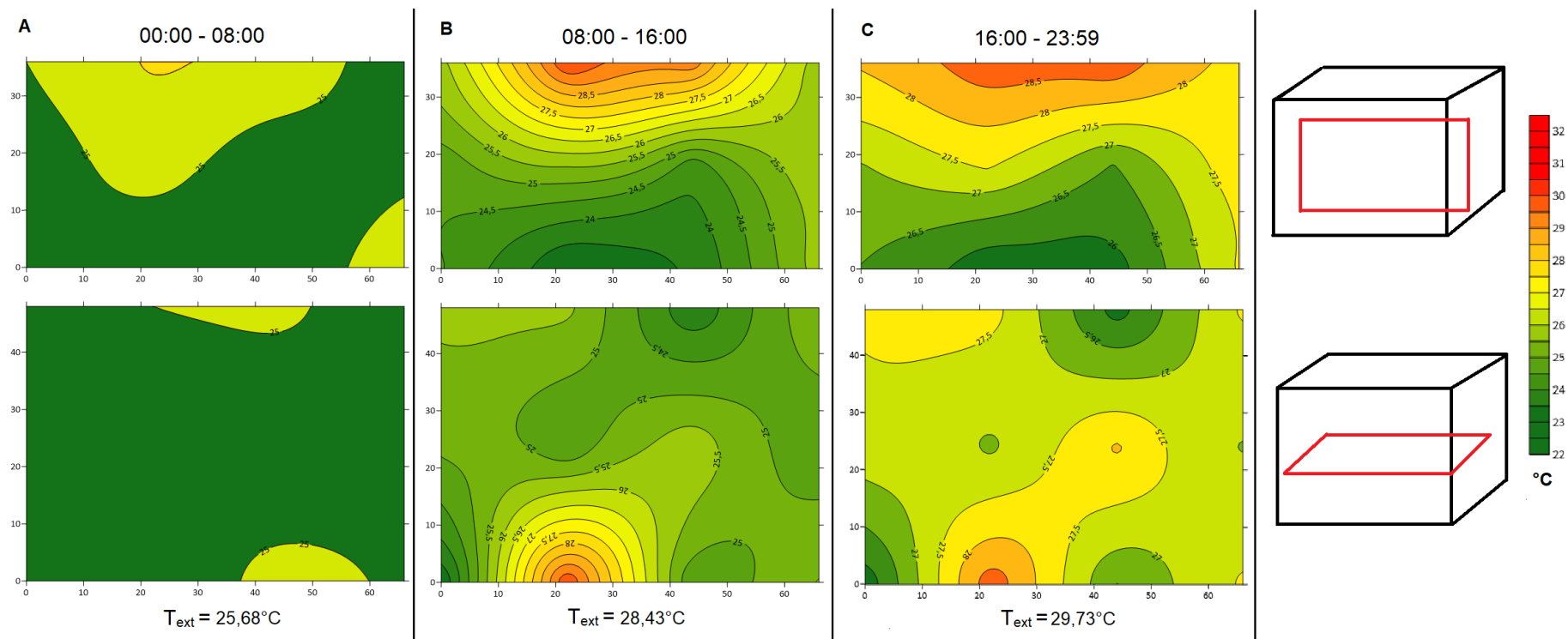


Figura 13 - Perfis térmicos dia 29 jan. 2021. A) Vista frontal e vertical para T1. B) Vista frontal e vertical para T2. C) Vista frontal e vertical para T3.

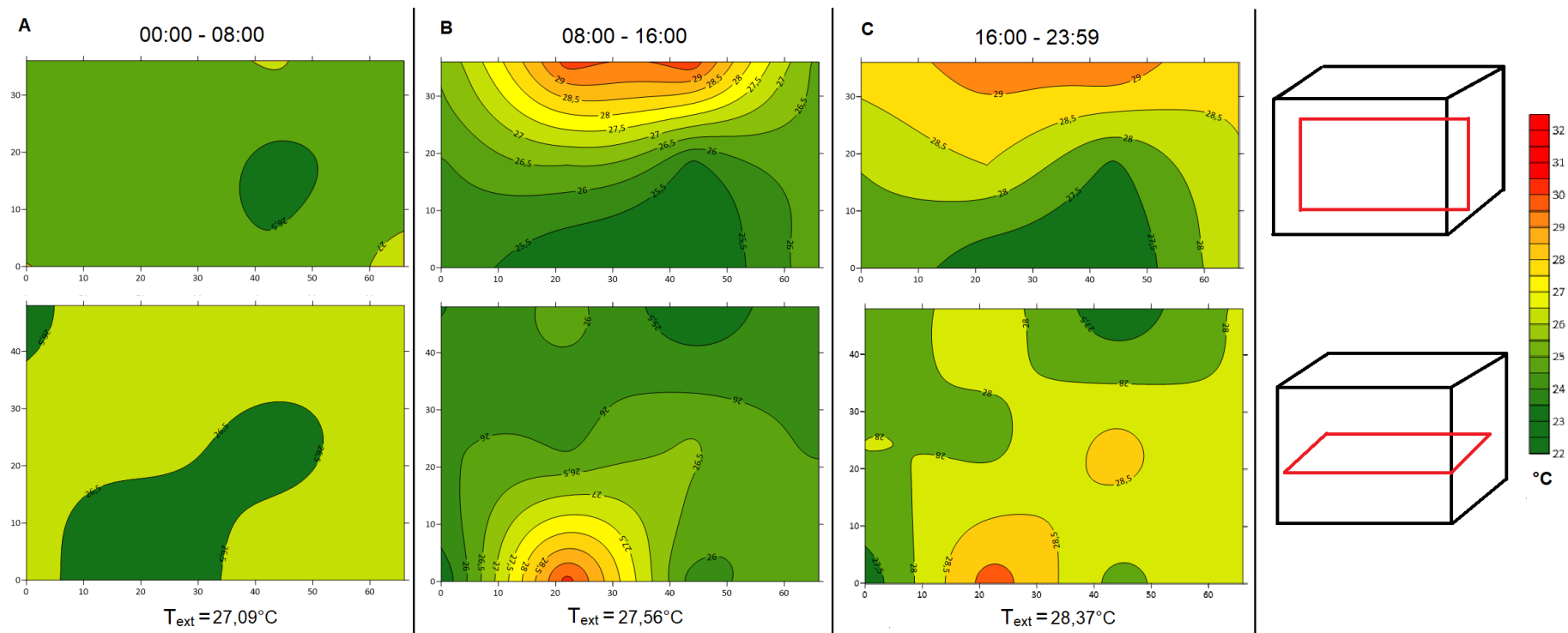


Figura 14 - Perfis térmicos dia 04 fev. 2021. A) Vista frontal e vertical para T1. B) Vista frontal e vertical para T2. C) Vista frontal e vertical para T3.

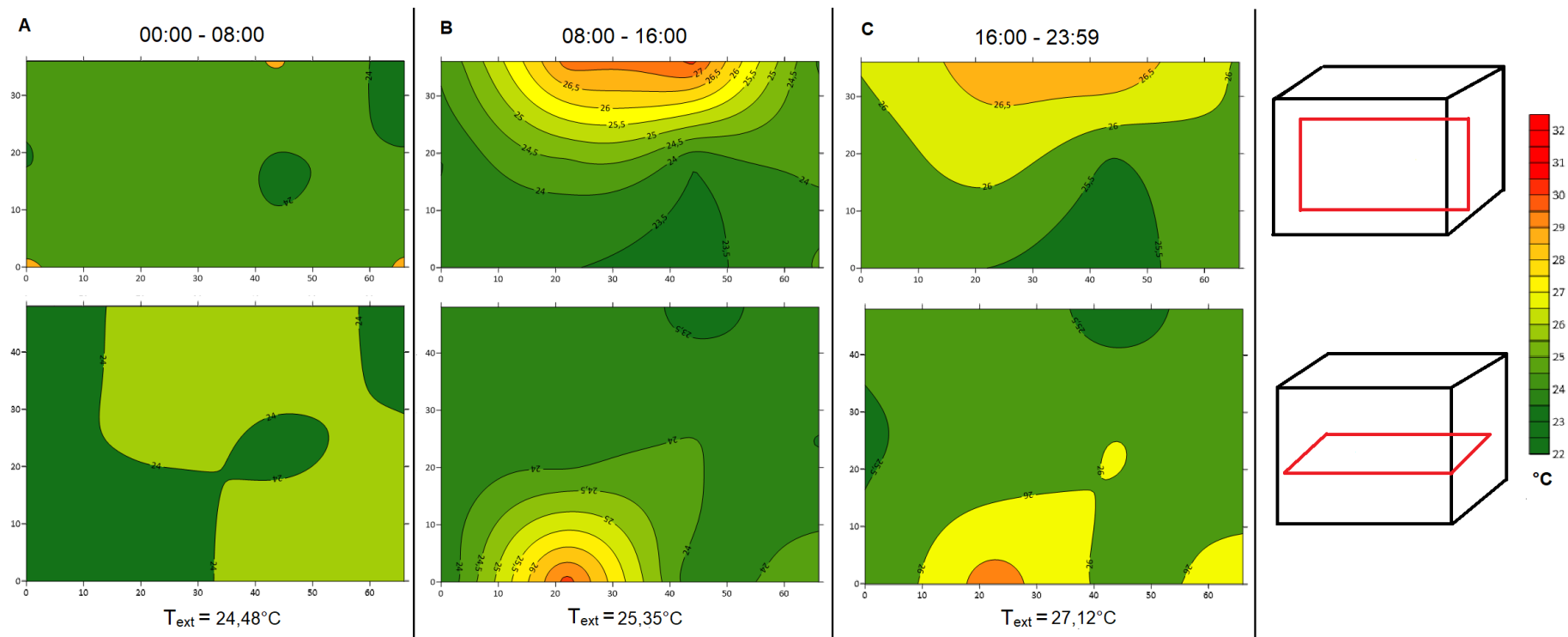


Figura 15 - Perfis térmicos dia 10 fev. 2021. A) Vista frontal e vertical para T1. B) Vista frontal e vertical para T2. C) Vista frontal e vertical para T3.

## 5.2 Desenvolvimento vegetal

Os dados analisados acerca do desenvolvimento vegetal são apresentados na tabela 2, enquanto a Figura 16 apresenta imagens das respectivas plantas colhidas e numeradas conforme sua posição na calha de cultivo.

Tabela 2 - Análises das plantas de alface na ocasião do transplântio e após 30 dias após o transplântio (30 DAT).

		P1	P2	P3	P4	P5	P6
Transplântio	peso (g)	3,0	3,2	2,1	2,6	3,2	2,5
	Comprimento de raiz (cm)	6,0	5,0	7,0	4,5	6,0	5,0
	Comprimento de folha (cm)	6,0	6,0	5,0	5,0	6,5	6,0
30 DAT	peso (g)	24,5	54,1	35,7	26,6	27,5	20,9
	Comprimento de raiz (cm)	26,0	20,0	26,5	14,0	26,5	15,5
	Comprimento de folha (cm)	31,5	26,0	26,0	28,0	21,0	28,5

É possível verificar diferenças entre as plantas colhidas, onde P2 e P3 apresentaram maior peso fresco, chegando a 54,1 e 35,7 gramas respectivamente, além de aspecto menos alongado.

Tal diferença pode ser justificada pela localização de ambas, que ficaram em posições nas quais a incidência luminosa foi favorecida pelo ângulo de aproximação com a luminária, bem como a ausência de distúrbios térmicos advindos da janela de manuseio,

Ainda com base no mapeamento térmico elaborado, pode-se afirmar que P2 e P3 se encontram na zona de maior uniformidade térmica, passível de maior ação do sistema de arrefecimento, ocupando uma zona favorecida por conforto térmico e incidência luminosa.

As demais apresentaram crescimento reduzido e aspecto alongado, caracterizando deficiência luminosa. e temperaturas fora da zona ideal.

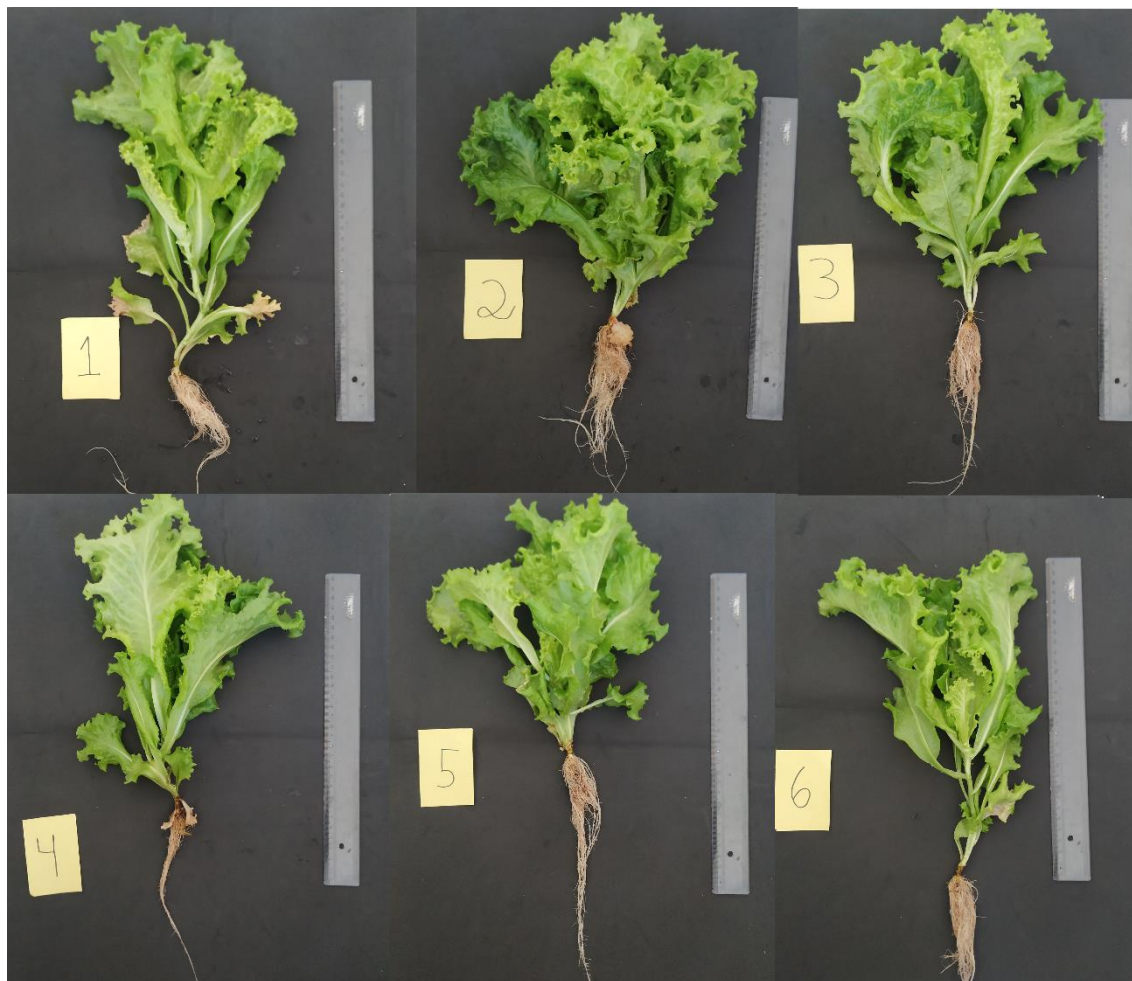


Figura 16 - Plantas de alface colhidas após 30 dias de cultivo no interior da estufa.

Outros dados importantes que podem ser obtidos pela câmara de cultivo incluem a temperatura média, mínima e máxima no interior da câmara apresentadas na tabela 3 e a soma térmica para a cultura durante o período de cultivo, seguindo a metodologia proposta por Araújo et al. (2010), temos a equação 4:

$$GD = \sum_{i=1}^n \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_b \right) \quad (4)$$

Em que GD é o total de graus dia acumulado,  $T_{\max}$  é a temperatura do ar máxima diária registrada,  $T_{\min}$  a temperatura do ar mínima diária registrada e



$T_b$  a temperatura mínima suportada pela planta, que para este cálculo adotou-se a recomendação dos autores, 10°C.

Com base nessa equação, obteve-se a soma térmica para o período de 30 dias igual a 495,5 graus-dia, este dado condiz com um ambiente favorável para a cultura (ARAÚJO et al., 2010), porém sozinho não é capaz de demonstrar variações de temperatura no interior da câmara, que podem justificar o desenvolvimento reduzido dos indivíduos cultivados.

Em sequência, temos a análise da temperatura, conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Temperatura média ( $T_{med}$ ) mínima ( $T_{min}$ ) e máxima ( $T_{max}$ ) registradas em períodos de 0 a 30 dias após o transplântio (DAT) agrupados em turnos de 6 DAT.

DAT	$T_{med}$	$T_{min}$	$T_{max}$
0 - 6	26,46	23,83	29,35
7 - 12	26,04	24,5	28,96
13 - 18	25,92	22,37	28,06
19 - 24	27,13	24,03	29,02
25 - 30	25,27	22,13	29,31

Os dados apresentados demonstram a tendência de controle de temperatura no interior do dispositivo no decorrer do período, que evitou temperaturas máximas superiores ao valor atribuído à  $T_{max}$  na programação da central controladora do sistema ( $T_{max} = 30^\circ\text{C}$ ), bem como proporcionou temperaturas médias em uma faixa uniforme no decorrer do experimento.

Apesar de a alface ser mais bem adaptada para temperaturas médias inferiores às observadas neste teste, estudos indicaram a viabilidade em temperaturas similares, sem que houvesse grandes perdas no acúmulo de massa fresca (RESENDE et al., 2015).

### 5.3 Análise de luz

Os dados coletados durante a análise do sistema de iluminação são exibidos na Tabela 4:

Tabela 4 - Densidade do fluxo de fótons fotossinteticamente ativos ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) medidos nas 6 posições de cultivo no interior da câmara em 3 ajustes de altura.

Altura da luminária (cm)	Posição					
	1	2	3	4	5	6
10	37,5	125	74,9	87,3	175	37,5
20	37,5	74,9	74,9	74,9	115	37,5
30	37,5	49,9	37,5	37,5	49,9	37,5

As análises demonstraram níveis baixos de DFFF medidos nas condições de cultivo durante o experimento, onde a luminária ficou em uma altura de 30 cm em relação à calha de cultivo, demonstrando a necessidade da adoção de um sistema com altura variável conforme o desenvolvimento da cultura, dado condizente com a literatura consultada (TAVARES, 2018)(SILVA, 2020).

Outro dado importante observado foi a desuniformidade de DFFF encontrada para os diferentes pontos de plantio, onde os pontos 2 e 5 contaram com maior DFFF em todos os ajustes de altura quando comparados aos outros pontos, reflexo do posicionamento da calha em relação à luminária, que não apresentou distribuição adequada das lâmpadas.

As posições com menor DFFF foram 1 e 6, que com a luminária a 30 cm apresentaram medidas semelhantes às posições vizinhas, mas que não seguiram a tendência de aumento das demais posições conforme a aproximação da luminária, tal fato em conjunto com a desuniformidade térmica listada anteriormente contribuiu para plantas alongadas e com baixo desenvolvimento.

As posições mais favorecidas em termos de DFFF foram as 2 e 5, onde em todos os ajustes de altura receberam níveis maiores que as demais. Isso é resultado direto do posicionamento destes pontos em relação à luminária, que se encontrava diretamente acima, formando um ângulo de aproximadamente 90°.

Por outro lado, a uma altura de 20 e 10 cm, a DFFF foi favorável para as posições 2 a 5, que receberam intensidade luminosa condizente com a cultura da alface (DA ROCHA et al. 2014).

#### 5.4 Custos para a elaboração do projeto

Os custos apresentados na tabela 6 incluem apenas os materiais e peças compradas, descontando-se mão de obra e artigos de oficina, como solda, reagentes químicos e ferramentas especializadas para a realização de projetos elétricos e construção, alterações nos valores puderam ser observadas entre o início da elaboração e a conclusão do desenvolvimento, os valores utilizados são referentes ao terceiro trimestre de 2020.

Tabela 6 – custos totais discriminados por item utilizado na construção do dispositivo no ano de 2020

<b>Item</b>	<b>Valor</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Total</b>
<b>Placa arduino nano</b>	38,79	1	38,79
<b>Sensor AM2301</b>	35,50	1	35,50
<b>Visor LCD</b>	20,62	1	20,62
<b>Data logger</b>	12,90	1	12,90
<b>Fontes de alimentação</b>	18,90	2	37,80
<b>Conectores elétricos</b>	25,90	1	25,90
<b>Módulo RTC</b>	11,61	1	11,61
<b>Placa de relés</b>	39,99	1	39,99
<b>Placa de circuito impresso</b>	4,90	1	4,90
<b>Ventoinha de exaustão</b>	10,90	1	10,90
<b>Nebulizador ultrassônico</b>	99,99	1	99,99
<b>Bomba hidráulica</b>	65,50	1	65,50
<b>Luminária de LEDs</b>	130,00	1	130,00
<b>Balde de solução</b>	18,90	1	18,90
<b>Manta aluminizada (m<sup>2</sup>)</b>	12,90	3	38,70
<b>Caixa protetora dos circuitos</b>	15,99	1	15,99
<b>Caixa plástica 140 litros</b>	246,00	1	246,00
<b>Tubos e conectores</b>	120,00	1	120,00
<b>Madeira, pregos e parafusos</b>	8,00	1	8,00
<b>Total (R\$)</b>			981,99

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho demonstrou que é factível a elaboração de um projeto de câmara de crescimento vegetal de caráter doméstico e de baixo custo, contando com circuitos eletrônicos capazes de gerenciar os diferentes fatores que constituem um ambiente de cultivo favorável.

Entretanto, o protótipo descrito neste trabalho ainda carece de aperfeiçoamentos técnicos, que incluem um sistema de arrefecimento mais eficiente no que diz respeito à uniformidade térmica e que seja capaz de atuar em regiões e ambientes de clima frio.

Ainda, o sistema de iluminação necessita ser remanejado para garantir melhor distribuição de luz, evitando que se criem focos luminosos no interior do dispositivo, o que pode ocasionar indivíduos raquíticos.

Outro ponto importante a ser tratado é a programação da central controladora, que ainda depende da utilização de um computador e de conhecimentos básicos acerca do funcionamento de linguagens de programação para ser devidamente ajustada para o uso.

Isso limita o público atendido pela proposta do projeto, de forma que trabalhos posteriores contem com sistemas mais simples e didáticos, que possam ser utilizados por públicos de diversas idades demandando nada mais que um *smartphone* para compartilhamento de dados entre cultivadores e a própria câmara de cultivo.

Por fim, temos os custos calculados para a construção do dispositivo, que no ano de 2020 totalizou um investimento de aproximadamente 980 reais.

O valor do protótipo demonstrou seu custo benefício em relação aos equipamentos já presentes no mercado nacional e de importados, que ainda em fase de testes conseguiu gerar um ambiente de cultivo favorável e automatizado com um custo inferior tanto aos equipamentos importados quanto os já encontrados no mercado brasileiro.

## 7 REFERÊNCIAS

AL-JAMAL, K. Greenhouse cooling in hot countries. **Energy**, v.19, n.11, p.1187-1192, 1994.

ALMEIDA, C. C. **Sistema Eletrônico baseado em diodos emissores de luz (LEDs) para aplicação em estudos de Fisiologia Vegetal**. 2014. 95 f. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora.

ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: Introdução ao tratamento biofísico**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2002. 195-232 p

ARAÚJO, Thiago S. et al. Crescimento da alface-americana em função dos ambientes, épocas e graus-dias. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 4, p. 441-449, 2010.

BERGAMASCHI, Homero. O clima como fator determinante da fenologia das plantas. **Fenologia ferramenta para conservação, melhoramento e manejo de recursos vegetais arbóreos**. Colombo: Embrapa Florestas, p. 291-310, 2007.

BOUKHARAEVA, Louiza Mansourovna et al. Agricultura urbana como um componente do desenvolvimento humano sustentável: Brasil, França e Rússia. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 22, n. 2, p. 413-425, 2005.

CARRIJO, O. A.; MAKISHIMA, N. Principios de hidroponia. **Embrapa Hortaliças-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2000.

CHEEMA, G. S. et al. **Urban Agriculture: food, jobs and sustainable cities**. Nova York: United Nations Development Programme, 1996.

DA ROCHA, Paulo Sérgio Gomes et al. Produção de alface hidropônica sob diferentes intensidades luminosas com LEDs. **Hortic. bras**, v. 31, n. 2, 2014.

FLUENCE. About PAR, PPF, And PPF. **FLUENCE by OSRAM**, 2020. Disponível em: <<https://fluence.science/science-articles/horticulture-lighting-metrics/>>. Acesso em: 14 Agosto 2020.

FURLAN, R. A.; Folegatti, M. V. Distribuição vertical e horizontal de temperaturas do ar em ambientes protegidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.1, p.93-100, 2002

FURLANI, P.R.; SILVEIRA, L.C.P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. **Cultivo Hidropônico de Plantas: Parte 1 - Conjunto hidráulico**. 2009. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2009\\_1/hidroponiap1/index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2009_1/hidroponiap1/index.htm)>. Acesso em: 04 out. 2020.

KATAGIRI, Fumiaki et al. Design and construction of an inexpensive homemade plant growth chamber. **PloS one**, v. 10, n. 5, p. e0126826, 2015.

KING, Anthony et al. The future of agriculture. **Nature**, v. 544, n. 7651, p. 21-23, 2017.

LAISK, A. et al. Adjustment of leaf photosynthesis to shade in a natural canopy: rate parameters. **Plant, Cell & Environment**, v. 28, n. 3, p. 375-388, 2005.

MAUNEY, T. L. **Plant Growing System**. US 2002/0184820 A1, 2002.

MONTERO, J.I.; Antón, A.; Biel, C.; Franquet, A. Cooling of greenhouse with compressed air fogging nozzles. *Acta Horticulturae*, Montpellier - France, v.281, p.199-209, 1990

MUNNS, David PD. **Engineering the environment: Phytotrons and the quest for climate control in the cold war**. University of Pittsburgh Press, 2017.

NETO, E. B.; BARRETO, L. P. As técnicas de hidroponia. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 8, p. 107-137, 2012.

PEDRO JUNIOR, Mário J. et al. Estimativa de graus-dia em função de altitude e latitude para o estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 36, n. 1, p. 89-92, 1977.

PINHO, P. et al. **Light emitting diodes in plant growth: Comparative growth test in greenhouse and evaluation of photosynthetic radiation**. Helsinki Univ. Technol., Department of Electronics–Lighting Unit. Espoo, Tech. Rep. 48, 2008.

RAVEN, Peter H.; EVERT, Ray F.; EICHHORN, SUSAN E. *Biologia vegetal*. 6ª edição. **Guanabara Koogan SA**, 2001.

RESENDE, G. M. de; YURI, J. E.; COSTA, N. D.; GOMES, A. da S. Alface: qual cultivar? **Cultivar HF**, Pelotas, v. 13, n. 90, p. 9-11, fev./mar. 2015.

RODRIGUES, M. **Crescimento e trocas gasosas de copo-de-leite em função de graus-dia de desenvolvimento**. 2012. 84 p. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

SILVA, L. **Desenvolvimento de um protótipo de uma câmara de cultivo de plantas**. 2020. 106 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.

STRECK, N. A. A temperature response function for modeling leaf growth and development of the African violet (*Saintpaulia ionantha Wendl.*). **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 1, p. 55-62, fev. 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6ª. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TAVARES, P. L. **Análise e projeto de iluminação a LEDs de canais vermelho e azul orientados ao cultivo de lúpulo (*Humulus lupulus L.*)**. 92p. 2018.